



UNIVERSIDAD
NACIONAL
DE COLOMBIA

Beneficios ambientales de un proceso de **re-refinación de aceites** **lubricantes usados en Colombia.**

Alejandra María Muñoz Rivera

Universidad Nacional de Colombia
Facultad de Minas
Departamento de Geociencias y Medio Ambiente
Medellín, Colombia
2020

Beneficios ambientales de un proceso de **re-refinación de aceites lubricantes usados en Colombia.**

Alejandra María Muñoz Rivera

Tesis presentada como requisito parcial para optar por el título de:

Magister en Medio Ambiente y Desarrollo

Director:

Ph.D. Héctor Iván Velásquez Arredondo

Codirector:

Ph.D Sergio Hernando Lopera Castro

Línea de Investigación:

Gestión Ambiental

Universidad Nacional de Colombia

Facultad de Minas

Departamento de Geociencias y Medio Ambiente

Medellín, Colombia 2020

“Es el cambio, el cambio permanente, el cambio inevitable, el cual es el factor dominante en la sociedad moderna. Ninguna decisión sensata puede ya tomarse sin tener en cuenta no sólo el mundo como es, sino el mundo como será.”

Isaac Asimov

Declaración de obra original

Yo declaro lo siguiente:

He leído el Acuerdo 035 de 2003 del Consejo Académico de la Universidad Nacional. «Reglamento sobre propiedad intelectual» y la Normatividad Nacional relacionada al respeto de los derechos de autor. Esta disertación representa mi trabajo original, excepto donde he reconocido las ideas, las palabras, o materiales de otros autores.

Cuando se han presentado ideas o palabras de otros autores en esta disertación, he realizado su respectivo reconocimiento aplicando correctamente los esquemas de citas y referencias bibliográficas en el estilo requerido.

He obtenido el permiso del autor o editor para incluir cualquier material con derechos de autor (por ejemplo, tablas, figuras, instrumentos de encuesta o grandes porciones de texto).

Por último, he sometido esta disertación a la herramienta de integridad académica, definida por la universidad.

Alejandra María Muñoz Rivera

Nombre

Fecha 6/06/2021

Agradecimientos

Agradezco a mis asesores y profesores en la Universidad Nacional de Colombia, quienes me orientaron asertivamente para hacer posible esta tesis. A mi director, profesor Héctor Iván Velásquez y codirector, profesor Sergio Lopera, por ofrecerme su acompañamiento y conocimiento.

Un agradecimiento muy especial a John Posada Duque y a Natalia Andrea Cano, quienes con su experiencia en análisis de ciclo de vida y su asesoría, aportaron en la concreción de este trabajo.

A las empresas de re-refinación -Biochemical group S.A.S- y la empresa de valorización energética que aportaron información y conocimiento relevante para el desarrollo de esta investigación con fines académicos, en pro del desarrollo conceptual de la sostenibilidad de los aceites lubricantes usados.

Agradezco a Fundación Con Vida por ofrecerme el tiempo, el respaldo y la motivación permanente para el desarrollo de este trabajo.

A todas las personas que me escucharon y me ayudaron a concretar esta tesis, este también es su trabajo.

Dedico esta tesis a mi familia quienes me acompañan y respaldan en todo momento.

Resumen

La alternativa de re-refinación, catalogada como ambientalmente sostenible, llegó a Colombia hace aproximadamente 10 años y ha venido ganando protagonismo por reciclar los aceites minerales usados para obtener bases lubricantes y otros subproductos, los cuales tienen las mismas características de los productos de primera refinación de crudo sin hidrotreamiento y con mejores precios de mercado. Sin embargo, la principal vía de tratamiento ha sido la fabricación de combustibles industriales a partir de lubricantes usados, denominada valorización energética. Ambas tecnologías cumplen con la misma función de disponer o reutilizar el aceite lubricante usado, y utilizarlo como materia prima de proceso para otorgar una segunda vida a sus componentes en forma de otros subproductos útiles para el mercado energético y petroquímico.

A partir de lo anterior y mediante este trabajo, se realiza la evaluación del ciclo de vida del aceite lubricante usado en su etapa final, para determinar los beneficios ambientales del proceso de Re-refinación, mediante un análisis comparativo de tipo descriptivo, entre el sistema de tratamiento de Re-refinación (modelo Puerta-Puerta) y la Tecnología de Valorización energética (modelo Puerta-Tumba) como sistema de referencia dentro del mismo sistema de producto. Para ambos procesos se realiza la evaluación ambiental mediante el método ReCiPe de punto medio, disponible en el Software Umberto.

Se obtuvieron resultados en 12 categorías de impacto ambiental y en la demanda acumulada de energía para cada vía evaluada, con resultados directos en la sustitución de materias primas e impactos ambientales y energéticos evitados, lo cual otorga créditos a cada vía de tratamiento por la reducción de los impactos totales en el ciclo de vida del aceite lubricante.

Palabras claves: aceite lubricante usado, beneficios ambientales, análisis de ciclo de vida, re-refinación, valorización energética

Environmental benefits of a re-refining process for used lubricating oils in Colombia

Abstract

The re-refining alternative, classified as environmentally sustainable, arrived in Colombia approximately 10 years ago and has been gaining prominence by recycling used mineral oils to obtain lubricant bases and other subproducts, which have the same characteristics of the products of first crude refining without hydrotreating and with better market prices. However, the main treatment route has been the manufacture of industrial fuels from used lubricants, called energy recovery. Both technologies fulfill the same function of disposing or reusing the used lubricating oil, and using it as raw material for the process to give a second life to its components in the form of other useful by-products for the energy and petrochemical market.

Based on the above and through this work, the life cycle evaluation of the lubricating oil used in its final stage is carried out, to determine the environmental benefits of the Re-refining process, through a descriptive comparative analysis between the system Re-refining treatment (Door-Door model) and Energy Recovery Technology (Door-Tomb model) as a reference system within the same product system. For both processes, the environmental evaluation is carried out using the ReCiPe midpoint method, available in the Umberto Software.

Results were obtained in 12 categories of environmental impact and in the accumulated energy demand for each operating route, with direct results in the substitution of raw materials and avoided environmental and energy impacts, which grants credits to each treatment route for the reduction of the total impacts on the lubricating oil life cycle.

Keywords: used lubricating oil, environmental benefits, life cycle analysis, re-refining, energy recovery.

Contenido

Abstract	VII
Lista de figuras	XI
Lista de tablas	XII
Introducción	15
1. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA	18
1.1. Objetivo General.....	18
1.2. Objetivos Específicos	19
1.3. Pregunta problema	19
1.4. Hipótesis.....	19
2. JUSTIFICACION	20
3. ANTECEDENTES	21
4. MARCO TEÓRICO ACEITES LUBRICANTES	25
4.1. Generalidades Aceites Lubricantes Usados	25
4.2. Gestión de los aceites lubricantes usados	27
4.2.1. Tendencias en el mercado de los lubricantes.....	29
4.2.2. Participación de los ALU en la canasta energética nacional	30
4.3. Los aceites lubricantes usados y su origen	31
4.3.1. Origen de un aceite lubricante usado	31
4.3.2. Lubricantes según su origen y composición	32
La base lubricante.....	32
Los aditivos	34
4.3.3. Tipos de aceites lubricantes	35
4.4. Clasificación y características de los aceites lubricantes	38
4.5. Factores de deterioro del aceite lubricante	40
4.6. Reciclaje y tratamiento de aceites lubricantes usados	41
4.6.1. Tecnologías para la disposición y/o tratamiento de aceites lubricantes usados 44	
4.7. Aspectos ambientales de los aceites lubricantes usados	47
4.7.1. Impactos ambientales negativos.....	48
4.7.2. Impactos positivos del aprovechamiento de los aceites usados.....	51
4.7.3. Aceites lubricantes usados y los objetivos de desarrollo sostenible ..	52

5. CONTEXTO NORMATIVO RELACIONADO ACEITES LUBRICANTES USADOS	57
5.1. Contexto Internacional aceites lubricantes usados.....	57
5.2. Contexto nacional aceites lubricantes usados.....	59
6. MARCO CONCEPTUAL: METODOLOGÍA ANÁLISIS DE CICLO DE VIDA - ACV-	69
Tipos de Análisis de Ciclo de Vida	69
6.1. Las normas ISO como estándar metodológico	70
Fases de desarrollo de un análisis de Ciclo de Vida.....	70
6.2. Metodología particular ciclo de vida ALU -fase fin de la vida-	71
6.2.1. Condiciones de entrada y diseño metodológico particular.....	71
6.2.2. Proceso para la asignación de cargas ambientales y evaluación energética	73
6.2.3. Tratamiento metodológico ACV para el estudio de caso	74
6.2.4. Límites de la metodología ACV para el estudio de caso	75
6.2.5. Descripción de las fases del ACV para el estudio de caso.....	76
6.2.6. Fase 1: Definición del objetivo y el alcance:	76
6.2.7. Fase 2: Análisis de inventario.....	76
Principios de aplicación de los Análisis de Inventario del Ciclo de Vida	77
6.2.8. Fase 3: Análisis de Impactos:	78
Potencial de Cambio Climático:	79
Agotamiento del ozono estratosférico:	80
Acidificación:	81
Eutroficación:	82
Formación fotoquímica de ozono:	83
Ecotoxicidad:.....	84
Toxicidad Humana:	85
Formación de material particulado:	86
Agotamiento de Metales y Fósiles:	87
6.2.9. Fase 4: Interpretación.....	89
6.3. Software para la modelación de procesos y evaluación ambiental....	90
7. ANALISIS DE CICLO DE VIDA -ACV- VÍA RE-REFINACIÓN Y VALORACIÓN ENERGÉTICA DE ALU	91
7.1. Descripción del ciclo de vida del aceite lubricante usado -Caso de estudio-	92
7.1.1. Modelo de Ciclo de Vida Aceite lubricante Cuna-Usado (AL-CU)	94

7.1.2.	Modelo de Ciclo de Vida re-refinación puerta-puerta (RR-PP)	98
7.1.3.	Modelo de ciclo de vida de valorización energética puerta-tumba (VE-PT)	106
7.2.	Evaluación del análisis de Ciclo de vida -Caso de estudio-	112
7.2.1.	Definición del objetivo y el alcance del Análisis de ciclo de vida - caso de estudio-	112
7.2.2.	Análisis de inventario del Ciclo de Vida -IACV-	119
7.2.2.1.	Entradas y salidas para el modelo de re-refinación	125
7.2.2.2.	Entradas y salidas para el modelo de valorización energética .	131
7.3.	Evaluación de impactos ambientales	137
7.3.1.	Selección y evaluación de categorías de impacto.	138
a.	Análisis de contribuciones por etapas y consolidado de impactos ambientales	142
b.	Contribuciones para los modelos RR-PP y VE-PT	145
c.	Consolidado de impactos ambientales para los modelos RR-PP y VE-PT	146
d.	Análisis de ciclo de vida del aceite lubricante usado	149
e.	Consolidado de la Huella de Carbono	152
f.	Evaluación energética a partir de la Demanda energética acumulada	153
7.4.	Interpretación de resultados.....	156
a.	Resultados con respecto a la evaluación ambiental	157
b.	Resultados de la evaluación de demanda acumulada de energía	160
c.	Resultados de la sustitución de productos.....	161
d.	Resultados de la evaluación ambiental del modelo AL-CU	162
e.	Resultados de la evaluación ambiental del modelo RR-PP	162
f.	Resultados de la evaluación ambiental del modelo VE-PT.....	165
8.	CONCLUSIONES	167
9.	BIBLIOGRAFIA	172
10.	ANEXOS	176
	Anexo 1. Análisis de inventario entradas y salidas AL-CU.	176
	Anexo 2. Modelos construidos en el software Umberto	179
	Anexo 2.1. Modelo ALU-CU.....	179
	Anexo 2.2. Modelo VE-PT Combustión	179
	Anexo 2.2. Modelo VE-PT Créditos	180
	Anexo 2.2. Modelo RR-PP.....	180

Lista de figuras

Figura 1. Tipos de aceites y aplicaciones por sectores que lo consumen. Fuente: AftonChemical.com	26
Figura 2. Volumen total anual de aceite lubricante usado aprovechado y dispuesto por operadores “Avalador” FAU Vs. Total estimado generado País. Fuente: (Asociación Colombiana del Petróleo, 2019).....	28
Figura 3. Componentes de un aceite lubricante. Fuente: AftonChemical.com.	35
Figura 4. Tipos de aceites lubricantes según su composición. Fuente: (Delgado Mitrato, 2011, Hernandez, Hernandez, 2020).	37
Figura 5. Resumen conceptual del aceite lubricante usado visto como compuesto, desde la industria y el marco ambiental y normativo.....	68
Figura 6. Las fases de un ACV de acuerdo a ISO 14040.....	71
Figura 7. Proceso multifuncional con subdivisión de procesos unitario. (Hauschild, 2017).	72
Figura 8. Ciclo de vida del aceite lubricante usado desde la cuna al uso, con dos alternativas de tratamiento.	93
Figura 9. Preparación de bases lubricantes.	95
Figura 10. Procesos para la re-refinación por destilación de capa fina al interior de la planta de re-refinación. Fuente: Biochemical group, 2014	99
Figura 11. Proceso de tratamiento de ALU para formulación de combustibles industriales al interior de la planta de Valorización energética.	107
Figura 12. Sistema de producto del tratamiento de aceite lubricante usado, compuesto por la tecnología de re-refinación y valorización energética dentro del recuadro verde.	115
Figura 13. Información primaria y secundaria para los modelos de ACV analizados.	120
Figura 14. Diagrama de flujo de delimita las fronteras del sistema para el sistema de producto . Fuente: Construcción propia con datos de los procesos industriales analizados.	cxxiii
Figura 15. Evaluación de las categorías de impacto ambiental por flujos de referencia. de las opciones de tratamiento de aceites lubricantes usados RR-PP y VE-PT a partir de los valores caracterizados.	141
Figura 16. Análisis de contribuciones (%C) de las etapas del modelo RR-PP y VE-PT a cada una de las categorías de impacto.	146
Figura 17. Consolidado de categorías de impacto ambiental generados por el modelo RR-PP y VE-PT (A y B en gris). Impactos generados por combustión del modelo VE-PT (B en negro) e impactos evitados por sustitución (C y D en azul). Se presentan el consolidado de impactos ambientales netos por modelo en (abajo-gris). Todos los valores están normalizados.	148
Figura 18. Ciclo de vida gráfico del aceite lubricante usado compuesto por agregación de modelos. Modelo del ciclo de vida del aceite lubricante cuna-uso (AL-CU) y modelos del fin de la vida de ALU compuesto por re-refinación puerta-puerta (RR-PP) y valorización energética puerta-tumba (VE-PT).	151
Figura 19. Consolidado gráfico de la huella de carbono, como indicador de sostenibilidad de los tres modelos evaluados RR-PP, VE-PT y AL-CU.	152

Figura 20. Balance del indicador Demanda Acumulada de energía para os modelos AL-CU, RR-PP y VE-PT.....	155
Figura 21. Modelo Sankey para el ciclo de vida aceite lubricante cuna-uso.	179
Figura 22. Modelo Sankey para el fin de la vida del aceite lubricante usado por valorización energética, contabilizando combustión.....	179
Figura 23. Modelo Sankey para el fin de la vida del aceite lubricante usado por valorización energética, contabilizando sustitución.	180
Figura 24. Modelo Sankey para el fin de la vida del aceite lubricante usado por re-refinación.....	180

Lista de tablas

Tabla 1. Distribución del mercado de aceite lubricante usado por zonas geográficas.....	27
Tabla 2. Clasificación de las bases lubricantes.	34
Tabla 3. Composición típica promedio de un aceite lubricante de motor.	35
Tabla 4. Aplicaciones de las bases sintéticas	37
Tabla 5. Caracterización físico química de un aceite lubricante nuevo:	39
Tabla 6. Caracterización físico química de un aceite lubricante usado	39
Tabla 7. Impactos ambientales del aceite usado.....	50
Tabla 8. Indicadores y metas de la estrategia nacional de económica circular	54
Tabla 9. Indicador para Aceites lubricantes Usados	54
Tabla 10. Metas e indicadores de seguimiento en los cuales aportan la tecnología de re-refinación (RR) y la tecnología de valorización energética para el reciclaje de aceites lubricantes usados.	55
Tabla 11. Límites máximos de contaminantes para mezcla de aceites usados tratados para uso como combustibles establecidos en la Resolución 1446 de 2005.	61
Tabla 12. Estándares de emisión admisibles de contaminantes al aire para actividades industriales a condiciones de referencia (25 °C y 760 mm Hg) con oxígeno de referencia del 11%. Resolución 1309 de 2010. 2008.	62
Tabla 13. Niveles de Contaminantes Permitidos en los aceites usado por la EPA.	62
Tabla 14. Matriz normativa para los aceites lubricantes usados en Colombia	65
Tabla 15. Condiciones metodológicas particulares para el estudio de caso y el tratamiento desde el ACV.	74
Tabla 16. Parámetros de aceptación o rechazo de la materia prima que ingresa a proceso de re-refinación.....	100
Tabla 17. Especificaciones técnicas de las bases lubricantes:	102
Tabla 18. Especificaciones técnicas de los destilados primarios.	103
Tabla 19. Especificaciones Técnicas: Gasóleo liviano - livianos	104
Tabla 20. Relación de sustitución de subproductos de la re-refinación.....	105

Tabla 21. Características del combustóleo según la NTC 1549 de 1983.....	110
Tabla 22. Relación de sustitución de subproductos del proceso de valorización energética.....	111
Tabla 23. Funcionalidad específica de los sistemas evaluados	116
Tabla 24. Propiedades de los aceites lubricantes usados que son transformados mediante las tecnologías evaluadas.	116
Tabla 25. Definición y características de la unidad funcional para ambos procesos tecnológicos.	117
Tabla 26. Flujos de Referencia para los sistemas de re-refinación y valorización energética.....	118
Tabla 27. Resumen del alcance del estudio para cada una de las tecnologías. .	118
Tabla 28. Procesos usados de la base de datos de ecoinvent para los modelos en el Software Umberto.....	121
Tabla 29. Convenciones de las corrientes del diagrama de flujo que delimita las fronteras del sistema.	124
Tabla 30. Datos de entradas y salidas para la etapa de recolección de ALU, tecnología de re-refinación. extraídos del modelo de inventario en Software Umberto.....	125
Tabla 31. Datos de corrientes de entrada y salida para la etapa de proceso tecnológico de re-refinación.	126
Tabla 32. Datos de entrada y de salida para la etapa de entrega de producto de re-refinación. extraídos del modelo de inventario en Software Umberto	128
Tabla 33. Datos de entrada “negativos” para la etapa de sustitución de producto de re-refinación. extraídos del modelo de inventario en Software Umberto.	129
Tabla 34. Datos de salida “negativos” para la etapa de sustitución de producto de re-refinación. Datos extraídos del inventario del modelo en Software Umberto. .	130
Tabla 35. Datos de entradas y salidas para la etapa de recolección de ALU, tecnología de valorización energética, extraídos del modelo de inventario en Software Umberto.	131
Tabla 36. Datos de corrientes de entrada y salida para la etapa de proceso tecnológico preparación de combustibles extraídos del modelo de inventario Software Umberto.	132
Tabla 37. Datos de entrada y de salida para la etapa de entrega de producto de valorización energética, extraídos del modelo de inventario en Software Umberto.	134
Tabla 38. Datos de entrada y de salida para la etapa de sustitución de producto de valorización energética, extraídos del modelo de inventario en Software Umberto.	135
Tabla 39. Datos de entradas y salidas para la etapa de combustión de producto. Datos extraídos del inventario del modelo en Software Umberto.....	136
Tabla 40. Flujos de referencia para la evaluación ambiental.	138
Tabla 41. Evaluación de las categorías de impacto ambiental de los tres modelos analizados AL-CU, RR-PP y VE-PT. Se presentan valores caracterizados para los flujos de referencia	139

Tabla 42. Análisis de contribuciones por etapas de proceso de los modelos evaluados y consolidado de impactos generados e impactos evitados para las seis categorías.....	cxliii
Tabla 43. Evaluación del indicador Demanda Acumulada de Energía para los modelos AL-CU, RR-PP y VE-PT.....	153
Tabla 44. Créditos del reciclaje en la categoría de impacto Demanda acumulada de energía para los modelos AL-CU, RR-PP y VEPT.....	154
Tabla 45. Datos de entrada para el modelo AL.CU. Datos extraídos del inventario del modelo en Software Umberto.....	176
Tabla 46. Datos de entrada para el modelo AL.CU. Datos extraídos del inventario del modelo en Software Umberto.....	177

Introducción

Un aceite lubricante compatible con el medio ambiente, tienen en cuenta los posibles impactos durante su producción (Bartz 1998). En este sentido, siempre ha existido la necesidad de producir aceites más amigables con el medio ambiente, al igual que investigaciones en materia de reciclaje en las industrias de lubricantes. Estos nuevos enfoques en la gestión de lubricantes pueden ayudar en la reducción del impacto ambiental de los derivados del petróleo (European-Communities 2006). Por su parte, Daniels (1995) plantea que las necesidades de investigación del petróleo se enfocan principalmente en los residuos con el propósito de 1°. Reciclar y recuperar aceite lubricante usado que actualmente está siendo mal utilizado, 2° Reducir la pérdida de lubricantes derivados del petróleo y 3°. Desarrollar y fomentar infraestructura del reciclaje eficaz, que se basa en el ahorro de energía, la reducción de impactos ambientales y la economía competitiva. Dicho interés se ha visto reflejado en los reglamentos ambientales del sector petroquímico, los cuales tienen el objetivo de modificar procesos y reformular productos, principalmente los combustibles, a partir de la inversión de capital, que contribuya con la reducción de emisiones atmosféricas.

Un cambio reciente en la percepción de los residuos como recurso, se refleja en una nueva jerarquía en la cual la reutilización y el reciclaje son las opciones de tratamiento de más alta clasificación. Aunque hay relativamente pocas opciones a considerar con respecto al tratamiento de residuos (los tres principales son el reciclaje, tratamiento biológico para residuos orgánicos, incineración y vertederos), sus combinaciones para cada tipo de residuo (definido por la fuente de residuo) y fracción de residuo son numerosos, y de ahí se deriva la complejidad de los sistemas integrados de gestión de residuos (Hauschild, 2017). Por lo tanto, una prioridad para las operaciones en residuos es el desarrollo de tecnologías que permitan la reducción del agotamiento de los recursos naturales como: los combustibles fósiles, metales, nitrógeno, fósforo, entre otros, que aporten a cumplir con la legislación, pero también para hacer frente a problemas ambientales derivados de la gestión de residuos. Estas consideraciones han motivado cuestiones relacionadas con la

efectividad y el costo del tratamiento de los residuos, para lo cual las autoridades públicas han comenzado a diseñar sistemas de gestión que abordan de manera integral la generación de residuos y que se diferencian de acuerdo con la fuente de residuos o material de desecho.

Particularmente, los lubricantes usados son un tipo de residuo que reúne todas las características mencionadas anteriormente: es un residuo peligroso, altamente contaminante, con un gran potencial de aprovechamiento energético y de reutilización de materias primas para el sector de los derivados petroquímicos, estas características ofrecen grandes ventajas a los lubricantes usados de ingresar a cadenas de reciclaje para ser reutilizados de manera integral. Sin embargo, no se puede garantizar que la totalidad del aceite lubricante usado generado sea utilizado de una forma ambientalmente segura, y por ello la principal preocupación se centra en los contaminantes que este residuo pueda contener. Los esfuerzos de las autoridades se concentran en el control de la concentración de estos contaminantes, para mantenerla dentro de los límites que se consideran ambientalmente aceptable. Por lo tanto, para la protección de las personas y los equipos, además de evitar la emisión de contaminantes al ambiente, se debe siempre adelantar un procedimiento de adecuación del aceite lubricante usado para retirar contaminantes, agua, lodos y otras impurezas, antes de ser reutilizado (Soto Castaño et al., 2006).

En línea con lo anterior, la ambición de los legisladores es integrar la gestión de residuos en cadenas de reciclaje, donde las actividades de recuperación de desechos y materiales, permiten cerrar ciclos en el aprovechamiento de materiales. A la luz de estas preocupaciones medioambientales, las leyes de todo el mundo han intentado regular las actividades de gestión de residuos y promover más sistemas sostenibles para el manejo de residuos (por ejemplo, la Directiva 2008/98 / CE). Estas regulaciones pueden abordar problemas técnicos, como estándares de calidad para materiales reciclables o problemas de gestión, como la promoción del reciclaje y la reducción de relleno sanitario. (Hauschild, 2017). Es así que, en Colombia, los procesos de tratamiento y reutilización de los aceites usados se enmarcan en el espíritu de leyes aplicables al medio ambiente que promueven uso de nuevas tecnologías y alternativas de gestión para reducir los impactos, entre ellas numeral 2 del artículo 2° del Decreto número 3570 de 2011, y Artículo 2° de la Ley 1252 de 2008.

Por su parte, la actividad del reciclaje de aceites usados se ha venido consolidando en Colombia, principalmente con la llegada de la tecnología de re-refinación hace 15 años, la cual, en conjunto con la alternativa de valorización energética son las más utilizadas para tal fin y vienen aportando a las metas de gestión de estos residuos. En tal sentido, se hace necesario conocer los beneficios ambientales que el reciclaje de aceites lubricantes usados aporta al país, teniendo como marco de referencia las metas de crecimiento verde proyectadas para el periodo 2014-2018 que plantea entre otras metas de cumplimiento concretas, reducir las emisiones de GEI del sector de los Hidrocarburos. La cuantificación de estos beneficios ambientales a través de indicadores, podrán ser el punto de partida para medir la contribución de este proceso a la sostenibilidad de un recurso como el petróleo y la gestión adecuada de residuos petroquímicos, además determinar la contribución de la re-refinación a las metas del desarrollo y sostenibilidad integral del país.

Esta investigación tiene como objetivo principal identificar los beneficios e impactos ambientales potenciales durante el fin del ciclo de vida del aceite lubricante usado tratado por la vía de re-refinación y de valorización energética, que pueden alimentar indicadores de: 1) “contaminación evitada” producto de la adecuada disposición, regeneración y reintegración de un residuo al ciclo de derivados petroquímico; 2) “extracciones evitadas” como resultado de la reutilización de las materias primas del proceso de recuperación de las bases lubricantes. En tal sentido, los datos utilizados para la evaluación ambiental de los aceites lubricantes usados reciclados por estas dos vías tecnológicas, provienen de compañías que actualmente se dedican al procesamiento de aceites lubricantes usados, por lo cual los resultados aquí presentados deben tomarse únicamente como punto de partida para investigaciones o comprobaciones de mayor profundidad, ya que la variabilidad de composiciones de tales aceites, así como la variabilidad de la procedencia de los mismos, y las inadecuadas prácticas de separación en la fuente que aún existen en Colombia, no permite generar resultados absolutamente concluyentes.

1. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

En Colombia existen dos métodos principales para el aprovechamiento de los aceites lubricantes usados aprobados por la legislación colombiana. El primer método es la valorización o recuperación energética del aceite lubricante usado -tratado y sin tratar-, para el caso del aceite usado tratado, se permite el uso como combustible industrial en calderas y hornos, en los cuales los sistemas o equipos de alimentación de combustible deberán poseer mecanismos para su pulverización o atomización y control de alimentación de oxígeno, este método es conocido como valorización energética responsable. Por su parte, el aceite lubricante usado sin tratar, puede ser mezclado con otros combustibles, en una proporción menor o igual al 5%; para ser usado en hornos cementeros, metalúrgicos o en plantas de generación de energía que tengan sistemas de control de emisiones de material particulado de alta eficiencia (mayor al 95%). El segundo método y más reciente en ser utilizado, es el reciclaje de aceites lubricantes usados a través del proceso de re-refinación, con el cual se recuperan principalmente bases lubricantes para la formulación de aceites lubricantes nuevos y otros usos en el sector petroquímico. Estas dos tecnologías en conjunto son las principales opciones para la disposición y aprovechamiento de los aceites usados, sin embargo, hasta el momento en Colombia no se tiene claramente identificado el desempeño ambiental que alcanza el Ciclo de Vida de un kilogramo de aceite mineral regenerado por la tecnología de re-refinación (catalogada como ambientalmente sostenible), lo cual genera la necesidad de contar con esta misma información para un galón de aceite usado reciclado por la vía de valorización energética como sistema de referencia, y de esta manera conocer las contribución ambiental de la tecnología de re-refinación a la recuperación del aceite lubricante usado.

1.1. Objetivo General

Determinar los beneficios ambientales, (impactos potenciales e impactos evitados) asociados al proceso de recuperación de aceites lubricantes usados por re-refinación, que aportan a la sostenibilidad ambiental de un recurso no renovable.

1.2. Objetivos Específicos

- Delimitar el ciclo de vida del aceite lubricante usado recuperado a partir del balance de entradas y salidas del proceso de re-refinación, y determinar los impactos generados al medio ambiente.
- Identificar los procesos de disposición final del aceite lubricante usado autorizado por la legislación colombiana y sus beneficios e impactos ambientales asociados.
- Determinar las principales categorías de impacto global que son afectadas por el ciclo de vida del aceite lubricante usado.
- Establecer los beneficios ambientales (impacto ambiental potencial e impactos evitados) de la regeneración del aceite lubricante usado, de acuerdo a las categorías de impacto global identificadas. (ACV).
- Determinar el aporte del proceso de regeneración de aceite lubricante usado a la sostenibilidad de un recurso natural no renovable y a la reducción de un residuo contaminante en el país.

1.3. Pregunta problema

¿Cuáles son los **beneficios ambientales** que se derivan de la recuperación de aceites lubricantes usados **por re-refinación** y sus aportes a la **sostenibilidad ambiental** en Colombia?

1.4. Hipótesis

Esta tesis propone comparar dos rutas de aprovechamiento de aceites lubricantes usados y plantea como hipótesis demostrar que el proceso de aprovechamiento y recuperación de los aceites lubricantes usados por la vía de re-refinación ofrece mayores beneficios ambientales y por lo tanto mayores aportes a la sostenibilidad ambiental en Colombia que las vías de aprovechamiento de los aceites usados por la vía de valorización energética.

2. JUSTIFICACION

Alrededor del 13% al 32% de aceite lubricante usado en todo el mundo está dispuesto en el medio ambiente sin tratamiento, a pesar de la existencia de regulaciones internacionales de eliminación de desechos y desarrollo de tecnologías para el tratamiento y reciclaje de estos aceites. Por lo tanto, las preocupaciones ambientales internacionales, al igual que la contaminación y las regulaciones de la contaminación han aumentado en lo relacionado con la formulación de combustibles y lubricantes (Majano, 2010). En línea con lo anterior, las preocupaciones de los generadores de aceites lubricantes usados y de los usuarios directos de los productos provenientes de los sistemas de reciclaje, se extienden a la necesidad de conocer mejor el desempeño ambiental de las tecnologías de disposición de aceites que usan, así como cuantificar los beneficios económicos y ambientales que estas tecnologías les ofrecen, y por ello, el impulso gubernamental para la implementación de tecnologías de punta relacionadas con el aprovechamiento de aceites usados, aporta a la construcción de sociedades del reciclaje desde los sectores industriales y son una manera de contribuir con la sostenibilidad de un recurso natural no renovable como es el caso de los aceites lubricantes usados derivados de hidrocarburos. Por lo tanto, la realización de este análisis se justifica en la medida que los grupos de interés relacionados con los aceites lubricantes usados y sus tecnologías de tratamiento, pueden tener información de referencia sobre la evaluación y comparación de los impactos y beneficios ambientales de la tecnología de re-refinación y valorización energética evaluadas, en un escenario de evaluación del ciclo de vida de los aceites lubricantes usados.

3. ANTECEDENTES

En 1995 en Estados Unidos se adelantaron investigaciones para medir las oportunidades para incrementar la recuperación y reciclaje de aceites usados, este estudio afirma que “el aceite lubricante usado representa un recurso energético importante que, si se gestiona adecuadamente y se reutiliza, reduciría la dependencia estadounidense de combustibles importados”. Esta evaluación reveló la necesidad de la investigación en los residuos del Petróleo. (Daniels, 1995). Por su parte, Shaaban y Salavani en 1996, investigaron las recuperaciones de calor de petróleo, aceite y lubricantes usados (POL) e indicaron que el POL usado podría quemarse eficientemente en varios tipos de calderas y quemadores. Esta caldera de la planta de calefacción local alimentada por POL usado proporcionó un gran beneficio en términos del ahorro de costos para el transporte y la eliminación de dicho POL usado y el combustible requerido para la caldera. Sin embargo, algunos problemas de combustión derivados de la combustión de POL, p. las incrustaciones de los quemadores, la mayor emisión de partículas y los residuos de cenizas deben ser tenidos en cuenta (Kanokkantapong et al., 2009)

En el año 2001 en Japón se realizó un análisis de los beneficios ambientales de la re-refinación del aceite usado con respecto al consumo de energía y emisiones de CO₂, NO_x y SO₂, en comparación con el uso de petróleo virgen. Se examinaron los inventarios comparativos del ciclo de vida y se evaluaron los impactos ambientales para los siguientes dos casos: (1) re-refinación del aceite usado para ser quemado, y (2) extraer petróleo crudo, refinarlo y quemar el petróleo pesado resultante. Los resultados encontraron dependencia de las fuentes de combustible utilizadas para generar electricidad, así mismo el uso del aceite virgen aumenta significativamente el consumo de recursos energéticos naturales. Emisiones por la combustión explica en gran medida las emisiones del ciclo de vida de aceite virgen, debido a la gran cantidad del volumen de emisiones por unidad cuando se quema como combustible y cuando se incineran los residuos. Los límites del sistema comparativo para reciclaje, que se utilizó en este estudio muestran beneficios ambientales en la reutilización, el reciclaje y la conversión de residuos en energía.

En Europa durante el 2005 se realizó un estudio llamado “Evaluación ecológica y energética de la re-refinación de aceites residuales para la obtención de bases lubricantes: sustitución

primaria de bases lubricantes producidas incluidos los compuestos sintéticos y semi-sintéticos”, que demostró mediante una evaluación de ciclo de vida (ACV), como la re-refinación está justificada por el objetivo de la preservación de la fuente. Adicionalmente, comparó los efectos medioambientales beneficiosos de la regeneración del aceite lubricante usado en comparación con el refinado del aceite base virgen. Adicionalmente este estudio afirmó, que los resultados de los estudios de ACV publicados en el pasado y que se centran en las prácticas de la industria re-refinación y cualidades lubricantes de la década de 1990 ya no son válidos, debido al uso de nuevas tecnologías de regeneración con un mejor rendimiento; y nueva reglamentación que ha mejorado la calidad de los lubricantes, mediante el uso de aditivos sintéticos que mejoraran la calidad y aumentan la eficiencia energética. (Fehrenbach, 2005). Durante el año 2006, se realizó una revisión del destino de los aceites lubricantes en el Reino Unido como parte de un reporte al “Department of Environment Food and Rural Affairs”, en el cual se establecen los resultados de un programa de trabajo para revisar y actualizar las estimaciones de las emisiones de gases invernadero por el uso de aceite lubricante en el Reino Unido. Este estudio además revisó las tasas de recuperación potenciales y eliminación de aceites usados, e indicaron que el 65% del aceite lubricante para motores era potencialmente recuperables; es decir el 35% se perdió debido a la combustión o de otras pérdidas. Como resultado de este trabajo, en el 2004 se realizaron cambios en las estimaciones (inventario) de las emisiones de Gases de Efecto Invernadero -GEI- de Reino Unido (2006 Informe de Inventario Nacional) por el uso de aceite lubricante (Norris, Stewart, & Passant, 2006).

Un análisis sobre los impactos evitados y costo de oportunidad con enfoque de mercado voluntario de carbono se realizó en la Reserva de la Biosfera Yasuni, Ecuador en el 2009. Dentro de sus resultados se halló gracias a las leyes económicas de oferta y demanda, parece que un compromiso de dejar combustibles fósiles bajo la tierra puede tener aproximadamente igual valor en términos climatológicos que un esfuerzo equivalente para reducir el consumo de los mismos. Sin embargo, es importante reconocer que la reducción en emisiones mundiales no es igual a la cantidad de carbono almacenado en el petróleo. Parece ser aproximadamente la mitad, aunque este cálculo tendría que ser ajustado después de un análisis más profundo de las elasticidades precio de la oferta y de la demanda del petróleo. (*Estudios sobre el Mercado Voluntario de Carbono , y Mecanismos REDD de la Iniciativa Yasuní ITT*, n.d.). Por su parte, en el año 2009 en España se realizó un estudio de investigación para posgrado denominado “Desde el Aceite Lubricante Usado

hasta su Puesta en el Mercado tras Su Regeneración”, este estudio levantó un inventario sobre los procesos de recuperación del aceite lubricante usado en España y caracterizó de manera general las bases lubricantes luego de la recuperación, además valoró de forma cualitativa las opciones relacionadas en los aspectos ambientales de la disposición. Como conclusión del estudio se obtuvo que se requieren 100 litros de petróleo para producir 2 litros de aceite y a partir de 3 litros de aceite lubricante usado se recuperan 2 litros, además que se deben mantener las mismas cantidades de aceite en el ambiente por su peligrosidad y permanencia y aunque la mejor opción es el tratamiento en planta, no genera cero impactos. (Moya, 2009).

En octubre de 2011, In Jinqiao EIP, Shanghai se realizó la evaluación de ciclo de vida de la recuperación de energía proveniente de la simbiosis industrial compuesta por lodos secos y aceite usado re-refinado, en un parque ecoindustrial. Esta simbiosis puede ser una sustitución parcial del combustible fósil. Con el fin de evaluar el desempeño ambiental de esta simbiosis industrial, se utilizó la evaluación del ciclo de vida (ACV) y se establecieron diferentes escenarios de reducción de residuos, consumo de energía y costos de operación. (Liu et al., 2011). En el 2012 el proceso de re-refinación llega a Colombia y se registra a través de un artículo de revista llamado “Re-refinación de aceites usados en Colombia: primer paso hacia la sostenibilidad de un recurso no renovable” que menciona de manera general las ventajas de la nueva tecnología que llega a Colombia. (Echeverry, 2012).

En el 2013, en Estados Unidos se realizó un estudio de Inventario del ciclo de vida comparativo (LCI) de gas de efecto invernadero (GEI) de la recuperación mejorada de petróleo (EOR) métodos que utilizan diferentes fuentes de CO₂. Este estudio utiliza un inventario de ciclo de vida del proceso (LCI) para comparar las emisiones de gases de efecto invernadero del ciclo de vida (GEI) de la recuperación mejorada de petróleo (EOR) operaciones utilizando diferentes fuentes de CO₂ y los métodos EOR distintos del CO₂. Todas las técnicas EOR se compararon con el caso base de la fuente natural de CO₂-EOR, que tenía las emisiones netas de 0.52 ± 0.03 toneladas métricas de CO₂-e por barril de petróleo recuperado (t / bbl) ($85,1 \pm 4.9$ gCO₂-e / MJ de aceite (g / MJ)). (Hussain, Dzombak, Jaramillo, & Lowry, 2013). Por otra parte, en el 2014 se realizó en la Universidad Nacional de Colombia Sede Medellín, un estudio llamado “Metodología de gestión ambiental para aceite dieléctrico de transformador: “Análisis del Ciclo de Vida (ACV)”. En este estudio se aplicó la metodología Análisis del Ciclo de Vida (ACV) a un aceite dieléctrico mineral de

transformador, con el fin de determinar los impactos ambientales en el ciclo de vida del producto. La unidad funcional definida es 1 k de aceite producido. Los mayores impactos ambientales encontrados dentro del ciclo de vida del aceite dieléctrico, se presentan en las categorías de impacto como cambio climático, agotamiento de ecosistemas acuáticos marinos y toxicidad humana. (Castaño Orozco, 2014).

En el 2015, se tiene reporte de varios estudios. En Ghana se realizó una investigación sobre Re-refinación y reciclaje de aceite lubricante usado como una opción para las divisas y la conservación de los recursos naturales en Ghana. En Estados Unidos se publicó recientemente un artículo sobre la calidad del aceite base Re-refinado, y un estudio para determinar la Política Óptima de Reciclaje de Aceite Lubricante Usado: el caso de la Política de Gestión de Aceite lubricante usado de California. Este estudio aporta un marco conceptual para la gestión de los aceites usados que abarca un impuesto (depósito) en subsidios petroleros y sectoriales manufacturados (restituciones) sobre los productores que compran el aceite reciclado como insumo en la producción (Hamilton, 2015). En 2017, se publicó un artículo llamado "Recycling of used lubricating oil: Evaluation of environmental and energy performance by LCA" en este trabajo se realizó una evaluación ambiental y energética del proceso de Re-refinación para España, enfocado en la recuperación de bases lubricantes para el reuso. En la evaluación de ciclo vida se evaluaron principales las categorías de impacto el potencial de calentamiento global, la demanda acumulada de energía, la acidificación y toxicidad. Los parámetros de generación de CO₂ y consumo de energía de la re-refinación para la base lubricante recuperada fueron comparados con el aceite proveniente de refinería, encontrando que los impactos evaluados pueden ser reducidos en el proceso de reuso del aceite usado. Así mismo, se encontró que el método de asignación por masa y criterios económicos resultó claramente indicado para la evaluación de impactos ambientales para el proceso de recuperación de aceites lubricantes usados, mostrando que esta opción es ambientalmente más amigable que el proceso convencional de refinería de petróleo.

4. MARCO TEÓRICO ACEITES LUBRICANTES

4.1. Generalidades Aceites Lubricantes Usados

La demanda mundial de aceite lubricante es de aproximadamente 44 millones de toneladas al año, con un crecimiento industrial y automotor a largo plazo del 6%. (Ayala, Pancho, Jimenez, & Zambrano, 2018). Así mismo, aproximadamente el 80% de toda la energía primaria en el mundo se deriva de combustibles fósiles y el petróleo representa el 32,8%, el carbón representa el 27,2% y gas natural representa el 20,9% (IEA, 2011). Biomasa y residuos combustibles (10,2%), la energía nuclear (5,8%) y las represas hidroeléctricas (2,3%) son los mayores contribuyentes al sistema energético global después de la energía fósil, pero representan sólo una pequeña parte del suministro de energía primaria (IEA, 2011). Solo el 0,8% de la energía primaria mundial se deriva de fuentes de energía alternativas. (Höök & Xu, 2013).

En Colombia por su parte, cada año, aproximadamente 50 millones de galones de lubricantes son consumidos, una parte es producida por ECOPETROL y la otra es importada de países como Venezuela y Estados Unidos (MADS, 2014). Según un modelo de la Organización Europea de Compañías Petroleras para el Medio Ambiente, la Salud y la Seguridad (Concawe), de la cantidad de aceite lubricante producido en Colombia entre el 25-35% se recupera para algún tipo de procesamiento como aceite usado. Lo anterior indica que la generación de aceite lubricante usado para recuperación en Colombia está alrededor de 12 a 16 millones de galones al año. (Rosenberg et Associés Ltda, 1999), lo que implica un remanente de 34 a 38 millones de galones al año de los que no se tiene claro registro de su destino, con potenciales efectos ambientales negativos aún no cuantificados.

En Colombia, para la fabricación de los aceites lubricantes, únicamente la refinería de Ecopetrol del Complejo Industrial de Barrancabermeja, produce bases lubricantes, con un aporte al consumo nacional del 25% al 40%, así que el resto del consumo nacional de bases lubricantes, debe ser importado. Por lo tanto, el principal mercado para las bases lubricantes recicladas a partir de aceite lubricante usado, está constituido por las empresas

que formulan aceites lubricantes nuevos para automotores o la industria, y en este mercado el primer segmento de consumo de aceite lubricante son los automotores, que corresponde a un volumen del 70% del total de los aceites que se producen.

El segundo segmento de mercado en importancia es el de maquinado de metales, en este caso los lubricantes se utilizan en la maquinaria de las industrias aumentando la vida útil de la herramienta, mejorando el acabado de las piezas maquinadas e incrementando su productividad. (Gómez, García, Hernández, & Ramírez, 2007). Los aceites lubricantes que abastecen las necesidades del sector industrial se utilizan principalmente como aceites de proceso, de turbinas, hidráulicos, de corte, de dieléctricos para transformadores eléctricos, solubles, de temple o blancos, así como los lubricantes que abastecen el sector automotor, como aceites para motores a gasolina, para motores diésel, transmisión y de dos tiempos (MADS, 2014). El uso de los aceites lubricantes incluye principalmente aplicaciones para el sector industrial, automotriz, aviación y marino, en los cuales las formulaciones son diferentes en la relación base lubricante (aceite base) y aditivos como puede verse en la Figura 1. Por su parte, la industria del agro utiliza productos formulados en base a aceite, así mismo, la industria del petróleo en sus tratamientos de aguas de formación y en la perforación de sus pozos; la minería en el proceso de producción y desarrollo, las empresas de tintas y pinturas, las empresas en general en el tratamiento de sus efluentes utilizan productos químicos en base a aceites. Es un segmento de mercado muy diversificado y de gran potencial (Gómez et al., 2007).



Figura 1. Tipos de aceites y aplicaciones por sectores que lo consumen. Fuente: AftonChemical.com

En Colombia, el 95% de los aceites lubricantes es producido por empresas multinacionales afiliadas a la Asociación Colombiana del Petróleo –ACP¹-. El 5% restante corresponde a producción de otros productores nacionales que no reportan a ninguna entidad, ni tienen alguna agrupación que les agrupe. Del 95% generado por las multinacionales, se ha establecido que el 13% es consumido por el sector industrial, el 19% es aceite de proceso y el 68% es aceite para uso automotor de acuerdo al Informe Estadístico Petrolero del año 2013. Por su parte, el panorama del consumo nacional, se presenta en la siguiente Tabla 1.

Tabla 1. Distribución del mercado de aceite lubricante usado por zonas geográficas.

Zona Geográfica	Volumen (millones de galones)	Porcentaje (%)
Bogotá	3,63 - 5,08	29%
Cundinamarca	0,65 - 0,91	5%
Cali	1,21 - 1,69	10%
Resto Valle del Cauca y Nariño	0,69 - 0,96	5%
Medellín	1,4 - 1,96	11%
Resto Antioquia y Viejo Caldas	0,69 - 0,97	5%
Barranquilla	1,02 - 1,42	8%
Resto Costa Caribe	1,25 - 1,76	10%
Bucaramanga	0,49 - 0,68	4%
Resto Santanderes y Cesar	0,47 - 0,65	4%
Resto del País	1,2 - 1,4	9%

Fuente: (Rosenberg et Associés Ltda, 1999).

4.2. Gestión de los aceites lubricantes usados

La demanda creciente de petróleo en el mundo afecta directamente la economía de las empresas dedicadas a su procesamiento. Las refinerías de petróleo no escapan de este tema, ya que en ellas generalmente se obtiene la totalidad de la energía necesaria para los distintos procesos quemando parte de los hidrocarburos procesados, ya sea como gas, fuel oil, asfalto, etc. (Ángel Garay, Graciela López, Viviana Vila, 2010). En este sentido, durante los últimos años, la valorización energética de residuos de alto poder calorífico –como los aceites usados- ha evolucionado fuertemente en algunos países europeos. Especialmente

¹ Asociación Colombiana del Petróleo

en los Países Bajos, Alemania y Francia, donde los combustibles secundarios constituyen una proporción alta y creciente. El tipo de residuo utilizado es principalmente resultado de factores económicos. Mientras tanto, algunas cementeras individuales han alcanzado el 100% de sustitución del combustible primario. (Fehrenbach, 2005)

En Colombia, según el último informe del Fondo de los Aceites Usados, para el año 2019 el país aprovechó un volumen total de 17,3 millones de galones/año con operadores “avalados” por el FAU. Al comparar los volúmenes de aceite usado aprovechado y dispuesto correctamente por operadores avalados por el FAU a través de los años y el volumen total de aceite usado generado en el país, se encuentra que se ha venido incrementando cada año el porcentaje de recolección y aprovechamiento del aceite usado con base en los planes de manejo de aceite usado que desarrollan sus afiliados con los operadores, por ejemplo para el año 2018 se recuperaron 16,8 millones de galones y para el año 2019 se recuperaron 17,3 millones de galones/año aproximadamente. Ver Figura 2.

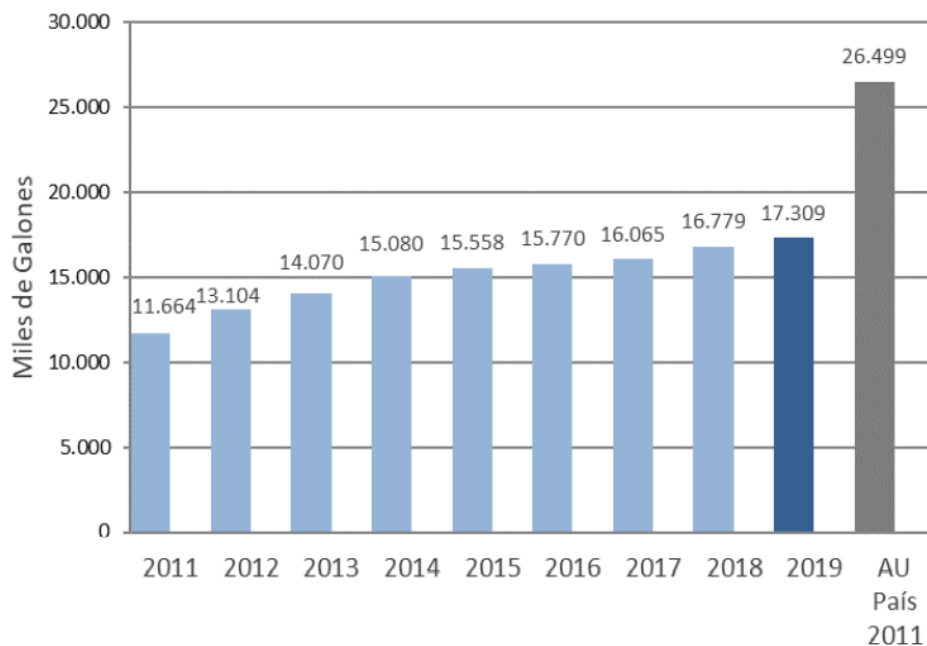


Figura 2. Volumen total anual de aceite lubricante usado aprovechado y dispuesto por operadores “Avalador” FAU Vs. Total estimado generado País. Fuente: (Asociación Colombiana del Petróleo, 2019).

En el mismo informe (ACP, 2019), el FAU presenta los principales métodos de aprovechamiento de los ALU en el país. El primer método es la valorización energética (Recuperación energética responsable), que se realiza mediante la utilización del Aceite

Lubricante Usado Tratado como combustible alternativo industrial, de acuerdo a lo establecido en la Resolución 1446 del MAVDT 2005; y la valorización energética del aceite lubricante usado sin tratamiento en co-procesamiento en plantas de fabricación de Cemento. El segundo método es la obtención de bases lubricantes por re-refinación para la formulación de aceites lubricantes nuevos, de acuerdo a lo establecido en la NTC 5995 de 2013. A pesar de que se realiza aprovechamiento a una parte de los aceites lubricantes usados generados, en el país existen reportes sobre falsificación de aceites lubricantes, por ejemplo, para el año 2011 alrededor de ocho y diez millones de galones al año eran lubricantes falsos (Correa & Serna, 2020).

4.2.1. Tendencias en el mercado de los lubricantes

Una de las tendencias en el mercado de lubricantes es el uso de nuevas formulaciones en las que se utilizan las mejores bases posibles y tecnología de aditivos con beneficios medioambientales. Desde el punto de vista de impacto ambiental una de las emisiones más importantes que se deben minimizar es la de CO₂ (Terradillos, 2020).

El reto medioambiental es uno de los principales campos de crecimiento para el mercado de lubricantes, que está dando lugar a múltiples vías de investigación. Entre ellas, la reducción del uso de nitrato sódico como inhibidor de corrosión, la eliminación del uso de metales pesados en las formulaciones, el uso racionalizado de biocidas o la reducción del uso de lubricantes miscibles en agua (Terradillos, 2020).

En este campo, además el mercado está explorando la utilización de aceites con base de origen vegetal o sintética, biodegradables y de bajo impacto, frente a la formulación de aceites minerales medioambientalmente más negativos. Por otro lado, se está investigando la reducción del nivel de aromáticos, por su relación con el cáncer de piel y la utilización de aditivos que den lugar a bajos valores de demanda de oxígeno para su degradación (Terradillos, 2020).

En el caso del Fuel Oil como subproducto de los aceites usados, su mercado es más transparente aún. Su precio absolutamente conocido, su calidad se evalúa casi a simple vista (color, olor, viscosidad) y pequeñas variaciones de precio modifican sustancialmente

la decisión de compra. En este caso, también las variaciones de precios están ligadas a volúmenes y compromisos de entrega. Pero el principal efecto sobre los precios de este producto lo da la estacionalidad. Esto se debe a que es ante todo un combustible para industrias y es el principal sustituto del gas. (Gomez, Garcia, Hernandez, & Ramirez, 2007).

A nivel internacional, las industrias que utilizan los aceites bases como parte de su proceso productivo, con seguridad mostrarán interés en la re-refinación. La razón de este interés radica en una mejora de su posición competitiva al contar con un insumo sustitutivo (aceite base de re-refinación) que disminuye el poder de negociación de las refinerías tradicionales. Visto de manera estricta, el aceite base de re-refinación no es un producto sustituto al aceite base tradicional, sino que se trata del mismo producto, pero obtenido a partir de otra vía, es decir, obtenido a partir del aceite usado en lugar del petróleo crudo. (Gomez, Garcia, Hernandez, & Ramirez, 2007). Es decir, que la actividad de re-refinación de aceites usados minerales constituye un beneficio completo, los antecedentes de la actividad a nivel mundial son exitosos, tanto desde un punto de vista financiero como desde su aporte a la solución ambiental. (Gomez, Garcia, Hernandez, & Ramirez, 2007).

4.2.2. Participación de los ALU en la canasta energética nacional

Del balance energético colombiano publicado en el año 2019, la UPME reporta que el petróleo aporta el 43% de la oferta de energía primaria² del país (1.884 PJ). Dentro de los derivados energéticos del petróleo provenientes de la energía secundaria³, el Fuel oil representa el 3% del total de los 899 PJ generados de este segmento. De manera complementaria, del consumo final de energía en Colombia para el año 2017, el sector energético industrial representó el 24% con 311 PJ, de los cuales el Fuel oil suministró el 0.2% a este sector. El suministro energético del país proveniente de residuos es aún marginal, y representa el 0,1% del consumo energético industrial (Upme, 2019).

Si bien en el párrafo anterior se hace alusión a la participación del Fuel Oil producido a partir de crudo de petróleo, es relevante considerar que el Fuel Oil también puede ser producido a partir de aceite lubricante usado, y de esta manera participar en la canasta energética

² La energía primaria consiste de combustibles no convertidos u originales.

³ La energía secundaria incluye recursos que han sido convertidos o almacenados.

nacional como un combustible sustituto o energético para el sector industrial. Sin embargo, hasta ahora, los aceites usados no ocupan un papel importante en la canasta energética nacional como fuente energética o de electricidad, y esto se debe a que la función principal de la incineración de ALU es por ley realizar un tratamiento adecuado para los residuos de lubricantes, más que realizar el aprovechamiento energético de estos, es decir, que hace parte de una respuesta legislativa para resolver un problema de disposición, y no corresponde a esquemas de sostenibilidad profundos de la sociedad.

4.3. Los aceites lubricantes usados y su origen

Bajo la denominación de Aceites de Desecho o Usados se encuentran los aceites lubricantes, de motor, de transmisión o hidráulicos con base mineral o sintética, que por efectos de su utilización se hayan vuelto inadecuados para el uso asignado inicialmente. (Resolución 415 del 13 de marzo de 1998). El aceite lubricante es una mezcla muy compleja que proviene de la contaminación del lubricante con sustancias diversas, como son: agua; partículas metálicas generadas por el desgaste de las piezas sujetas al movimiento y la fricción; compuestos organometálicos –como el plomo– procedentes de las gasolinas; ácidos orgánicos o inorgánicos producidos por la oxidación y provenientes del azufre de los combustibles; compuestos de azufre; restos de aditivos como fenoles en compuestos de zinc, cloro y fósforo; hidrocarburos polinucleares aromáticos (PNA), también llamados HAPS y algunos de sus derivados alquílicos (Muñoz Ciro, Montoya Escobar, & Muñoz Rivera, 2019).

4.3.1. Origen de un aceite lubricante usado

Los aceites lubricantes usados son el residual de los aceites lubricantes fabricados a partir de petróleo crudo que constituyen el producto original de primer ciclo. Los aceites lubricantes son uno de los derivados de la familia de hidrocarburos, provenientes de la parte más inferior de la torre de fraccionamiento, y elaborado a partir de una base mineral o sintética a la cual se añade un paquete de aditivos (1-25%). Se usan principalmente para lubricar motores de automóviles e industrias. La base lubricante de origen fósil es el principal constituyente del aceite lubricante formulado, la cual proviene de la extracción y

refinación primaria del petróleo en derivados petroquímicos, este proceso es seguido por transporte hasta el punto de fabricación / formulación en aceites lubricantes de diferentes denominaciones.

4.3.2. Lubricantes según su origen y composición

Los lubricantes son materiales puestos en medio de partes en movimiento con el propósito de brindar enfriamiento (transferencia de calor), reducir la fricción, limpiar los componentes, sellar el espacio entre los componentes, aislar contaminantes y mejorar la eficiencia de operación. Los lubricantes desempeñan también la función de "selladores" ya que todas las superficies metálicas son irregulares (Reliabilityweb). Los aceites lubricantes están compuestos principalmente por un 75% de Bases (Base Mineral o Base Sintética) y un 25% de aditivos. El proceso de fabricación de un lubricante es relativamente sencillo. Consiste en mezclar los aceites base y los aditivos en un reactor o mezclador aplicando calor y agitando hasta alcanzar la adecuada homogeneidad de la mezcla sin que tenga lugar reacción química alguna (Tejedor, 1999).

Una gran variedad de diferentes composiciones se conoce como "lubricantes", actualmente, 5.000 a 10.000 diferentes formulaciones son usadas para satisfacer cerca del 90% de las diferentes aplicaciones lubricantes. La función más importante de los lubricantes es la reducción de la fricción y el desgaste. Además de aplicaciones importantes en motores de combustión interna, cajas de cambios industriales y de vehículos, compresores, turbinas o sistemas hidráulicos, existe una gran cantidad de otras aplicaciones que requieren principalmente lubricantes diseñados específicamente. Un lubricante además de ser un agente antifricción, actúa como sellante, refrigerante, antioxidante y detergente. Los lubricantes de última generación permiten ahorros de combustible y, por tanto, reducen las emisiones de gases perjudiciales para el medio ambiente (Tejedor, 1999).

La base lubricante

La principal aplicación de las bases lubricantes se presenta en la formación de aceites lubricantes, tanto para uso automotor como para uso industrial, para esto las bases

parafínicas son preferidas donde se requiere un índice de viscosidad alto, mientras que las nafténicas se usan preferiblemente cuando se necesita lubricación a baja temperatura y una mejor fluidez (Gil, 2004). Una base lubricante que proveniente directamente del proceso de destilación primaria del crudo se denomina grupo I y representa alrededor del 70% de las bases para la fabricación de los aceites lubricantes, estas bases lubricantes se obtienen a partir del proceso de hidroterminado de crudo de petróleo se pueden clasificar según su procedencia en:

- Bases lubricantes parafínicas: Son estables a altas temperaturas, pero a bajas temperaturas no presentan un buen funcionamiento debido al alto contenido de parafinas. Son preferibles para la elaboración de gas oil, kerosene y fuel oil. Son las más empleadas en la fabricación de aceites lubricantes de tipo industrial y automotor por sus excelentes propiedades; el problema es que son muy escasas y son difíciles de obtener (Gil, 2004).
- Bases lubricantes nafténicas: Son poco estables a altas temperaturas, tienen poca parafina por lo que no forman ceras a bajas temperaturas y permanece en estado líquido. Tienen bajo índice de viscosidad, alto poder disolvente, bajo punto de fluidez y alta volatilidad. Se usan en la fabricación de aceites minerales blancos y de transformadores, son ideales en la formulación de aceites para maquinado de metales (Gil, 2004).
- Bases lubricantes Aromáticas: Presentan una tendencia a la formación de gomas a altas temperaturas. No son utilizadas en la fabricación de aceites lubricantes ya que no poseen características que ameriten su uso (Gil, 2004).

Adicionalmente, las bases lubricantes que proviene de un proceso de síntesis petroquímica se denomina Grupo II o III, de estos grupos proviene un 30% de las bases lubricantes. “El Instituto Americano del Petróleo (API, por sus siglas en inglés) ha clasificado los aceites base en cinco categorías (API 1509, Apéndice E). Los primeros tres grupos provienen de la refinación del petróleo. Los aceites base del Grupo IV son totalmente sintéticos (Polialfaolefinas) y los aceites del Grupo V son todos los aceites que no están incluidos en los Grupos I al IV. Ver Tabla 2.

Tabla 2. Clasificación de las bases lubricantes.

GRUPO	AZUFRE (% MASA)		SATURADOS (% MASA)	INDICE DE VISCOSIDAD (IV)
I	> 0,03	Y/o	< 90	80 <IV<120
II	0,03 MÁX.	Y	90 mín.	80 <IV<120
III	0,03 MÁX.	Y	90 mín.	120 mín.
IV	Polialfaolefinas			
V	Todas las bases lubricantes no incluidas en los grupos I a IV			

Fuente: (NTC 1849 , 2005)

Los aditivos

Los aditivos son sustancias químicas que se añaden a los aceites lubricantes para proporcionarles o incrementarles propiedades, o para suprimir o reducir otras que le son perjudiciales. Los aditivos lubricantes constituyen hoy una fracción importante de un aceite totalmente formulado y son necesarios para cumplir con estrictos requisitos de los motores modernos, mejorando las propiedades lubricantes de los aceites lubricantes, así como alargar y estabilizar el rango de operatividad en condiciones severas de envejecimiento y temperaturas (Rudnick, 2009). La optima formulación de los lubricantes en la adición de aditivos asegura el buen desempeño de los aceites., y por eso entre las características más importantes de los aditivos están que disminuyen la velocidad a la cual ocurren ciertas reacciones, como la oxidación; protegen la superficie lubricada de la agresión de ciertos contaminantes; mejoran las propiedades físico- químicas del lubricante y proporcionalmente otras nuevas. Los principales aditivos usados son: mejoradores de índice de viscosidad, depresores de punto de fluidez, inhibidores de oxidación, inhibidores de herrumbre, antiespumantes y antidesgastantes.

Las principales categorías de aditivos para los aceites lubricantes de motor son detergentes, dispersantes, modificadores de viscosidad, antioxidantes y anti desgaste (Raimondi et al., 2012). Ver Tabla 3 en la cual se presentan la composición promedio de un aceite lubricante de acuerdo a las propiedades de los aditivos.

Tabla 3. Composición típica promedio de un aceite lubricante de motor.

Componente	Porcentaje (%)
Aceite Base (mineral/sintética)	80
Detergentes	2
Dispersantes	6
Modificadores de viscosidad (OCP-olefins copolymers)	9
Antioxidantes (ZDDP-zinc dialkyldithiophosphates/phenols)	1
Agentes antidesgaste (ZDDP-zinc dialkyldithiophosphates)	2

Fuente: (Raimondi et al., 2012)

A continuación, en la figura 3 se presenta gráficamente la composición promedio de un aceite lubricante en la cual los aditivos están ocupan hasta un 25% del aceite lubricante, y el resto de la composición corresponde a los aceites básicos o base lubricante que puede ocupar hasta un 99% según el caso.

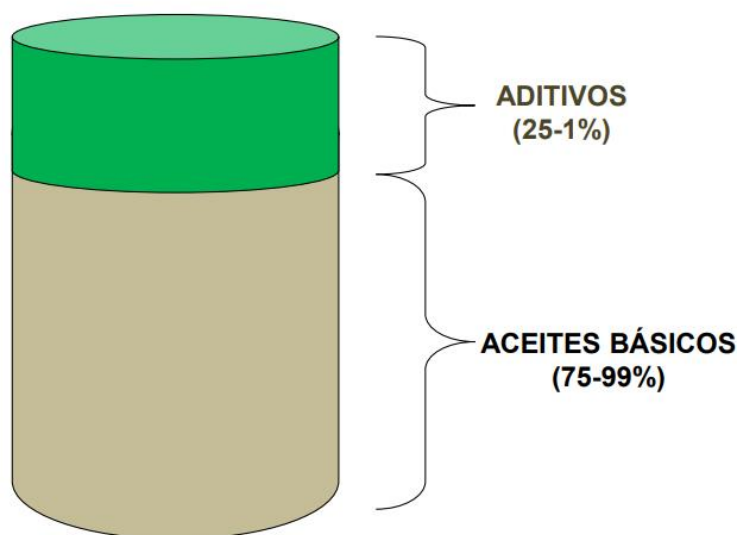


Figura 3. Componentes de un aceite lubricante. Fuente: AftonChemical.com.

4.3.3. Tipos de aceites lubricantes

Los tipos de aceites lubricantes se clasifican en aceites minerales, sintéticos y semisintéticos. A continuación, se describen estos tipos de aceites.

a. Aceites minerales

El aceite mineral es una mezcla de cientos de hidrocarburos diferentes, teniendo cada uno de ellos propiedades individuales. Únicamente ciertos hidrocarburos son aceptables como constituyentes de los aceites lubricantes (IDEAM). Después de un refinamiento adecuado para eliminar constituyentes indeseables, el aceite de base mineral se divide en Parafínicos, Nafténicos y Aromáticos. Los aceites minerales del grupo I y II tienen un proceso adicional de hidrotratamiento (Tejedor, 1999). Los lubricantes de bases nafténicas se evaporan en una forma muy limpia de las paredes del cilindro y del área de los anillos después de haber lubricado el motor, dejan solamente una pequeña cantidad de carbón, evitándose de este modo el atascamiento de los anillos. Los lubricantes de base parafínica no se espesan tanto como los otros a bajas temperaturas si se han refinado apropiadamente, siendo más aceptables para motores que tienen que efectuar el arranque en tiempo frío (Bogotá, 2008).

b. Aceites Sintéticos

Los aceites sintéticos a diferencia de los aceites minerales, no tienen su origen directo de la destilación del petróleo (Lubribras, 2018). Las bases lubricantes sintéticas son fabricadas por procesos especiales (distintos a la destilación primaria) para realizar funciones específicas, lo cual les otorga una mayor uniformidad en sus propiedades. Estos aceites son la solución para trabajos en condiciones extremas (temperaturas muy altas o muy bajas). Las principales ventajas del uso de bases sintéticas comparadas con las bases minerales son: amplio rango de temperaturas de operación, mayor resistencia a la oxidación, ahorro de energía, mantenimiento con menor frecuencia, menor uso de aditivos y más fácil degradación (Bogotá, 2008) (Ver Tabla 4). Por su parte, La Society of Automotive Engineers (SAE) los define como compuestos químicos producidos por síntesis químicas que tienen origen en reacciones de compuestos orgánicos puros. Los aceites sintéticos se pueden clasificar en: Oligómeros olefínicos, ésteres orgánicos, poliglicoles, fosfato ésteres y polialfaoleifinas. Los cuales tienen las siguientes aplicaciones. Hay muchos tipos de aceites base para lubricantes sintéticos. Los denominados PAO, que son aromáticos alquilados, polibutenos, etc. se consideran representativas de las bases sintéticas. El término PAO se refiere a oligómeros hidrogenados de α -olefina, normalmente α -deceno. Los PAO se sintetizan a partir de monómeros de 1-deceno para recortadores

ramificados de 30 átomos de carbono; El 1-deceno se obtiene de una fracción de α -olefinas lineales (LAO) que se polimeriza a partir de moléculas de etileno (Mang, theo & Dresel, 2007).

Tabla 4. Aplicaciones de las bases sintéticas

Tipos	Aplicación principal
Oligomeros de olefina (PAOs)	Automotriz e industrial
Esteres orgánicos	Aviación y Automotriz
Esteres fosfóricos	Industrial

Fuente: (Reliabilityweb.com).

c. Aceites Semi-sintéticos

Los lubricantes semisintéticos son una mezcla de proporciones variables de los aceites minerales y sintéticos con la adición posterior de aditivos para conseguir las propiedades requeridas, esto reduce el costo que tendría un lubricante sintético puro. El aceite semisintético, es una mezcla entre mineral y sintético. Para que se pueda denominar aceite semisintético, no implica que la mezcla sea 50-50%, sino que con un 10% de aceite sintético ya se puede denominar semisintético (Reliabilityweb.com). Ver Figura 4.

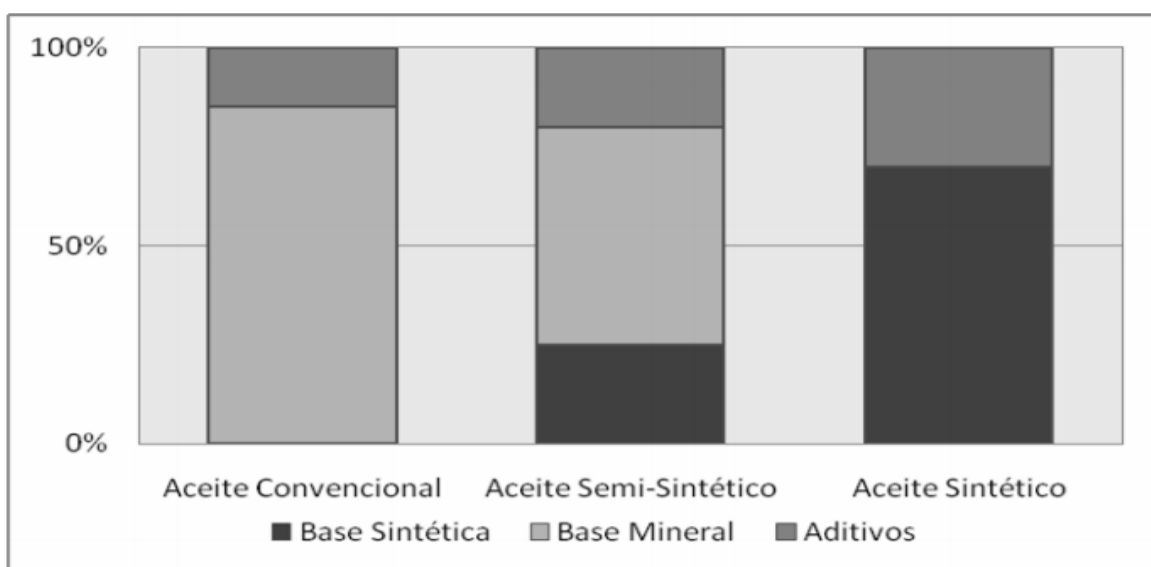


Figura 4. Tipos de aceites lubricantes según su composición. Fuente: (Delgado Mitrato, 2011, Hernandez, Hernandez, 2020).

4.4. Clasificación y características de los aceites lubricantes

La primera clasificación de los aceites es el sistema de clasificación de viscosidad SAE, que clasifica los aceites según la viscosidad a 100 °C y a diversas temperaturas bajas, dependiendo del grado de viscosidad. La viscosidad a alta temperatura está relacionada con las características de consumo y de desgaste de un aceite; la viscosidad a baja temperatura, predice el comportamiento en condiciones de arranque frío y la lubricación a baja temperatura. Los aceites con alto índice de viscosidad son generalmente menos sensibles a los cambios de temperatura y por eso están en mejores condiciones para desempeñarse en forma eficiente a altas y también bajas temperaturas. Las propiedades viscométricas también son importantes respecto a la economía, del combustible (Bogotá, 2008).

La segunda clasificación, es el sistema de clasificación API de servicio en motores, este clasifica los aceites para motor según su comportamiento en motores seleccionados, que funcionan en condiciones cuidadosamente controladas, concebidas para simular un servicio severo en el terreno. Este sistema abarca una amplia gama de categorías de servicio incluyendo un cierto número de pruebas de motor para especificaciones militares y de la industria tanto antigua como también actual. Los aceites también se podrán clasificar según especificaciones militares e industriales específicas tales como MIL-L-2104C, MIL-L-46152B o la serie 3 de Caterpillar, que está actualmente en desuso (Bogotá, 2008).

Características fisicoquímicas de los aceites lubricantes nuevo y usado

Las propiedades de los aceites usados dependen prioritariamente de las propiedades de las bases lubricantes de las cuales se derivan y de los aditivos adicionados para mejorar la viscosidad, el poder detergente y la resistencia a altas temperaturas. Además, como resultado del servicio prestado, contienen sólidos, metales y productos orgánicos. Se

presenta la caracterización fisicoquímica realizada para 6 tipos de aceites lubricantes sin usar de diferente naturaleza en Cartagena, Colombia en el año 2017. Corresponde a una muestra representativa de 6 tipos de lubricantes nuevos que se consumen en el país. La muestra M10a, es un aceite multigrado de alto rendimiento y al que se le adicionan durante su elaboración aditivos que le imparten características; de la misma manera se les adicionan a los otros aceites (M10b, M11a, M11b, M12a y M12b) diversos tipos de aditivos que buscan mejorar características diversas según clima y condiciones de operación de los motores o equipos. (Tejada Tovar, Candelaria et al, 2017). Ver Tabla 5.

Tabla 5. Caracterización físico química de un aceite lubricante nuevo:

Propiedad	Aceites nuevos					
	M10a	M10b	M11a	M11b	M12a	M12a
Viscosidad (cSt)	107	368,4	139,9	197	143,04	214,1
Zinc (ppm)	-	-	0,135	0,135	-	-
Fosforo (ppm)	-	-	0,114	0,114	-	-
Calcio (ppm)	-	-	0,269	0,269	-	-
Sedimentos (%)	-	-	0,01	0,01	-	-
Cenizas (%)	0,9	0,9	0,9	0,9	0,98	0,98
Densidad (k/l)	0,88	0,88	-	-	0,891	0,895

Fuente: (Tejada Tovar, Candelaria et al, 2017)

A continuación, se presenta la caracterización de aceites usados que ingresan al proceso de re-refinación evaluado en el análisis realizado en este estudio y que corresponde a la caracterización físico química de un aceite lubricante usado. Ver Tabla 6.

Tabla 6. Caracterización físico química de un aceite lubricante usado

Componente	Muestra 1	Muestra 2
TAN, mg KOH/gr.ac.us	0,9	0,7
TBN, mgKOH/gr.ac.us	5,1	3,4
HIERRO, ppm	730,2	827,6
COBRE, ppm	0	0
SILICE, ppm	4,2	4,8
ALUMINIO, ppm	15,3	18,2
CROMO, ppm	1,2	1,4
PLOMO, ppm	0	0
ESTAÑO, ppm	0	0
SODIO, ppm	6,7	5,9

Componente	Muestra 1	Muestra 2
POTASIO, ppm	4,3	4,2
NIQUEL, ppm	1	1
MAGNESIO ppm	4,7	5,6
CALCIO ppm	35,4	38,6
FOSFORO ppm	10,1	12,1
ZINC ppm	16,7	15,5
MAGNESIO ppm	5,3	4,6
AZUFRE % w/w	0,44	0,29

Fuente: Empresa Biochemical Group SAS, 2014.

4.5. Factores de deterioro del aceite lubricante

En condiciones normales de uso de los aceites en motores en funcionamiento, la base lubricante no se desgasta, sino que se contamina. Los aditivos, por su parte, soportan las críticas condiciones de funcionamiento y terminan degradados, contaminados y agotados luego del uso. La degradación no se produce de forma repentina, sino de manera gradual debido a la progresiva aparición de ácidos carboxílicos producto de la degradación. Dicho de otra forma, aumenta la acidez del lubricante (Advanced Monitoring Technologies, 2017). En este sentido, el proceso habitual de degradación de un lubricante se origina a partir de fenómenos asociados con el entorno y el trabajo que realiza el fluido. Los aceites usados experimentan cambios como degradación, oxidación y reacción con otros compuestos químicos presentes en el ambiente, lo que los hace persistentes y peligrosos (Nynas-Naphthenics-AB 2005). (Orozco, 2013). Por su parte, la oxidación es un fenómeno habitual debido a la presencia de oxígeno en el aire y la nitración o la sulfatación que dependen de otros elementos químicos que las generan.

Los autores (Tejada Tovar, Candelaria et al, 2017) mencionan que los aceites usados son mezclas con alto contenido de impurezas físicas y químicas (metales y compuestos orgánicos), generadas como resultado de los procesos de combustión, desgaste de piezas y mezcla con otros fluidos. Este estudio, concluye que el deterioro de los aceites usados de motor se debe principalmente a la presencia de calcio, magnesio, sodio, zinc, fósforo de los aditivos de los aceites. Por su parte, el hierro representa desgaste en los cilindros, camisas,

anillos de pistón, tren de válvulas y de la herrumbre. La cantidad de cromo identificada se debe al desgaste de los anillos del pistón y de los refrigerantes empleados. La presencia de aluminio se debe al desgaste de los pistones del motor; y la del cobre se debe al desgaste de cojinetes, bujes y aditivos de refrigerantes.

Dentro de los principales factores de deterioro del aceite lubricantes usado se encuentran según (Bogotá, 2008):

Las altas temperatura de operación, las cuales deterioran el hidrocarburo ocasionando que se oxide o polimerice.

- La presencia de agua provoca emulsificación del aceite, o puede lavar la película lubricante que se encuentra sobre la superficie metálica provocando desgaste de dicha superficie.
- Los combustibles de la cámara de combustión que interactúan con el aceite ocasionan una dilución del mismo. Estos consisten principalmente en combustible no quemado, productos resultantes de la combustión, y suciedad del aire. Así mismo, otros factores de deterioro como los sólidos, polvo y metales provenientes del ambiente y del desgaste de las piezas, contaminan el aceite.

4.6. Reciclaje y tratamiento de aceites lubricantes usados

Hacia el final de su vida útil, la mayoría de los bienes y productos básicos eventualmente se descartan y, por lo general, ingresan a los sistemas de gestión de desechos sólidos. El producto de desecho pasa así por una serie de actividades, que se pueden dividir en cuatro fases principales: (1) generación, (2) recolección y transporte, (3) tratamiento y (4) reciclaje, utilización o vertido. En muchos casos, el tratamiento de los residuos sucede localmente, cerca de la fuente de residuos (Hauschild, 2017). En los últimos años, el papel de los residuos como un conjunto de recursos materiales la extracción ha sido reconocida y los desechos ahora se ven cada vez más como un recurso valioso en lugar de materiales no deseados. En este sentido, nueva legislación e iniciativas intentan integrar la gestión de residuos en una nueva visión de reprocesamiento, con mayor cantidad y calidad de reciclaje. (Hauschild, 2017).

El cambio reciente en la percepción de los residuos como recurso se refleja en la jerarquía de los residuos. La reutilización y el reciclaje son las opciones de tratamiento de más alta clasificación. La ambición de los legisladores es integrar la gestión de residuos en una estructura de economía circular, donde las actividades de desechos entregan recursos recuperados y cierran bucles en ciclos de material. En tal sentido, los sistemas de gestión de residuos para la recuperación y reciclaje de bienes y la reintroducción efectiva de materiales secundarios en el mercado han mejorado y se han generalizado en muchos países avanzando así hacia el objetivo de una "economía circular". (Gala, Raugei, & Fullana-i-Palmer, 2015)

De esta manera, el potencial de reciclaje expresa qué cantidad de la energía incorporada y recursos naturales utilizados en un elemento podrían, mediante la reutilización o el reciclaje, ser utilizables en el siguiente sistema de productos diferente al que se usaron originalmente los materiales. Lo que se puede hacer utilizable en el siguiente sistema de producto se deduce de los impactos del sistema inicial. (Hauschild, 2017) La recuperación de residuos contribuye a facilitar la posibilidad de alcanzar un máximo de sustitución de materiales no renovables. Propone un sistema en el que la reutilización y el reciclado proporcionan sustitutos al uso de materias primas virgen. Al reducir nuestra dependencia de esos recursos, mejora nuestra capacidad y la capacidad de las generaciones futuras para satisfacer sus necesidades. (Domínguez, Ayala, Romero Cárdenas, & María Ortiz Zurita, 2017). Según (Hauschild, 2017) el reciclaje de residuos tiene como principal objetivo la reducción del agotamiento de los recursos naturales, como los combustibles fósiles, los metales, así como el nitrógeno y el fósforo, por tanto, son una prioridad para las operaciones de gestión de residuos.

Recuperación del aceite lubricante usado

El aprovechamiento de los aceites lubricantes usados representa una gestión adecuada, ya que son considerados potencialmente peligrosos para el ambiente debido a su persistencia y su habilidad para esparcirse en grandes áreas de suelo y del agua, lo que produce rápidamente una significativa degradación de la calidad del ambiente (Ayala, Pancho, Jiménez, Valverde, & Mosquera, 2018). De igual manera, la recuperación de residuos contribuye a facilitar la posibilidad de alcanzar un máximo de sustitución de materiales no renovables. Propone un sistema en el que la reutilización y el reciclado proporcionan

sustitutos al uso de materias primas virgen. Al reducir nuestra dependencia de esos recursos, mejora nuestra capacidad y la capacidad de las generaciones futuras para satisfacer sus necesidades. (Dominguez, Ayala, Romero Cárdenas, & Maria Ortiz Zurita, 2017)

En este sentido, el aceite lubricante usado como residuo, después del proceso de tratamiento primario, puede ser aprovechado como combustible de uso industrial, en la elaboración de plastificantes y en procesos que no impliquen ingestión por humanos o animales y que no afecte el medio ambiente (Castaño Orozco, 2014); o después del tratamiento secundario, aprovechado completamente en la fabricación de lubricantes nuevos con las mismas prestaciones que un lubricante fabricado con base lubricante virgen. Por su parte, El “Manual técnico para el manejo de aceites usados”, reconoce la posibilidad de la reutilización del aceite lubricante usado, en forma pura o en mezclas, gracias a la “regeneración de bases lubricantes, mediante su recuperación y aprovechamiento por re-refinación, entendiéndose como tal la serie de procesos que permiten utilizar nuevamente el lubricante obtenido” (Soto Castaño et al., 2006).

En el contexto del aprovechamiento de los aceites lubricantes usados, la propuesta de valorización energética de aceites usados ante un re-refinamiento, muestra una alternativa de gestión energética basada en un programa de control ambiental ante su disposición final; refleja crecimiento económico y contribuye en la reducción de este tipo de desechos peligrosos, manteniendo una sustentabilidad ambiental acorde a generar mayor valor agregado. (Domínguez, Ayala, Romero Cárdenas, & María Ortiz Zurita, 2017). Sin embargo, deben también considerarse los efectos derivados de combustiones inadecuadas o de tratamientos inadecuados de los gases de combustión cuando se acude a la valorización energética como vía de recuperación de los aceites usados. Por su parte, la recuperación de residuos contribuye a facilitar la posibilidad de alcanzar un máximo de sustitución de materiales no renovables. Propone un sistema en el que la reutilización y el reciclado proporcionan sustitutos al uso de materias primas virgen. Al reducir nuestra dependencia de esos recursos, mejora nuestra capacidad y la capacidad de las generaciones futuras para satisfacer sus necesidades (Domínguez, Ayala, Romero Cárdenas, & María Ortiz Zurita, 2017)

4.6.1. Tecnologías para la disposición y/o tratamiento de aceites lubricantes usados

En este apartado se mencionan diferentes tecnologías disponibles para realizar la disposición y tratamiento del aceite lubricante usado, diferentes a las tecnologías analizadas en este estudio:

a. Proceso de arcilla ácida:

Método tradicional de naturaleza química, para tratar y reciclar ALU. En este proceso el ácido sulfúrico fumante (del 92% a 93%) se mezcla con el ALU deshidratado para extraer sales metálicas, ácidos, aromáticos y otras impurezas. El aceite ácido se mezcla con arcilla para eliminar mercaptanos y otros contaminantes y para mejorar el color del aceite; y luego se somete a filtración. 30–42% de lodo ácido puede quemarse, mientras que la porción restante se lleva combustión residual. La eficiencia promedio de la recuperación de aceite reutilizable es de aproximadamente 0.4 k / k de la entrada ALU. En este proceso, primero se filtra el ALU para eliminar impurezas y otras partículas sólidas y luego se deshidratan por calentamiento o separación. Este proceso genera impactos negativos para el ambiente debido a la contención de metales pesados en el lodo ácido, y a la generación de arcillas ácidas difíciles de recuperar, las cuales terminan en depósitos terrestres o en rellenos sin protección.

b. Extracción con solvente:

Este proceso de naturaleza química, es una tecnología moderna que actualmente se usa ampliamente en el mundo. Se usa condensado gas licuado de petróleo (GLP) y 2-propanol, metilcetona, o 1-butanol como nuevos materiales solventes para la extracción de ALU. Consta de tres pasos principales: primero, la eliminación de agua y compuestos de hidrocarburos ligeros; segundo, la eliminación de contaminantes y aditivos y tercero, el lavado final de los productos. El lodo deshidratado (que contiene aceite) es tratado con la mezcla de aceite en solventes, con la relación en peso de 1: 2,67. Después de que el lodo se drena, se centrifuga para recuperar aceite y solvente. El disolvente se transfiere a la unidad de recuperación de disolvente, mientras que el aceite extraído se destila en una

columna de destilación al vacío seguida de tratamiento con arcilla o hidrotratamiento para eliminar el color y el olor (Barry, 1979). La eficiencia promedio de recuperación de petróleo del proceso de extracción con solvente es aproximadamente 0.7 k / k de ALU alimentado. Este proceso es muy costoso por el uso y recuperación de los solventes; además presenta grandes consumos energéticos por todos los procesos de destilación y separación que conlleva.

c. Co-cocción en caldera:

Este proceso de naturaleza química es uno de los enfoques más ampliamente aplicados en el mundo. Cerca del 10 al 25% de ALU se mezcla con petróleo crudo como suplemento de combustible en caldera. En este proceso, el agua y los sólidos en suspensión deben ser eliminados primero antes de mezclarlo con petróleo crudo. Hay varios tipos de calderas que se pueden aplicar para quemar ALU. Sin embargo, este método está prohibido en la mayoría de los países ya que no se permite la combustión de aceites usados debido a su efecto contaminante en degradación de la calidad del aire.

d. Quema directa en horno de cemento

En esta vía de disposición, el ALU se utiliza como combustible a niveles extremadamente altos, a una temperatura entre 1500 a 2000 °C, con tiempo de reacción de 10 a 12 s en horno de cemento. Una buena parte de los contaminantes se incorporan al Clinker y eso disminuye el efecto contaminante de tal combustión. En este caso el ALU se utiliza como alternativa energética en la cocción de los carbonatos, arcillas y carbón que hacen la composición básica del cemento.

e. Proceso PROP - Phillips Re-refined Oil Process-

En este proceso de naturaleza química, el ALU se pone en contacto con una solución de fosfato diamónico, los metales (excepto el zinc ditiofosfato) reaccionan con el fosfato para producir fosfatos insolubles en agua y en aceite. El aceite sale de este proceso convertido en una emulsión que contiene aproximadamente el 1% de los sólidos. Esta emulsión se trata mediante un tratamiento térmico que produce la degradación de una cantidad

apreciable de este compuesto de fósforo y a la vez produce la aglomeración de los sólidos dispersos, los cuales se separan posteriormente por filtración. Esta es una de las tecnologías usadas en la regeneración de lubricantes que no produce contaminación (ya que no usa ácidos o solventes en el tratamiento), no requiere destilación al vacío, no cambia la estructura de los hidrocarburos que constituyen el aceite y los contaminantes se retiran de forma tal que no contaminan el ambiente.

f. Destilación por filtración de arcilla

La carga de ALU es previamente deshidratada para eliminar el agua existente y otros contaminantes de bajo punto de ebullición. Posteriormente el aceite se pasa a través de una unidad de termocracking, la cual permite reducir los desechos, por el tope de esta unidad se obtiene un destilado que, unido al producto de la unidad de vacío, formaran después de la redestilación el "spindle oil". El producto de salida de la unidad de termocracking se bombea a la unidad de tratamiento ácido, en la cual se pone en contacto con el ácido sulfúrico, obteniéndose de esta operación el aceite ácido, resultante del tratamiento y un desecho ácido, el cual representa el 10.5% en peso en relación a la carga. Este aceite ácido se lleva a la unidad de vacío donde se despoja de la fracción de gas oil y finalmente se trata en la unidad de filtración-neutralización, donde se obtiene un básico de alta calidad. El rendimiento de la planta es del 70% en peso con relación a la carga sin contar un 12% de gas oil obtenido como producto secundario, el cual se utiliza como combustible. Este proceso de naturaleza físico química es el más difundido mundialmente por su versatilidad y eficiencia.

g. Tecnología de membrana

Existen dos tecnologías: 1. Membrana convencional estática de poros de diferente capacidad, que opera por diferencia de presión y por ciclos de regeneración, y 2. Membrana Vibratoria que utiliza una vibración de torsión de la membrana, la cual crea cizallamiento en la superficie de la membrana que reduce el ensuciamiento y polarización de la misma. Debido a que la vibración reduce este ensuciamiento, no se requiere el uso de un pretratamiento químico. Además, las relaciones de flujo son 5-15 veces más altos (en galones/pies cuadrados/día) comparado con otros sistemas de filtración por membrana. La

fuerza de corte en la membrana mantiene las partículas suspendidas por encima de la superficie de la membrana, permitiendo el transporte libre del líquido a través de la misma. Este proceso de filtración reduce los niveles de varios metales en el aceite. Se reduce también el contenido de azufre y cenizas. Refinería adicional para reducir el contenido de azufre y cenizas producirá aceite de calidad lubricante. El resultado filtrado del tiene un índice de color ASTM de 8, aproximadamente. La calidad del mismo es comparable con el combustible del grado marino o el combustible búnker.

h. Separación por destilación

Esta vía de tratamiento física incluye destilación total e hidrotratamiento; destilación total al vacío y tratamiento con tierras de blanqueo y Evaporación de capa fina. En todos los casos de separación por destilación se aplica vacío para disminuir el punto de ebullición y con ello evitar la destrucción de la molécula por cracking térmico lo cual conllevaría a la formación de compuestos carbonizados difíciles de recuperar y haría más nocivo el ataque químico de los residuales del aceite usado.

Este tipo de tratamiento, utilizan sistemas de destilación de una sola etapa continua que actúa como un sistema multietapa en una columna de platos. Los productos de destilación son más estables y en algunos casos requieren tratamiento posterior para justar las propiedades de la base lubricante obtenida para llevarla a grado de calidad grupo II o grupo III, por lo que el proceso de complementa con hidrotratamiento o con tratamiento con tierras de blanqueo. Este es uno de los procesos de recuperación de ALU más eficientes en términos másicos y energéticos y se puede obtener productos recuperados hasta en un 97%, con hasta un 78% de recuperación en forma de base lubricante nueva totalmente re incorporable a formulación de aceites lubricantes nuevos.

4.7. Aspectos ambientales de los aceites lubricantes usados

Aproximadamente el 75% de la producción mundial anual de aceites base, empleados para la elaboración de aceites minerales, provienen del petróleo crudo y de acuerdo con la

clasificación del Instituto Americano del Petróleo (API), estos aceites base corresponden al grupo I, los cuales son considerados peligrosos para el medio ambiente, debido a su baja biodegradabilidad (Orozco, 2013). En Colombia; El Ministerio del Medio Ambiente, Vivienda y Desarrollo Territorial (MAVDT 2006), establece que estos residuos de aceites lubricantes usados representan riesgo para el medio ambiente, ya que prácticas inadecuadas como disposición a cielo abierto, drenaje de lixiviados en rellenos sanitarios y derrames, entre otros, pueden llegar a contaminar el agua, el suelo y el aire, extendiéndose a las diversas formas de vida presentes en el ecosistema. (Orozco, 2013).

En principio, los lubricantes no deben ser tóxicos para la salud humana bajo condiciones seguras durante el proceso de producción y uso, sin embargo, existen los riesgos asociados a derrames o pérdidas accidentales durante el proceso de manipulación, transporte y tratamiento. Adicionalmente, los inadecuados procesos de disposición final en rellenos o directamente en el ambiente; así como realizar combustión de ALU sin controles de emisiones atmosféricas, o la falsificación de lubricantes que se elaboran a partir de ALU sin tratamientos adecuados, representan también riesgos ambientales y para la salud humana. Los riesgos de un aceite lubricante se miden en términos de su peligro potencial y su toxicidad; el peligro potencial se clasifica con base en sus propiedades fisicoquímicas como explosivo, oxidante, extremadamente inflamable, altamente inflamable e inflamable; en cuanto a su toxicidad, un aceite lubricante puede ser clasificado como muy tóxico, tóxico, perjudicial, corrosivo, irritante, cancerígeno, mutagénico, tóxico para la reproducción y peligroso para el medio ambiente (Bartz, 1998).

4.7.1. Impactos ambientales negativos

Por su parte, la cadena de procesos de producción y uso de residuos aceitosos está asociada con muchos de los impactos, comenzando por la recolección, transporte y disposición final. La producción de residuos de aceites usados por sí misma causa al menos dos diferentes tipos de impactos ambientales: (1) las cargas debidas al consumo de los procesos energéticos. Y (2) procesos de descarga o emisiones al aire (Domínguez, Ayala, Romero Cardenas, & Maria Ortiz Zurita, 2017). Específicamente, los aceites lubricantes e industriales usados o contaminados son peligrosos debido a su baja biodegradabilidad, alta toxicidad, degradación en químicos aún más contaminantes, acumulación en seres vivos y

generación de moléculas gaseosas muy peligrosas para la salud de las personas. La inadecuada disposición de estos residuos genera contaminación hídrica, contaminación atmosférica por la combustión deficiente de los aceites y contaminación de los suelos por su afectación sobre la permeabilidad de la tierra (Muñoz Ciro et al., 2019).

Algunos autores manifiestan que los aceites lubricantes usados derivados del petróleo, presentan altos niveles de metales pesados tóxicos como Cr, Mn, Fe, Ni, Cu, Zn, Cd, Mg y Pb, y compuestos orgánicos aromáticos que pueden causar cáncer (Adebiyi et al. 2010). El Cromo, el Cadmio y el Arsénico son potentes agentes cancerígenos. El Plomo es una toxina que envenena el sistema nervioso central y detiene el desarrollo en el niño; la exposición a él, aún en pequeñas cantidades, puede llevar al desarrollo de serios problemas de lectura en niños. Puesto que todos los metales pesados, incluyendo el Cromo, el Cadmio y el Arsénico constituyen igualmente una amenaza permanente para la salud y permanecen en el ambiente, se debe prevenir la quema no controlada de aceite lubricante usado el cual puede contener los metales mencionados (Soto Castaño et al., 2006).

El proceso de biodegradación y disolución de los aceites, igual que acontece con los hidrocarburos saturados que contienen, es muy lento, pues demanda entre 10 y 15 años para su eliminación. Debido a ello, cuando estos productos son vertidos en el agua, forman finas películas impermeables que separan las fases entre el aire y el agua, e impiden que el oxígeno contenido en la atmósfera se disuelva en el cuerpo hídrico. Esta situación perturba seriamente el desarrollo de la vida acuática, pues provoca la muerte de diversas formas de vida aerobias que habitan allí y en la tierra colindante (Muñoz Ciro et al., 2019). A continuación, se presenta un resumen del impacto ambiental que puede tener la inadecuada disposición de los aceites lubricantes usados.

Los efectos en la salud que pueden ocasionar los aceites lubricantes, se derivan principalmente del manejo inadecuado que se hace a lo largo del ciclo de vida, ya sea en la fase de producción, transporte, uso o disposición final. Cuando el uso de los lubricantes usados genera emisiones contaminantes, la inhalación de estos gases que contienen aldehídos, cetonas, compuestos aromáticos y CO₂, producen irritación sobre el tejido respiratorio superior y provocan ahogos, asma, bronquitis, efectos mutantes y cáncer con la exposición prolongada. Elementos como el cloro, NO₂, H₂S, antimonio (Sb), cromo (Cr), níquel (Ni), cadmio (Cd), manganeso (Mn) y cobre (Cu) actúan también sobre el tejido

respiratorio superior y el tejido pulmonar. Otros elementos, como el CO, los disolventes halogenados y el H₂S, producen efectos asfixiantes, impiden el transporte de oxígeno y, por tanto, la respiración de la célula. Los disolventes halogenados se acumulan en el hígado con posibles efectos cancerígenos y tienen acción anestésica y narcótica. Metales como el plomo (Pb), cadmio (Cd) y manganeso (Mn) provocan efectos tóxicos sobre el riñón; el cadmio tiene efectos cancerígenos en la próstata, y el cromo, sobre el pulmón. Los compuestos aromáticos, como el tolueno y el benceno, pueden provocar leucemias; otros hidrocarburos más ligeros se acumulan en la sangre y podrían producir parálisis (Muñoz Ciro et al., 2019) Ver Tabla 7.

Tabla 7. Impactos ambientales del aceite usado

MEDIO	IMPACTO AMBIENTAL DEL ACEITE USADO
TIERRA	Si se arroja a la tierra el aceite usado, éste contiene una serie de hidrocarburos que no son degradables biológicamente que destruyen el humus vegetal y acaban con la fertilidad del suelo.
	El aceite usado contiene así mismo una serie de sustancias tóxicas como el plomo, el cadmio y compuestos de cloro, que contaminan gravemente las tierras, su acción contaminadora se ve además reforzada por la acción de algunos aditivos que se le añaden que favorecen su penetración en el terreno, pudiendo ser contaminadas las aguas subterráneas.
AGUA	Si se vierten a las aguas, bien directamente o por el alcantarillado, el aceite usado tiene una gran capacidad de deterioro ambiental. En el agua produce una película impermeable, que impide la adecuada oxigenación y que puede asfixiar a los seres vivos que allí habitan.
	Un litro de aceite contamina un millón de litros de agua.
	Así mismo, el aceite usado, por su bajo índice de biodegradabilidad, afecta gravemente a los tratamientos biológicos de las depuradoras de agua, llegando incluso a inhabilitarlos.
AIRE	Si el aceite usado se quema, sólo o mezclado con fuel-oil, sin un tratamiento y un control adecuado, origina importantes problemas de contaminación y emite gases muy tóxicos, debido a la presencia en este aceite de compuestos de plomo, cloro, fósforo, azufre, etc.
	Cinco litros de aceite quemados en una estufa contaminan: con plomo y otras sustancias nocivas, 1.000.000 m ³ de aire, que es la cantidad de aire respirada por una persona durante tres años.

Fuente: (Bogotá, 2008).

A estas problemáticas se suman los riesgos, para el ser humano y los animales, provocados por los tóxicos que se encuentran en los aditivos agregados al aceite: fenoles, aminos

aromáticas, terpenos fosfatados y sulfonados di-alquil-ditiofosfato de zinc, detergentes, poliisobutilenos y poliésteres que, cuando se calienta el aceite a temperaturas muy elevadas, forman compuestos de muy alta toxicidad conocidos como peróxidos intermedios.

4.7.2. Impactos positivos del aprovechamiento de los aceites usados

El principal beneficio de la recuperación de los aceites lubricantes usados es ambiental, porque implica la reconversión de miles de toneladas de residuos peligrosos que en la actualidad tienen un destino incierto, en insumos listos para su reutilización, conservando los mismos estándares de calidad que los productos derivados de la refinación de crudo tradicional. Desde un punto de vista más amplio, significa el ahorro de energía y recursos no renovables (Gómez, García, Hernández, & Ramírez, 2007). La recuperación de residuos contribuye a facilitar la posibilidad de alcanzar un máximo de sustitución de materiales no renovables. Propone un sistema en el que la reutilización y el reciclado proporcionan sustitutos al uso de materias primas virgen. Al reducir nuestra dependencia de esos recursos, mejora nuestra capacidad y la capacidad de las generaciones futuras para satisfacer sus necesidades Domínguez, Ayala, Romero Cárdenas, & María Ortiz Zurita, 2017).

La valorización ambientalmente segura, es decir sin generar subproductos contaminantes en su uso como vía de valorización de residuos aporta beneficios desde la triple dimensión de la sostenibilidad (ambientales, económicos y sociales), por lo tanto, estamos hablando de un término pluridisciplinar y complejo en el que entran en juego diversas áreas como cambio climático, gestión de residuos, calidad del aire, protección de la salud, preservación de recursos, política energética, etc. (Madrid, 2012).

Algunos de los impactos positivos que pueden asociarse al aprovechamiento de los aceites usados, en la dimensión de sostenibilidad son:

- Reduce las emisiones globales de gases de efecto invernadero.
- Permite el ahorro de materias primas.
- Disminuye el consumo de combustibles fósiles.
- Mejora la competitividad y reduce los costos de fabricación al existir un ahorro en la obtención de materias primas y de combustibles.

- Supone una garantía de tratamiento adecuado.
- Evita el depósito de residuos en vertedero y sus consecuencias adversas asociadas.

De acuerdo a lo anterior, la reprocesamiento de los ALU y reincorporación al ciclo de vida permite minimizar las afectaciones que este tendría si se dispone como residuo final; ya que permite el ahorro en explotación de nuevas materias primas y de combustibles, además que aporta beneficios ambientales derivados de los impactos ambientales evitados.

4.7.3. Aceites lubricantes usados y los objetivos de desarrollo sostenible

La agenda 2030 para el Desarrollo Sostenible: Establece 17 objetivos y 169 metas globales que guiarán el enfoque de desarrollo de Colombia a 2030. En este marco, el crecimiento verde es un medio para alcanzar los ODS e incide directamente en el cumplimiento de 9 ODS e indirectamente en 7 de ellos. (The Global Green Growth Institute and Green Climate Fund Partnership, 2020). El crecimiento verde se encuentra alineado con la agenda internacional en materia de cambio climático, y el cumplimiento de la meta nacional para la reducción del 20% de las emisiones de gases de efecto invernadero (GEI) respecto a las emisiones proyectadas para 2030 en el marco de Acuerdo de París. Si bien Colombia solo contribuye con el 0,46 % de las emisiones de GEI a nivel global, el país se ha planteado una ambiciosa agenda para contribuir a la lucha contra el cambio climático. (The Global Green Growth Institute and Green Climate Fund Partnership, 2020).

Para medir el potencial de crecimiento verde, es necesario delimitar previamente dicho concepto de crecimiento verde. Se tiene en cuenta que este concepto puede asumir significados distintos en diferentes países, la GGGI considera que pueden contemplarse tres trayectorias: 1). Maximizar la eficiencia de producción y consumo (ecoeficiencia). Es crear más producto con menos insumos. 2). Asegurar el uso sostenible de los recursos naturales (ecoamigable). Enfocarse en mejorar la calidad y cantidad de los recursos naturales y 3). Promover un desarrollo que considere el cambio climático. Impulsar los

beneficios de la mitigación y adaptación frente al cambio climático. (Departamento Nacional de Planeación, 2016).

Colombia mediante el documento CONPES 3918 ha ratificado su compromiso para la inclusión de los ODS como un eje rector en la definición de políticas públicas, promoción de inversiones, planes de desarrollo, entre otras. (Planeación & EnerSinc, 2018). En este sentido, los Planes de Acción Sectorial de Mitigación para el Cambio Climático (PAS) son un conjunto de acciones, programas y políticas, que permitirán reducir las emisiones de gases efecto invernadero (GEI) frente a una línea base de emisiones proyectadas en el corto (año 2020), mediano (años 2025) y largo plazo (años 2030). "Actualmente los sectores de Minería, Hidrocarburos, Electricidad, Transporte, Residuos, Vivienda, Industria y Agropecuario cuentan con PAS aprobados por cada ministerio sectorial respectivo. (Sostenible, 2020).

Se puede establecer a grandes rasgos que las metas de la "Misión de Crecimiento Verde" para el 2030 se enmarcan en: (1) Incrementar las energías renovables no convencionales y la eficiencia energética al 2030. (2) Aumentar la eficiencia en el uso de materiales y el aprovechamiento de residuos hacia una economía circular. (3) Posicionar la bioeconomía para impulsar el crecimiento y la diversificación de la economía. (SAVING THE AMAZON, 2020).

Según (MINAMBIENTE; GOBIERNO NACIONAL, 2019), las metas específicas son principalmente las siguientes reducir el 20% de las emisiones de (GEI) para 2030, aumentar el porcentaje de residuos sólidos efectivamente aprovechados sobre el total de residuos de 17% en el 2015 a 30% en el 2030 y aumentar los residuos peligrosos aprovechados y tratados de 210.132 Toneladas en 2015 a 2.806.130 en el 2030. Así mismo, se tiene metas de mitigación de emisiones de CO₂, adquiridas como compromisos por parte del Ministerio de Minas y Energía, enfocadas en tres subsectores; Eléctrico, Hidrocarburo y Minero. Para las cuales se ha propuesto la "Reducción de 11,2 Mton de CO₂ al año 2030", a través de: - Impulso de la eficiencia energética y la industria minero energética. – Diversificación de la matriz energética. – Desarrollo de la gestión activa de la demanda. – Gestión de las emisiones fugitivas (Minería, 2020). Por su parte, la Estrategia nacional de economía circular incluye los indicadores y metas planteados en la Política de crecimiento verde. A continuación, se presentan las líneas de acción prioritarias, que orientan las oportunidades

de circularidad para cada flujo de material y especifican indicadores y metas particulares por cada línea. Ver Tabla 8.

Tabla 8. Indicadores y metas de la estrategia nacional de economía circular

Indicador	Línea base	Meta 2030
Intensidad energética (TJ)	3,7 (2015)	2,9
Productividad hídrica (\$)	4,775 (2015)	5,495
Tasa de reciclaje (%)	8,60 (2015)	17,9
Reducción de gases de efecto invernadero (%)	0 (2010)	20

Fuente: Política de crecimiento verde. CONPES 3034 de 2016

Los indicadores propuestos permiten tener continuidad y trazabilidad de lo reportado por las evaluaciones adelantadas por la OCDE, y están alineados con la estrategia para la implementación de los Objetivos de Desarrollo Sostenible en Colombia. (Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible; Ministerio de Comercio, Industria y Turismo, 2019). De acuerdo a lo anterior y a las estadísticas nacionales (IDEAM, 2018), los Aceites lubricantes Usados, son residuos gestionados a través de operaciones de tratamiento y de disposición final, a pesar de que algunos de ellos tienen un alto potencial de reutilización, aprovechamiento y valorización a través de la implementación de diferentes iniciativas de economía circular, que aún no han sido lo suficientemente exploradas para su aplicación. En este sentido, el Ministerio de Ambiente establece el siguiente indicador específico para los aceites lubricantes usados: Ver Tabla 9.

Tabla 9. Indicador para Aceites lubricantes Usados

Nombre del indicador	Meta	Actores involucrados	Fuente
5. Porcentaje (%) de aceites lubricantes usados recolectados y tratados para su valorización energética.	69% de los aceites lubricantes usados generados en el país, valorizados energéticamente al 2022 (equivalente a 18.284.000 galones de aceites lubricantes usados).	Fondo de Aceites Usados de la Asociación Colombiana del Petróleo -ACP.	Fondo de Aceites Usados de la Asociación Colombiana del Petróleo -ACP.

Fuente: (Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible; Ministerio de Comercio, Industria y Turismo, 2019).

Considerando que el reciclaje de aceites lubricantes usados aporta directamente a la sostenibilidad del petróleo de forma circular, aporta a las tasas de reciclaje y se hace necesario para Colombia conocer los beneficios ambientales que la regeneración de aceites lubricantes usados aporta al país, teniendo como marco de referencia las metas de Crecimiento verde proyectadas para el periodo 2014-2018 que plantea entre otras metas de cumplimiento concretas, reducir las emisiones de GEI del sector de los Hidrocarburos.

Mediante unos indicadores estas metas y objetivos propuestos contribuyen cuantitativamente a los compromisos adquiridos por Colombia en Acuerdo de París (NDC) respecto a la reducción de las emisiones de gases de efecto invernadero y a los Objetivos de Desarrollo Sostenible de Colombia definidos en el documento CONPES 3918 de 2018 para las Metas ODS Colombia (TECNALIA, 2018). Bajo la mirada de la valoración energética y la re-refinación de los aceites usados, se enfocan los siguientes objetivos de desarrollo sostenible -ODS- y sus respectivas metas de aquí a 2030: Ver Tabla 10.

Tabla 10. Metas e indicadores de seguimiento en los cuales aportan la tecnología de re-refinación (RR) y la tecnología de valorización energética para el reciclaje de aceites lubricantes usados.

ODS	META	RR	VE
ODS 7: Energía asequible y no contaminante	Meta 7.2: Aumentar considerablemente la proporción de energía renovable en el conjunto de fuentes energéticas.		
	Meta 7.3: Duplicar la tasa mundial de mejora de la eficiencia energética.		
	Meta 7.4: Aumentar la cooperación internacional para facilitar el acceso a la investigación y la tecnología relativas a la energía limpia, incluidas las fuentes renovables, la eficiencia energética y las tecnologías avanzadas y menos contaminantes de combustibles fósiles, y promover la inversión en infraestructura energética y tecnologías limpias.		
ODS 8: Trabajo decente y crecimiento económico	Meta 8.4: Mejorar progresivamente, la producción y el consumo eficientes de los recursos mundiales y procurar desvincular el crecimiento económico de la degradación del medio ambiente.		
ODS 9: Industria, innovación en infraestructura	Meta 9.4: Modernizar la infraestructura y reconvertir las industrias para que sean sostenibles, utilizando los recursos con mayor eficacia y promoviendo la adopción de tecnologías y procesos industriales limpios y		

ODS	META	RR	VE
	ambientalmente racionales, y logrando que todos los países tomen medidas de acuerdo con sus capacidades respectiva.		
ODS 11: Ciudades sostenibles	Meta 11.6: Reducir el impacto ambiental negativo per cápita de las ciudades, incluso prestando especial atención a la calidad del aire y la gestión de los desechos		
ODS 12: Producción y consumo responsable.	Meta 12.2: Lograr la gestión sostenible y el uso eficiente de los recursos naturales.		
	Meta 12.4: Lograr la gestión ecológicamente racional de los productos químicos y de todos los desechos a lo largo de su ciclo de vida, de conformidad con los marcos internacionales convenidos, y reducir significativamente su liberación a la atmósfera, el agua y el suelo a fin de minimizar sus efectos adversos en la salud humana y el medio ambiente.		
	Meta 12.5: Reducir considerablemente la generación de desechos mediante actividades de prevención, reducción, reciclado y reutilización.		

Fuente: (SOCIAL, COLOMBIA, & PLANEACIÓN, 2018) elaboración propia.

5. CONTEXTO NORMATIVO RELACIONADO ACEITES LUBRICANTES USADOS

A continuación, se presenta el contexto normativo internacional y nacional relacionado con los aceites lubricantes usados.

5.1. Contexto Internacional aceites lubricantes usados

La disposición de aceites usados se encuentra regulada en casi todos los países del mundo, principalmente en Europa y Estados Unidos donde la regulación inició hace más de 30 años, con el propósito de promover el buen manejo de los aceites lubricantes usados bajo la tecnología de Re-refinación en primer lugar y mediante procesos de combustión cuando se presenten dificultades técnicas, económicas y organizacionales.

En Europa particularmente, desde el año 1975 se expidió la Directiva del Consejo 75/439/EEC sobre la eliminación de aceites usados. Esta Directiva se aplica a cualquier lubricante de base mineral o aceite industrial que se haya vuelto inadecuado para el uso previsto originalmente. Bajo esta Directiva, los Estados miembros deben asegurarse de que los aceites usados se recogen y eliminan y deben dar prioridad al procesamiento de aceites usados por regeneración. Cuando no se utilice este proceso, se pueden considerar otros métodos como combustión, destrucción, almacenamiento o volcado. La Directiva estipula las condiciones bajo las cuales esto debe ocurrir. Con la aplicación de la Directiva del Consejo relativa a la gestión de aceites usados (75/439/EEC, modificada por la Directiva 2000/76/CE), se le ha dado prioridad a la re-refinación del aceite usado para obtener bases lubricantes, siempre y cuando no haya obstáculos técnicos, económicos y organizacionales. El objetivo de la Directiva del Consejo es evitar los efectos nocivos en el medio ambiente causados por la descarga, el almacenamiento y tratamiento de dichos aceites.

En Estados Unidos, actualmente a nivel federal, los aceites re-refinados no se clasifican como desechos peligrosos, lo cual está vigente desde el 19 de noviembre de 1986, cuando la EPA emitió una decisión de no incluir el aceite usado reciclado como material de desecho peligroso (51 FR Estudio de re-refinación de aceite usado para abordar la Ley de política energética de 2005 Sección 1838 Departamento de Energía de EE. UU. 1-6 41900). En ese momento, la Agencia creía que los efectos estigmáticos asociados con una lista de desechos peligrosos podrían desalentar el reciclaje de aceite usado, lo que resultaría en una mayor eliminación de los aceites de manera incontrolada. La EPA también describió un plan que incluía la determinación de si incluir el aceite usado como desecho peligroso y la promulgación de normas de gestión especiales para el aceite reciclado.

En Estados Unidos la regulación aplicable a la gestión de aceites usados se encuentra descrita en CFR 40, capítulo I, Sub capítulo I, parte 279. En la misma sobresalen las prohibiciones al confinamiento superficial, es decir, no disponer en embalses superficiales o pilas de desechos, así como prohibir el uso como supresor de polvo. Se permite la incineración en unidades particulares para la recuperación de energía, y solo se permite en los siguientes dispositivos: Hornos industriales identificados; Calderas industriales para transformar nuevos productos mediante procesos mecánicos o químicos; Calderas de servicios públicos utilizadas para producir energía eléctrica, vapor, aire calentado o enfriado u otros gases o fluidos para la venta; Calentadores de ambiente de aceite usados siempre que el quemador cumpla con las disposiciones de la §279.23; e Incineradores de desechos peligrosos sujetos a la regulación bajo la sub parte O de las partes 264 o 265 de este capítulo. Los requisitos de esta sub parte que aplica a los propietarios y operadores de instalaciones que procesan aceite usado incluye, pero no se limita a: mezclar aceite usado con productos de petróleo virgen, mezclar aceites usados para cumplir con la especificación de combustible, filtración, destilación simple, separación química o física y re-refinado. Los requisitos de esta sub parte no se aplican a Transportadores que llevan a cabo operaciones de procesamiento incidentales que ocurren durante el curso normal de transporte según lo dispuesto en §279.41; o Quemadores que realizan operaciones de procesamiento incidentales que ocurren durante el curso normal del manejo del aceite usado antes de quemar según lo dispuesto en §279.61 (b).

Por su parte en Brasil, desde el año 2005 existe una regulación que prohíbe la combustión de los aceites usados y que solo acepta la re-refinación como única opción para su

disposición. La norma que lo regula es la Resolución CONAMA n°09/93 – Rerrefino de Óleo Lubrificante Usado.

5.2. Contexto nacional aceites lubricantes usados

Los aceites lubricantes usados son clasificados como Residuos Peligrosos en el Anexo I, numerales 8 y 9 del Convenio de Basilea⁴ sobre el control de los movimientos transfronterizos de los desechos peligrosos y su eliminación, adoptado por la Conferencia de Plenipotenciarios de la ONU el 22 de marzo de 1989 y ratificado mediante la Ley 253 de enero 9 de 1996 en Colombia. Dicho convenio considera al aceite lubricante usado como uno de los desechos peligrosos que se debe controlar debido a los contaminantes altamente tóxicos que lo componen y que afectan a los seres vivos y al ambiente en su conjunto. Por su parte, el Anexo I 1 del Decreto 4741 de 2005 reglamenta la prevención y el manejo de residuos peligrosos, y clasifica bajo las siglas Y8 y Y9 los aceites usados o sus emulsiones como residuos o desechos peligrosos, así mismo prohíbe quemar residuos o desechos peligrosos a cielo abierto. Este decreto es ratificado en el Decreto 1076 de 2015 - Decreto Único Reglamentario del Sector Ambiente y Desarrollo Sostenible del Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible Título 6 Anexo I.

Según lo establecen la Resolución 415 de 1998 y la Resolución 1446 de 2005, se permite el uso de estos aceites residuales como combustible único o mezclado con otros en hornos y calderas. Y hasta ahora, el manejo de estos aceites y de otros derivados del petróleo se ha realizado mediante tratamiento primario realizado por las pocas plantas que, en el país, se dedican a este propósito. Este proceso consiste en la decantación de los aceites, la filtración de los residuos, la extracción de agua, el retiro de los lodos y la sustracción de una gran proporción de los sólidos en suspensión. Sin embargo, la obligación normativa no obliga a retirar los compuestos y moléculas más peligrosas que se encuentran presentes en los aceites residuales, y de esta manera “el aceite lubricante usado que se quema bajo condiciones no controladas puede emitir más plomo al aire que cualquier otra fuente

⁴ El Convenio de Basilea es un Acuerdo Multilateral sobre Medio Ambiente (AMUMA) por medio del cual 170 país dentro del sistema de Naciones Unidas convinieron proteger el medio ambiente y la salud humana de los efectos nocivos provocados por la generación, manejo, movimientos transfronterizos y eliminación de desechos peligrosos.

industrial, según estudios desarrollados por la Agencia de Protección Ambiental – EPA” (Soto Castaño et al., 2006).

Bajo la vigencia de la Resolución 1446 de 2005, se estableció los casos en los cuales se permite la combustión de aceites de desecho o usados y las condiciones técnicas para realizar la misma, fijando porcentajes de mezcla de aceite usado con otros combustibles que se permiten dependiendo del tipo de combustión en que se utilizan. Esta resolución fijó los límites máximos de contaminantes que se admiten en aceites usados tratados sin hacer mención específica a contaminantes que puedan generarse por su combustión en cualquier forma o cantidad. En tal sentido, existe el riesgo de inadecuadas prácticas de combustión de estos combustibles en hornos y calderas por fuera de los estándares definidos en esta Resolución.

Los porcentajes para mezcla y límites máximos de contaminantes en aceites usados tratados se detallan en la Resolución 1446 de 2005. En su artículo 2 establece las condiciones de uso para el aceite usado sin tratar: a) En el caso de calderas y hornos de tipo industrial o comercial, se podrá emplear mezclado con otros combustibles, en una proporción menor o igual al 5% en volumen de aceite usado; b) En hornos cementeros, en la industria metalúrgica o en plantas de generación de energía, siempre y cuando tengan sistemas de control de emisiones de material particulado de alta eficiencia (mayor al 95%), como combustible único o mezclado con otros tipos de combustibles en cualquier proporción, y c) En ninguno de los casos anteriores, el aceite usado podrá contener concentraciones de bifenilos policlorados (PCB) o terfenilos policlorados (PCT) mayores a 50 ppm ni concentración de halógenos totales (expresado como HCl) mayores a 1.000 ppm.

Para el aceite usado tratado establece el uso en: a) En calderas y hornos de tipo industrial o comercial, se podrá emplear mezclado con otros combustibles, teniendo en cuenta los porcentajes y los límites máximos de contaminantes consagrados en la tabla 11 prevista en el presente artículo; b). Debe tener como mínimo tratamiento primario; c) Los sistemas o equipos de alimentación de combustible deberán poseer mecanismos para su pulverización o atomización y control de alimentación de oxígeno. A continuación, se presentan los límites en concentración de contaminantes (ppm) establecidos para los diferentes tipos de mezclas, que establece la resolución 1446 de 2005:

Tabla 11. Límites máximos de contaminantes para mezcla de aceites usados tratados para uso como combustibles establecidos en la Resolución 1446 de 2005.

Contaminante	Máxima concentración de contaminante (ppm)	
	Para mezcla hasta del 40%	Para mezcla hasta del 80%
PCB	15	5
Halógenos orgánicos totales (como HCl)	0	0
Halógenos totales (Como HCl)	650	400
Cadmio	800	500
Cromo	2	1
Plomo	8	3
Arsénico	50	10
Níquel	2	1
Zinc	1.5	1
Estaño	120	60
Bario	5	3
Punto de chispa (°F, valor mínimo)	3	1
	> 170	> 170

Fuente: Resolución 1446 de 2005

De acuerdo a lo anterior, la combustión de los aceites usados puede sobrepasar así los límites de emisión definidos en la resolución 1309 del 2010 (ver Tabla 12) que establece los estándares de emisión admisibles de contaminantes al aire para fuentes fijas puntuales de actividades industriales; así mismo la resolución 2254 de 2017 que establece modificaciones a la resolución 601 de 2006 denominada la norma de calidad del aire o nivel de inmisión en condiciones de referencia; y la Resolución y 1541 de 2013, cuando estos son quemados sin los controles adecuados. Esa situación la evidencia el documento CONPES 3943 de 2018 denominado Política para el Mejoramiento de la Calidad del Aire, en el cual se establece como prioridad para el gobierno nacional eliminar o sustituir las combustiones de alto impacto. Así mismo, el Decreto 1076 de 2015 - Decreto Único Reglamentario del Sector Ambiente y Desarrollo Sostenible del Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible, en su artículo 2.2.5.1.9.1, numeral 2.1.2 es específico en prohibir la combustión de los aceites usados en los casos de material particulado y dióxido de azufre elevados.

Tabla 12. Estándares de emisión admisibles de contaminantes al aire para actividades industriales a condiciones de referencia (25 °C y 760 mm Hg) con oxígeno de referencia del 11%. Resolución 1309 de 2010. 2008.

Contaminante	Flujo del contaminante (kg/h)	Estándares de emisión admisibles de contaminantes (mg/m ³)	
		Actividades industriales existentes	Actividades industriales nuevas
Material Particulado (MP)	≤ 0,5	250	150
	> 0,5	150	50
Dióxido de Azufre (SO ₂)	TODOS	550	500
Óxidos de Nitrógeno (NO _x)	TODOS	550	500
Compuestos de Fluor Inorgánico (HF)	TODOS	8	
Compuestos de Cloro Inorgánico (HCl)	TODOS	40	
Hidrocarburos Totales (HC _T)	TODOS	50	
Dioxinas y Furanos	TODOS	0,5*	
Neblina Ácida o Trióxido de Azufre expresados como H ₂ SO ₄	TODOS	150	
Plomo (Pb)	TODOS	1	
Cadmio (Cd) y sus compuestos	TODOS	1	
Cobre (Cu) y sus compuestos	TODOS	8	

* Las Dioxinas y Furanos se expresan en las siguientes unidades: (ng-EQT / m³), EQT: Equivalencia de Toxicidad.

Por su parte, la EPA⁵ ha establecido los siguientes límites a los compuestos para los aceites usados. Ver Tabla 13.

Tabla 13. Niveles de Contaminantes Permitidos en los aceites usado por la EPA.

Sustancia	Concentración Máxima Permisible (mg/k-ppm)
Bifenilos policlorinados (PCBs)	50
Halógenos orgánicos totales (como cloro)	1000
Arsénico	5
Cadmio	2
Cromo	10
Plomo	100
Azufre	1.7% en peso

Fuente: EPA, "Operational Parameters for Hazardous Wastes Combustion Devices", EPA/625/R-93/008, Oct./93.

⁵ Agencia Ambiental de Estados Unidos

Por su parte, el parágrafo 2o del artículo 21 del Decreto 4741 de 2005, establece que los fabricantes o importadores de productos que al desecharse se conviertan en residuos peligrosos, deberán presentar ante el Ministerio de Ambiente, Planes de gestión de devolución de productos posconsumo. Estas iniciativas hacen parte de la Política de producción y consumo sostenible que propicia, en la mayoría de los casos, la devolución de dichos productos por parte de los consumidores, cuando se convierten en residuos al entrar en desuso. Sin embargo, los planes posconsumo para el manejo de los aceites lubricantes usados no han desarrollados por el Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible, principalmente por las escasas alternativas tecnológicas disponibles en Colombia para su tratamiento integral.

Teniendo en cuenta que Colombia no cuenta con planes de gestión posconsumo para todos los residuos peligrosos según el Decreto 4741 de 2005 y hasta hoy no se ha generado ninguno para los aceites lubricantes usados, no hay garantía de que todos los aceites usados sean adecuadamente recolectados y dispuestos así exista un manual técnico para el manejo de los aceites lubricantes usados. En este sentido, hasta hoy el único acercamiento a un plan posconsumo para los aceites usados ha sido la resolución 1446 de 2005 que permite usar los aceites usados en mezclas como combustibles industriales.

El hecho de que exista una legislación para el transporte de sustancias peligrosas como el Decreto 1079 de 2015 (compilatorio del Decreto 1609 de 2002) no garantiza que todos los aceites usados sean recolectados y dispuestos adecuadamente ya que lo único que legisla es su transporte como materiales peligrosos.

De manera alternativa la Ley 1252 DE 2008 dicta normas prohibitivas en materia ambiental, referentes a los residuos y desechos peligrosos, en este sentido, la tecnología de Re-refinación permite hacer un aprovechamiento ambientalmente seguro de los aceites usados en cumplimiento de los principios de esta ley. Y de manera complementaria, la NTC 5995 de 2013 establece los requisitos que deben cumplir y los ensayos a los cuales deben someterse las bases lubricantes re-refinadas que se comercialicen en Colombia, obtenidas a partir de aceites lubricantes usados, y que van a usarse como materia prima en la elaboración de aceites y grasas lubricantes.

A lo mencionado, se agregan los principios de la Ley 1252 de 2008, que aplican para el manejo adecuado de los aceites usados en condición de residuo peligroso:

2. Minimizar la generación de residuos peligrosos mediante la aplicación de tecnologías ambientalmente limpias y la implementación de los planes integrales de residuos peligrosos. 4. Diseñar planes, sistemas y procesos adecuados, limpios y eficientes de tratamiento, almacenamiento, transporte, reutilización y disposición final de residuos peligrosos que propendan al cuidado de la salud humana y el ambiente. 5. Implementar estrategias y acciones para sustituir los procesos de producción contaminantes por procesos limpios; inducir la innovación o reconversión tecnológica, las buenas prácticas de manufactura o la transferencia de tecnologías apropiadas; formar los recursos humanos especializados de apoyo; estudiar y aplicar los instrumentos económicos adecuados a las condiciones nacionales para inducir al cambio en los procesos productivos y en los patrones de consumo. 8. Desarrollar planes y actividades acordes con la Política Ambiental para la Gestión Integral de Residuos o Desechos Peligrosos que resuelvan los graves problemas que conllevan la generación y el manejo inadecuado de los residuos peligrosos. Y 12. Generar modelos eficientes de gestión de residuos peligrosos, que, con apoyo de la ingeniería y la tecnología disponibles, se aproximen a la realidad ambiental del país y sirvan como herramientas de prevención, vigilancia y contingencia.

Por su parte, el Documento CONPES 3874 de 2016 establece la política nacional para la gestión integral de residuos sólidos, y que se inserta en la agenda internacional relacionada con el cumplimiento de las metas establecidas por el país en el acuerdo COP 21; en particular, reducir las emisiones de gases efecto invernadero (GEI) en 20% para el año 2030, y en estas metas pueden aportar las tecnologías que realizan disposición y tratamiento de los aceites lubricantes usados.

Así mismo, el documento CONPES 3943 de 2018 denominado Política para el Mejoramiento de la Calidad del Aire, establece las acciones para reducir las concentraciones de contaminantes en el aire. Como consecuencias de la baja calidad del aire en Colombia, para el año 2015 se asociaron más de 8.000 muertes por cáncer de pulmón y enfermedad cardiovascular en mayores de 44 años, y 22 muertes por todas las causas en menores de 5 años, así como 67 millones de enfermedades y síntomas respiratorios, además de restricción en el desarrollo de actividades y atenciones en los

servicios de urgencias y hospitalización por causas respiratorias. Los costos estimados por estas causas ascendieron a 12,3 billones de pesos, equivalentes al 1,5 % del PIB de 2015 (DNP, 2018).

En este sentido, la Organización Mundial de la Salud (OMS) definió en el año 2005 guías de calidad del aire relativas al material particulado, el ozono (O₃), el dióxido de nitrógeno (NO₂) y el dióxido de azufre (SO₂), en las que recomienda valores para la concentración de contaminantes en el aire como orientación para que los gobiernos fijen metas considerando sus condiciones locales en pro de la protección de la salud. Los valores guía para material particulado inferior a 2,5 micras (PM_{2.5}) es de 10 microgramos por metro cúbico (µg/m³) para un tiempo de exposición anual y de 25µg/m³ para 24 horas; para material particulado inferior a 10 micras (PM₁₀) el valor anual es de 20µg/m³ y el de 24 horas es de 50µg/m³. Para el ozono el valor es de 100µg/m³ para 8 horas. Reconociendo que estos niveles guía deben ser alcanzados de manera gradual, se proponen objetivos intermedios para cada contaminante, en donde el de nivel III es el más cercano al nivel guía (OMS, 2005). La Organización para la Cooperación y Desarrollo Económicos (OCDE) recomendó a Colombia en 2014 adoptar de manera progresiva estas guías de calidad del aire (OCDE, 2014) ”.

Finalmente, se resalta que actualmente el congreso de la república, y desde hace dos legislaturas, viene trabajando un proyecto de ley, a través de la comisión 5ª de la Cámara de Representantes, “por la cual se establecen las condiciones de disposición final segura de los aceites lubricantes usados y de los aceites industriales usados en el territorio nacional y se prohíbe la combustión de los mismos o su reutilización parcial o total sin tratamiento de transformación”.

A manera de síntesis se presentan la normatividad principal para los aceites lubricantes usados en Colombia, contenida en la siguiente tabla.

Tabla 14. Matriz normativa para los aceites lubricantes usados en Colombia

Año	Norma	Descripción
1996	Ley 253 de 1996	La cual aprobó el Convenio de Basilea, sobre el control de los movimientos trasfronterizos de los desechos peligrosos y su eliminación, en la que se consagra el principio del manejo ambiental racional de los desechos peligrosos debidamente clasificados en el anexo 1 de la misma, dentro de los cuales se incluyen los aceites usados.

Año	Norma	Descripción
1998	Resolución 415 de 1998	Por la cual se establecen los casos en los cuales se permite la combustión de aceites de desecho y las condiciones técnicas para realizar la misma.
1998	Ley 430 de 1998	Por la cual se dictan normas prohibitivas en materia ambiental, referentes a los residuos y desechos peligrosos y se dictan otras disposiciones.
1998	Corte Constitucional mediante Sentencia C771/98,	Todos los desechos peligrosos deben eliminarse por cuanto no representan ninguna utilidad, lo cual no es cierto ya que existen algunos que mediante las operaciones de reciclado, regeneración o reutilización pueden constituirse en elementos primarios o secundarios útiles para la fabricación de otros productos o para otras actividades"
2001	Ley 697 de 2001	Energías alternativas: Mediante la cual se fomenta el uso racional y eficiente de la energía, se promueve la utilización de energías alternativas y se dictan otras disposiciones.
2005	Resolución 1446 de 2005	Por la cual se modifica parcialmente la resolución 415 del 13 de marzo de 1998, que establece los casos en los cuales se permite la combustión del aceite de desecho o usado y las condiciones técnicas para realizar la misma.
2005	Decreto 4741 de 2005	Por el cual se reglamenta parcialmente la prevención y el manejo de los residuos o desechos peligrosos generados en el marco de la gestión integral.
2006	Resolución 1402 de 2006	Por la cual se desarrolla parcialmente el decreto 4741 del 30 de diciembre de 2005, en materia de residuos peligrosos.
2008	Ley 1252 de 2008	Por la cual se dictan normas prohibitivas en materia ambiental, referentes a los residuos y desechos peligrosos y se dictan otras disposiciones.
2010	Resolución 1309 de 2010	Que modifica la Resolución 909 de 2008 este Ministerio estableció las normas y estándares de emisión admisibles de contaminantes a la atmósfera por fuentes fijas.
2013	NTC 5995	Petróleo y sus derivados lubricantes re-refinadas
2015	Decreto 1076 de 2015	Compiló el decreto 4741 de 2005. Por el cual se reglamenta parcialmente la prevención y el manejo de los residuos o desechos peligrosos generados en el marco de la gestión integral.
2016	Decreto 1076 de 2016	Compiló el decreto 2041 de 2014 establece que el almacenamiento de aceites usados es una actividad que se realiza para el bodegaje de aceite usado de uno o varios generadores para su posterior tratamiento. Requiere para su instalación, funcionamiento y desmantelamiento, de la expedición de una licencia ambiental por parte de la autoridad ambiental competente.
2016	CONPES 3874	Establece la política nacional para la gestión integral de residuos sólidos, y que se inserta en la agenda internacional

Año	Norma	Descripción
		relacionada con el cumplimiento de las metas establecidas por el país en el acuerdo COP 21; en particular, reducir las emisiones de gases efecto invernadero en 20% para el año 2030, así como el logro de cuatro metas en los objetivos relacionados con ciudades y comunidades sostenibles (11.6) y con producción y consumos responsables (12.3, 12.4 y 12.5).
2017	Resolución 2254 de 2017	Establece la norma de calidad del aire o nivel de inmisión y adopta disposiciones para la gestión del recurso aire en el territorio nacional para garantizar un ambiente sano y minimizar el riesgo sobre la salud humana.
2018	CONPES 3918	Estrategia para la implementación de los Objetivos de Desarrollo Sostenible (ODS) en Colombia.
2018	CONPES 3943	Establece la política para el mejoramiento de la calidad del aire. Esta política propone acciones para reducir las concentraciones de contaminantes en el aire a través de la renovación y modernización del parque automotor, la reducción del contenido de azufre en los combustibles, la implementación de mejores técnicas y prácticas en la industria, la optimización de la gestión de la información, el desarrollo de la investigación, el ordenamiento del territorio y la gestión del riesgo por contaminación del aire.

Fuente: Elaboración propia.

A partir del marco conceptual y normativo presentado en el capítulo 4 y 5 de esta tesis respectivamente, se presenta en la figura 5 un resumen conceptual del aceite lubricante usado desde varias ópticas, que comprende la síntesis como compuesto químico, la funcionalidad industrial y por último un detalle desde ámbito ambiental y normativo; con el propósito de dar paso al desarrollo metodológico de análisis de ciclo de vida comparativo para el aceite lubricante usado desarrollado en este trabajo.

COMPUESTO

- Aceite residual que fue usado como lubricante de motor, de transmisión o hidráulico. Funcionó como agente antifricción, anti-desgaste y antioxidante.
- Fluido que fue: sellante, refrigerante, dispersante, antioxidante o detergente.
- Compuesto con una base mineral o sintética (**~75%**) y un paquete de aditivos (**~1-25%**) desgastados por el uso.
- Resultante del uso de **5.000 a 10.000** diferentes formulaciones en aplicaciones lubricantes en el mercado (90%).
- Compuesto contaminado con metales pesados y otros (Hierro, Cobre, Sílice, Aluminio, Cromo, Plomo, Estaño, Sodio, Potasio, Níquel, Magnesio, Calcio, Fosforo, Zinc, Magnesio, Azufre).

INDUSTRIAL

- Excedente de la operación que puede generar ingresos por su comercialización.
- Aceite residual aprovechable como combustible único o mezclado con otros en hornos y calderas | (Resolución 1446 de 2005).
- Materia prima de proceso para la industria del reciclaje ALU y subproductos petroquímicos.

AMBIENTAL Y NORMATIVO

- Es un contaminante persistente y peligroso, altamente tóxico que afecta a los seres vivos y al ambiente en su conjunto según el convenio de Basilea (1989) y ratificado en Colombia (Ley 253 1996).
- Emulsión peligrosa que debe ser dispuesta (fin de la vida) bajo condiciones controladas, y esta prohibida su quema a cielo abierto (Decreto 1076 de 2015).
- Compuesto que bajo proceso deben cumplir con la norma de calidad del aire (CONPES 3943 de 2018 y Resolución 2245 de 2017)
- Tóxicos para la salud humana: Combustión de ALU sin control de emisiones atmosféricas o falsificado.
- Recurso que reciclado puede aportar a la reducción de GEI y a las Metas ODS Colombia. CONPES 3918 de 2018.

Figura 5. Resumen conceptual del aceite lubricante usado visto como compuesto, desde la industria y el marco ambiental y normativo.

Fuente: Elaboración propia.

6. MARCO CONCEPTUAL: METODOLOGÍA ANÁLISIS DE CICLO DE VIDA -ACV-

Para alcanzar los objetivos de desarrollo sostenible planteados por la ONU, es necesario contar con herramientas integrales y sólidas que ayuden a la toma de decisiones de manera objetiva. Estas decisiones deben tener un contexto integral de los ecosistemas, los recursos extraídos y los sistemas productivos. Por lo cual considerar el ciclo de vida de los productos y todos sus impactos puede permitir entender como estos afectan el sistema y los puntos críticos para encontrar soluciones. A raíz de esto surge el análisis de ciclo de vida (ACV), una disciplina con menos de 30 años de desarrollo (Hauschild, 2017).

El análisis del ciclo de vida (ACV; LCA en nomenclatura inglesa) según la norma ISO 14040/14044 es un instrumento de gestión medioambiental y de sostenibilidad. El objetivo del ACV es estudiar los impactos ambientales realizados y potenciales de un producto o de una actividad a lo largo de su vida, es decir toda la "historia" del producto, desde su origen como materia prima hasta su final como residuo, incluyendo todas las fases intermedias como transporte, preparación de materias primas, manufactura, transporte a mercados, distribución, uso, entre otras (Leiva, 2016). Es decir, un ACV es una cuantificación de los impactos ambientales (e.g., consumo de energía, producción de residuos etc.) de un producto generados a lo largo de su ciclo de vida (Leiva, 2016).

Tipos de Análisis de Ciclo de Vida

De acuerdo con Baumann et al. 2004, el análisis de ciclo de vida puede ser de tres tipos, según las fases del proceso que se incluyen:

- **Cradle to grave (de la cuna a la tumba)**: este análisis de ciclo de vida se realiza desde la extracción de las materias primas para elaborar el producto hasta la disposición o eliminación de los residuos, que coincide con el fin de la vida útil del producto.

- **Cradle to gate (de la cuna a la puerta):** este análisis de ciclo de vida, no incluye las etapas de uso y eliminación de productos.
- **Cradle to Cradle (de la cuna a la cuna):** este análisis considera desde la extracción de las materias primas para elaborar el producto hasta el reuso y reciclado de los productos, logrando un sistema libre de residuos.

6.1. Las normas ISO como estándar metodológico

La metodología para el desarrollo del análisis del Ciclo de Vida y los requerimientos para desarrollar cada una de las fases está consignado en la norma ISO 14040. Los estándares de la serie ISO 14040 se refieren a la metodología ACV, la cual tiene diferentes aplicaciones, como son el desarrollo de productos, el ecoetiquetado, la huella de carbono y otros tipos de huellas. El desarrollo del estándar resultó en la adopción y publicación de cuatro estándares. La norma ISO 14040 aborda los principios y el marco, la norma ISO 14041 aborda la definición del objetivo y el alcance, la norma ISO 14042 aborda la evaluación del impacto del ciclo de vida y la vida útil y la norma ISO 14043 aborda la interpretación del ciclo. En una revisión de 2006, se compilaron los tres últimos en el estándar ISO 14040 que detalla los requisitos y directrices, sin cambiar ningún requisito en los estándares. De acuerdo a la norma ISO 14040, las siguientes son las fases generales para el desarrollo de un análisis de ciclo de vida: objetivo y alcance del estudio, análisis del inventario, análisis del impacto e interpretación. Ver Figura 6.

Fases de desarrollo de un análisis de Ciclo de Vida

Las principales fases para la aplicación de la metodología se plantean en cuatro fases. En la Fase uno la definición del objetivo y el alcance del análisis, en la fase dos se desarrolla el análisis de inventario, en la fase tres la evaluación del impacto y en la fase cuatro la interpretación de los resultados. El desarrollo y aplicación de estas fases es un proceso iterativo, en el cual ocurre una retroalimentación permanente entre las fases desde el principio hasta el fin de la evaluación del ciclo de vida del producto o del servicio. Ver figura 6.

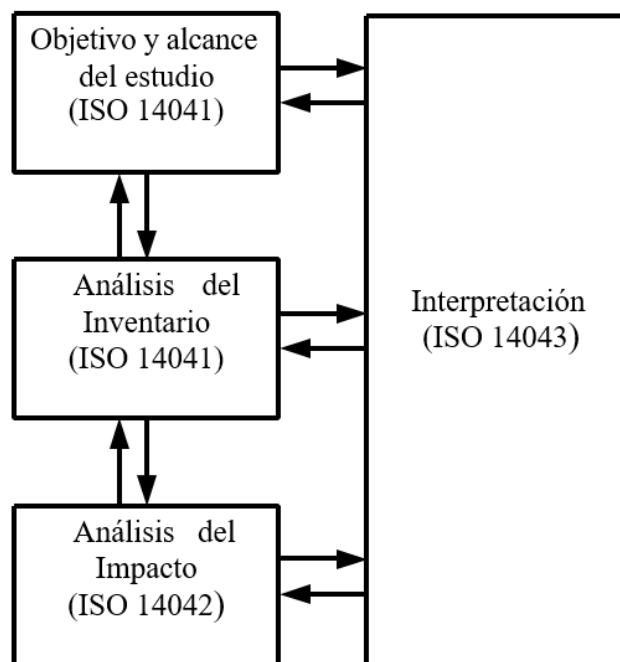


Figura 6. Las fases de un ACV de acuerdo a ISO 14040

6.2. Metodología particular ciclo de vida ALU -fase fin de la vida-

6.2.1. Condiciones de entrada y diseño metodológico particular

El ACV aplicado a los sistemas de gestión de residuos es conocido como "ACV de residuos", el cual incluye solo la fase de fin de vida útil de un producto, y normalmente omite los impactos producidos en fases previas al reciclaje bajo el supuesto de carga cero según (Ekval et al. 2007). Estos sistemas parten del principio que la actividad de reciclaje es beneficiosa en la medida en que reduce la cantidad de material primario producido por cambio de demanda del material primario al secundario (Zink et al. 2015). Sin embargo, la complejidad de los ACV de residuos, se deriva principalmente de la variabilidad de los materiales que componen el residuo, las cuales pueden requerir diferentes tratamientos (Hauschild, 2017), y por esta razón que es un desafío metodológico lograr la asignación de impactos ambientales en los sistemas de reciclaje. Aparte del tipo de proceso, también se

debe considerar que en muchos casos el tratamiento de residuos ocurre localmente, cerca de la fuente de desechos, y este hecho, facilita la recogida de datos específicos del sitio y por lo tanto, aumenta la resolución geográfica de la evaluación (Hauschild, 2017).

Los procesos de reciclaje usualmente son sistemas multiproducto, que proporcionan el servicio de reciclaje en primera medida y a su vez entregan otros productos a partir de la recuperación de materiales útiles. Estos sistemas multiproducto, pueden ser sistemas de reciclaje de circuito cerrado y abierto. En el sistema cerrado, tanto el reciclado como los materiales vírgenes se utilizan en el mismo sistema productivo, y los residuos del mismo proceso se reciclan para producir nuevos productos del mismo tipo y no se generan nuevos productos. Por el contrario, en los sistemas de reciclaje de circuito abierto los materiales de desecho se transforman en otros productos que pueden tener nuevos usos, y pasan de un sistema productivo a otro. En este último caso, el reciclaje es un proceso eslabón, que conecta el ciclo de vida útil de un producto primario, con el ciclo de vida útil de un producto secundario y ambos productos provienen de las mismas materias primas.

Los procesos multifuncionales constituyen un desafío metodológico en el ACV, ya que se basa en la idea de analizar los sistemas de producto a partir de las funciones principales que proporcionan para determinar el impacto ambiental de cada producto resultante del proceso (Hauschild, 2017). Para resolver problemas de multifuncionalidad, la norma ISO 14044 presenta una jerarquía de soluciones para hacer diferentes productos sistemas funcionalmente comparables, uno de los casos para un sistema multiproducto, es aumentar la resolución de los procesos unitarios, y subdividirlos en unidades menores que se asignan a cada salida del proceso. Ver *Figura 7*.

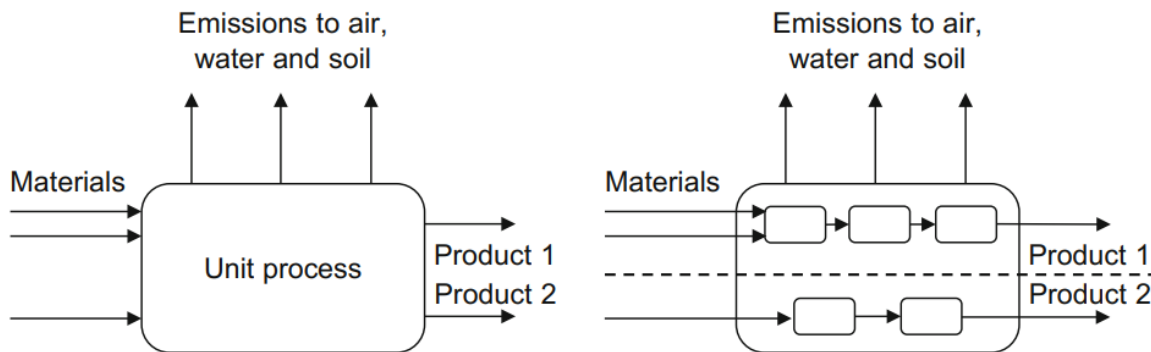


Figura 7. Proceso multifuncional con subdivisión de procesos unitario. (Hauschild, 2017).

6.2.2. Proceso para la asignación de cargas ambientales y evaluación energética

Este procedimiento para la asignación de cargas ambientales elegido para aplicar en este estudio, plantea sustituir la producción primaria evitada a partir de la cantidad reutilizada del bien reciclado o la energía recuperada. Se aplicará el enfoque de sustitución de la reciclabilidad, con la simplificación de sustituir la mezcla de consumo de ruta primaria promedio del mercado donde se produce el bien secundario. Se deben tener en cuenta las diferencias en la funcionalidad entre la función sustituida y reemplazada, para lo cual se considerarán y sustituirán las cantidades realmente reemplazadas (Hauschild, 2017).

Gala et al. (2015) mencionan que la mayoría de los estudios revisados asumen una relación de sustitución 1:1 entre la producción de material primario y secundario y/o la calidad similar al producto sustituido. Sin embargo, una relación de sustitución o grado sobreestimado de los materiales recuperados puede afectar significativamente los beneficios obtenidos del reciclaje y se han propuesto métodos alternativos basados en el consumo promedio en el mercado de mezclas de materiales primarios y secundarios para calcular los créditos ambientales del material al final de su vida útil. En los casos en los cuales un producto secundario de menor carga ambiental, proveniente de un proceso de reciclaje, sustituye a un material de mayor carga ambiental, los impactos ambientales ya no pueden atribuirse completamente al ciclo de vida del producto primario. En este caso, se aplica el enfoque de sustitución de cargas ambientales, los cual puede conducir a cargas netas negativas del ciclo de vida cuando se aplica a un circuito abierto de un proceso de reciclaje (Hauschild, 2017).

De manera complementaria a la evaluación de impactos ambientales, se realiza un perfil energético mediante el indicador Demanda de Energía Acumulada (CED) en las categorías de energía fósil, hídrica y geotérmica. Pero el impacto ambiental de un producto o servicio no puede ser estimado sólo en función de la demanda energética. Este método solo tiene sentido en combinación con otros métodos. Sin embargo, se recomienda tener cuidado especial cuando se combinan metodologías para evitar la doble contabilización en el paso de la ponderación de los EICV (Niembro & Gonzalez, 2008). En general, el método DEA expone toda la demanda, valorada como energía primaria, que se plantea en relación con la producción, uso y disposición de un producto o servicio. Por lo tanto, es un indicador

como tal, de los impactos ambientales en lo que respecta al rendimiento energético de los sistemas de generación de energía en su ciclo de vida (Niembro & Gonzalez, 2008). Existen diferentes conceptos para determinar el requerimiento de energía primaria. Por cálculos CED, se puede elegir el poder calorífico inferior o bien el superior de los recursos energéticos primarios si estos últimos incluyen la energía de evaporación del agua presente en los gases de combustión.

6.2.3. Tratamiento metodológico ACV para el estudio de caso

A partir de lo enunciado, se presenta el tratamiento metodológico particular para este caso de estudio, que corresponde al análisis del ciclo de vida del aceite lubricante usado -ALU- que es recuperado mediante tecnologías para permitir su reuso en el sector industrial y petroquímico. Estas particularidades se presentan en la tabla 15, en la cual se relacionan las condiciones de entrada del análisis del estudio de caso, el tratamiento específico que se le asigna a cada condición de entrada y su relación con las condiciones particulares del análisis de ciclo de vida.

Tabla 15. Condiciones metodológicas particulares para el estudio de caso y el tratamiento desde el ACV.

Condiciones de entrada	Tratamiento	Particularidad ACV
Fase del fin de la Vida de un ALU	" <u>supuesto de carga cero</u> ": Las etapas previas del ciclo de vida de un residuo pueden ser omitido.	Análisis fase fin de la vida: ACV residuos
Sistema de gestión de residuos: Procesos tecnológicos	Las <u>cargas ambientales</u> del tratamiento de ALU se asignan a Re-refinación y Valorización energética.	
- Múltiples generadores del ALU - Múltiples compradores de los subproductos reciclados secundarios.	<u>Enfoque de corte</u> : asignación por masa - ALU: no brindan ningún beneficio al usuario principal de los materiales. - Los impactos de materiales reciclados secundarios son solo los de los procesos de reciclaje y el transporte asociado.	
Comparación de dos sistemas multifuncionales-multiproducto	El <u>enfoque atribucional</u> : Se usan procesos unitarios promedio para resolver los sistemas multifuncionales.	Análisis comparativo descriptivo:

Condiciones de entrada	Tratamiento	Particularidad ACV
Un sistema proporciona el material de desecho para ser reciclado.	Los <u>impactos ambientales</u> no se atribuyen completamente al sistema de producto estudiado, sino a los otros sistemas con los cuales interactúa el sistema multiproducto (<u>subproductos</u>).	Re-refinación (Sistema principal) Valorización energética (sistema de referencia).
Otro sistema utiliza el desecho como material de entrada.		
Los subproductos de un sistema de reciclaje ingresan a otro sistema de producto.	Se asignan <u>créditos</u> de reciclaje derivados de la <u>producción evitada</u> de materias primas y contaminación.	

Fuente: Elaboración propia.

6.2.4. Límites de la metodología ACV para el estudio de caso

Las siguientes limitaciones se encuentran en la aplicación de la metodología del análisis de ciclo de vida de acuerdo a (Hauschild, 2017):

- Para realizar la evaluación ambiental se asume el principio de “mejor estimación”, es decir, se realiza la evaluación de los modelos de –ACV- basados en el desempeño promedio de los procesos y no se considera la ocurrencia de riesgos o eventualidades problemáticas que puedan afectar los resultados de la evaluación, tales como derrames u otras anomalías del proceso productivo.
- Los resultados de la evaluación ambiental entregan categorías de impacto de carácter global, por lo tanto, no es posible evaluar impactos ambientales locales o en un tiempo determinado para los procesos considerados.
- El análisis de ciclo de vida -ACV- y su evaluación ambiental no permite determinar riesgos localizados para los procesos analizados.
- El análisis realizado se limita a evaluar aspectos ambientales y energético, por lo tanto, no se presentan resultados para aspectos económicos ni sociales.
- Los resultados de la evaluación ambiental del –ACV- representa impactos potenciales y (generalmente) no predicciones de impactos observables.
- Si bien ACV puede decirle qué (sistema de producto) es mejor para el medio ambiente, no puede decirle si mejor es "suficientemente bueno". Por lo tanto, es incorrecto concluir que un producto es ambientalmente sostenible, en términos absolutos, con referencia a

un ACV que muestra que el producto tiene un impacto ambiental menor que otro producto.

- Se realiza un análisis comparativo descriptivo entre dos procesos, pero eso no implica que uno de los dos procesos sea el mejor en términos absolutos.
- Para la evaluación de los impactos relacionados con emisiones atmosféricas a partir de sus flujos elementales, se comparan con relación a los niveles críticos establecidos en la norma o los factores de caracterización de las categorías ambientales evaluadas y no considera el comportamiento de esas emisiones en condiciones meteorológicas particulares.

6.2.5. Descripción de las fases del ACV para el estudio de caso

A continuación, se describen las fases para el análisis de ciclo de vida correspondiente al fin de la vida de los aceites lubricantes usados, que incluye los cuatro fases que se desarrollan par cualquier ACV, sin embargo, se describen aspectos específicos en cada una de las fases descritas:

6.2.6. Fase 1: Definición del objetivo y el alcance:

En esta fase se define el tema de estudio y se incluyen los motivos que llevan a realizarlo. En esta fase se establece la unidad funcional, la cual describe la función principal del sistema analizado. Un ACV no sirve para comparar productos entre sí, sino servicios y/o cantidades de producto que lleven a cabo la misma función. (Leiva, 2016). Teniendo en cuenta que la aplicación de un ACV sobre un sistema de reciclaje cumple parámetros de un proceso multifuncional, se presenta a continuación un marco de referencia que permitirá delimitar el alcance del estudio con esta condición particular.

6.2.7. Fase 2: Análisis de inventario

Un modelo de inventario de ciclo de vida (ICV) tiene como objetivo vincular todos los procesos individualmente que se requieren para entregar los productos estudiados en un

ACV. El resultado es un inventario de las cantidades agregadas de flujos elementales, separados en recursos y emisiones, de todos los procesos unitarios dentro del límite del sistema (Hauschild, 2017). La descripción de los flujos reales del sistema y sus subsistemas, se representa mediante las relaciones físicas entre entradas y salidas de los procesos, en diagramas de flujos de los procesos promedio en un momento particular. La obtención de datos y los procedimientos de cálculo se realizan para identificar y cuantificar la salida o entrada de materia o energía de un sistema que causan un efecto ambiental negativo. Con esta definición se incluyen tanto las emisiones de gases contaminantes, como los efluentes de aguas, residuos sólidos, consumo de recursos naturales, ruidos, radiaciones, olores, etc. Cuando se trabaje con sistemas que impliquen varios productos, en esta fase se procederá a asignar los flujos de materia y energía, así como las emisiones al medio ambiente asociadas a cada producto o subproducto (Leiva, 2016).

La norma ISO 14044 plantea tres enfoques jerárquicos para abordar el análisis de inventario de los sistemas multifuncionales. El primer enfoque corresponde a la subdivisión y separación de procesos físicos, aumentando la resolución del modelado y veracidad en la asignación a cualquiera de las salidas funcionales. Cuando este no sea el caso, se aplica el segundo enfoque que propone realizar una expansión del sistema, el cual matemáticamente es equivalente a acreditar la producción evitada, de esta manera el crédito por la producción evitada se usa generalmente para contabilizar funciones secundarias en un análisis donde hay una comparación de dos sistemas alternativos, siendo este enfoque el que se aplica en este estudio.

Principios de aplicación de los Análisis de Inventario del Ciclo de Vida

Según (Hauschild, 2017) la aplicación del inventario en el análisis de ciclo de vida –IACV– sigue los siguientes principios:

- Estado estable: el modelo de inventario no es dinámico, y representa el medio ambiente como un sistema estable que su comportamiento no cambian con el tiempo.
- Linealidad: el modelo de caracterización asume condiciones de estado estacionario, lo que implica una relación lineal entre el aumento en un flujo elemental y el consiguiente aumento de su impacto ambiental potencial.

- Modelado marginal versus modelado promedio: El enfoque de modelado de impacto promedio es estrictamente lineal y representa un impacto medio.
- Impactos potenciales: los resultados del análisis de inventario no son impactos reales o previstos, ni superación de umbrales o márgenes de seguridad, o riesgo.
- Conservación del balance de masa / energía y masa / energía: la masa / energía no se puede crear o desaparecer, solo se puede transferir.
- Parsimonia: se refiere al principio básico de modelado de "lo más simple posible y tan complejo como sea necesario", un equilibrio ideal que se aplica tanto a los modelos de caracterización de AICV como a todo el enfoque de ACV.
- Relatividad: los resultados de ACV son expresiones relativas de impactos que se relacionan con una unidad funcional y se puede comparar entre diferentes alternativas proporcionando la misma función.

6.2.8. Fase 3: Análisis de Impactos:

La estructura de esta fase viene determinada por la normativa ISO 14042, distinguiendo entre elementos obligatorios y elementos opcionales. Los elementos considerados obligatorios son la selección de las categorías de impacto; la clasificación de cada categoría de impacto asignada a los datos procedentes del inventario; y la caracterización que asigna factores de caracterización de los datos del inventario para cada una de dichas categorías de impacto. Los elementos opcionales son Normalización, agrupación, ponderación y análisis de la calidad de los datos. (Leiva, 2016).

El método "ReCiPe6 2008 de punto medio, jerárquico (H) no largo plazo V1.13", se enfoca en la evaluación de impactos ambientales de corto plazo con enfoque global y jerárquico que se alinea con el planteamiento del método científico. El objetivo principal del método ReCiPe es transformar la larga lista de resultados del inventario del ciclo de vida en un número limitado de indicadores ambientales, a partir de las 18 categorías de impacto ambiental de punto medio que contiene, y expresar la gravedad relativa de cada categoría de impacto ambiental mediante una puntuación, a partir de factores de caracterización.

⁶ Este método está disponible en el Software Umberto.

a. Impactos ambientales evaluados mediante el método de punto medio “midpoint”:

Las categorías de impacto “nivel medio” considera impactos tales como cambio climático, agotamiento del ozono (estratosférico), toxicidad humana, Inorgánicos respiratorios, radiación ionizante, formación fotoquímica de ozono, Acidificación (tierra y agua), Eutrofización (tierra y agua), Ecotoxicidad (agua dulce, marina, terrestre), uso del suelo, agotamiento de recursos (de minerales, recursos energéticos fósiles y renovables, agua). Se describen a continuación las categorías de impacto ambientales, seleccionadas para este estudio a partir de los principales componentes del inventario de los procesos evaluados que son: Cambio climático, ecotoxicidad del agua, eutrofización del agua, toxicidad humana, ecotoxicidad marina, agotamiento del ozono, formación de oxidantes fotoquímicos, formación de partículas, acidificación terrestre, agotamiento de petróleo y de los metales. A continuación, se detallan estas categorías de impacto a partir de las descripciones contenidas en el libro de (Hauschild, 2017).

Potencial de Cambio Climático⁷:

El Panel Intergubernamental sobre Cambio Climático (2014a) (IPCC) define el cambio climático como “un cambio en el estado del clima que se puede identificar por cambios en la media y/o la variabilidad de sus propiedades, y que persiste durante un período prolongado, generalmente décadas o más”. Además de procesos naturales, las actividades antropogénicas también contribuyen a este efecto aumentando su intensidad y creando un calentamiento global más acelerado, que se refiere al fenómeno de aumento de la temperatura de la superficie en todo el planeta en promedio durante períodos de tiempo más largos.

Los gases de efecto invernadero –GEI- que están presentes de forma natural en la atmósfera contribuyen al efecto invernadero natural son: 55% de Vapor de agua, 39% de Dióxido de carbono (CO₂), 2% de Ozono (O₃), 2% de Metano (CH₄) y 2% de Óxido nitroso (N₂O). Dada la inercia de la atmósfera, procesos oceánicos y el clima global, se espera que

⁷ En la evaluación de impactos ambientales realizada en el Software Umberto se encuentra como Climate Change –GWP-.

el calentamiento global continúe durante el próximo siglo. Incluso si las emisiones de GEI de origen antrópico se detuvieran de inmediato, el calentamiento global continuaría y solo se ralentizaría durante muchas décadas. Para la caracterización del punto medio en términos de horizonte de tiempo, la mayoría de los análisis usan 100 años, que ha sido recomendado por IPCC como la mejor base para la comparación de GEI. GWP100-year se utiliza directamente en LCIA como factor de caracterización, es la relación del forzamiento de la radiación acumulada durante 100 años de un determinado GEI y CO₂, con la unidad k CO₂-eq / k GEI.

Por lo tanto, el GWP para el CO₂ es siempre 1 y un GWP100 para el metano de 28 k CO₂-eq/ K metano. Significa que el metano tiene 28 veces el forzamiento radiactivo acumulado del CO₂ cuando se integra durante 100 años. La diferencia en GWP20 y GWP100 para el metano se debe al hecho de que el metano tiene una vida atmosférica relativamente corta de 12 años en comparación con la vida útil del CO₂, que es al menos un orden de magnitud mayor, lo que significa que el GWP del metano es menor, entre más largo el horizonte de tiempo sobre el que está integrado (es decir, una especie de 'dilución' de su efecto durante un tiempo más largo). GWP100-year se utiliza directamente en LCIA como factor de caracterización, es la relación del forzamiento radiactivo acumulado durante 100 años de un determinado GEI y CO₂, con la unidad k CO₂-eq / k GEI.

Agotamiento del ozono estratosférico⁸:

El agotamiento del ozono estratosférico expresa esencialmente la reducción global de concentración de O₃ estratosférico debido al incremento de diferentes compuestos como CH₄, N₂O, H₂O y sustancias halogenadas con suficiente estabilidad y / o tasas de liberación para permitirles alcanzar la estratosfera. Todas las sustancias que agotan la capa de ozono tienen dos características comunes: químicamente muy estable en la atmósfera inferior y capaz de liberar cloruro o bromuro bajo radiación UV (fotodisociación). El ciclo anual de destrucción del ozono sobre los polos se desarrolla bajo la presencia de varios factores dependiendo de su intensidad: (1) factores meteorológicos (es decir, fuerte vientos estratosféricos y baja temperatura) y (2) la presencia de gases que agotan la capa de ozono

⁸ En la evaluación de impactos ambientales realizada en el Software Umberto se encuentra como Stratospheric Ozono Depletion –ODP-.

(i.e., productos químicos). Los factores químicos involucran la presencia de compuestos de cloro y bromo en la atmósfera como contribuyentes importantes a la destrucción del ozono. La mayoría de los compuestos de cloro y la mitad de los compuestos de bromo que llegan a la estratosfera provienen de las actividades humanas. La concentración de ozono se considera críticamente baja cuando el valor de la columna de ozono cae por debajo de 220 unidades Dobson (un valor normal es de aproximadamente 300 Unidades Dobson). Las unidades Dobson expresan la totalidad del ozono en una columna de suelo pasando por la atmósfera.

Acidificación⁹:

La acidificación del suelo o los ecosistemas acuáticos se puede definir como un impacto que conduce a una caída en la capacidad de neutralización del pH ácido del sistema (ANC por sus siglas en inglés). Es decir, una reducción en la cantidad de sustancias en el sistema que pueden neutralizar los iones de hidrógeno agregados. El ANC se puede reducir mediante i) la adición de iones de hidrógeno, que desplazan otros cationes que luego pueden ser lixiviados del sistema y ii) la captación de cationes en plantas u otras fuentes de biomasa que se recolecta y elimina desde el sistema. La acidificación ocurre de forma natural con el tiempo, pero se incrementa en gran medida por la entrada de iones de hidrógeno al suelo y la vegetación.

La principal fuente de estos iones son las emisiones atmosféricas de gases que liberan hidrógeno cuando se degradan en la atmósfera o después se depositan al suelo, vegetación o agua. La deposición aumenta durante la precipitación, eventos en los que los gases se disuelven en el agua y caen con la lluvia, que pueden alcanzar valores de pH por debajo de 3-4 en casos de fuerte contaminación del aire ("lluvia ácida"). Los compuestos acidificantes artificiales más importantes son: Los óxidos de azufre, SO_2 y SO_3 (o conjuntamente SO_x), los ácidos anhídridos de azufre H_2SO_3 y ácido sulfúrico H_2SO_4 . Los óxidos de nitrógeno, NO y NO_2 (o conjuntamente NO_x) que también son ácidos anhídridos que pueden convertirse en ácidos nítrico y nitroso por oxidación en la troposfera. El NO se oxida a NO_2 principalmente por reacción con el ozono. El amoníaco, es en sí mismo una base que absorbe iones de hidrógeno, pero tras la mineralización completa a través de nitrito, de

⁹ En la evaluación de impactos ambientales realizada en el Software Umberto se encuentra como Acidification -TAP100-.

NO_2^+ a nitrato, NO_3^- se libera un ion neto. Los ácidos fuertes como ácido clorhídrico, HCl o ácido sulfúrico, H_2SO_4 , que liberan su contenido de iones de hidrógeno tan pronto como se disuelven en agua y, por lo tanto, también son fuertemente acidificantes.

Debido a su alta solubilidad en agua, el tiempo de residencia atmosférica de estas sustancias acidificantes se limita a unos pocos días, por lo que la acidificación es un efecto regional con su extensión limitada a la región alrededor del punto de emisión. Cuando los compuestos acidificantes se depositan en las plantas, pueden dañar órganos vitales de las plantas. La sensibilidad a la acidificación está fuertemente influenciada por la geología y la naturaleza del suelo. Los suelos calcáreos con un alto contenido de carbonato de calcio son más resistentes al cambio de pH neutralizando la entrada de iones de hidrógeno con los iones de carbonato básicos.

Eutroficación¹⁰:

Eutroficación describe esencialmente el enriquecimiento del medio acuático con nutrientes que conduce a una mayor producción de biomasa de algas planctónicas, zooplancton gelatinoso y plantas acuáticas superiores, lo que resulta en la degradación de la calidad del agua y una alteración en la composición de especies. También puede conducir al desarrollo de fitoplancton tóxico, dinófitis, cianobacterias o algas verdiazules. Finalmente, la acumulación de biomasa muerta proveniente de las algas, se acumula reduciendo la concentración de oxígeno disuelto en el agua (hipoxia), afectando la comunidad biológica en el cuerpo de agua afectado.

Para la eutrofización acuática, el punto de partida de la cadena causa-efecto es la emisión de un compuesto que contiene nitrógeno (N) o fósforo (P). La mayor disponibilidad de nutrientes aumentará principalmente el crecimiento de algas y plantas, especialmente en verano con abundante luz solar. Este crecimiento de algas es visible cuando los ríos, lagos o aguas costeras se vuelven turberas en verano. Eventualmente, las algas se hundirán hasta el fondo donde son descompuestas por degradadores como bacterias bajo el consumo de oxígeno en la capa inferior. Para los sistemas terrestres, el problema ambiental

¹⁰ En la evaluación de impactos ambientales realizada en el Software Umberto se encuentra como Eutrophication –FEP-.

más importante en relación con la carga de compuestos de nitrógeno son los cambios en la función y la composición de especies de ecosistemas pobres en nitrógeno (y limitados en nitrógeno) en brezales, vegetación de dunas, terrenos comunes y turberas elevadas como resultado de la deposición atmosférica de compuestos nitrogenados.

Pueden emitirse óxidos de nitrógeno de los procesos de incineración. Fuentes puntuales en la forma de plantas de tratamiento de aguas residuales para el hogar y la industria, así como la piscicultura son fuentes importantes de fósforo y nitratos. Aparte de las emisiones provocadas por el hombre, las fuentes naturales incluyen la lixiviación y escurrimiento de nitrógeno y fosfatos. Se cree que la adición natural de nutrientes a las áreas terrestres consiste principalmente en la deposición atmosférica de óxidos de nitrógeno y amoníaco, mientras que algunas especies de plantas naturales también poseen la capacidad de fijar nitrógeno atmosférico.

Formación fotoquímica de ozono¹¹:

Los impactos negativos de los contaminantes generados fotoquímicamente se deben a su naturaleza reactiva que les permite oxidar moléculas orgánicas en las superficies expuestas. Los impactos en los humanos surgen cuando el ozono y otros compuestos reactivos del oxígeno, que se forman en el proceso, se inhalan y entran en contacto con la superficie del tracto respiratorio, donde dañan los tejidos y causan enfermedades respiratorias. La formación de ozono requiere la reacción entre un radical hidroxilo y un enlace entre carbono e hidrógeno u otro átomo de carbono en una molécula de compuestos orgánicos volátiles –VOC-. La formación fotoquímica de ozono y otros compuestos de oxígeno reactivo en la troposfera a partir de emisiones de VOC y NO_x sigue esquemas de reacción bastante complejos que dependen de la naturaleza del compuesto orgánico específico emitido. Los VOC (escritos como RH) o CO reaccionan con el radical hidroxilo OH• en la troposfera y forman radicales peroxi, ROO. Y los radicales peroxi oxidan NO a NO₂. El NO₂ se divide por la luz solar con formación de NO y liberación de átomos de oxígeno libres. Los átomos de oxígeno libres reaccionan con el oxígeno molecular O₂ para formar ozono. Por tanto, tanto los VOC como los óxidos de nitrógeno son necesarios para

¹¹ En la evaluación de impactos ambientales realizada en el Software Umberto se encuentra como Photochemical Ozone Formation –POFP-.

la formación de ozono fotoquímico y ambos contribuyen a la formación de ozono y otros oxidantes.

Los animales y los seres humanos están expuestos principalmente a los oxidantes fotoquímicos a través de la inhalación del aire circundante, por lo que los efectos aparecen en sus órganos respiratorios. El ozono es detectable por su olor a una concentración de aprox. 20 ppb en aire puro, pero solo en concentraciones algo más altas comenzamos a ver síntomas agudos como una mayor resistencia de las vías respiratorias e irritación de los ojos, seguidos en concentraciones aún más altas por efectos más graves como edema de los pulmones, que puede conducir a incapacidad de larga duración. En algunos casos, se conocen las emisiones de sustancias individuales, pero en el caso de los productos petrolíferos, las emisiones a menudo estarán compuestas por muchas sustancias diferentes y se especificarán con designaciones colectivas como VOC o nmVOC (no metano, es decir, VOC aparte del metano, que normalmente se informa por separado debido a su naturaleza como un gas de efecto invernadero fuerte) y, a veces, también HC (hidrocarburos), o NMHC (hidrocarburos distintos del metano, es decir, hidrocarburos que excluyen el metano).

Ecotoxicidad¹²:

Las emisiones químicas al medio ambiente afectarán a los ecosistemas terrestres, de agua dulce, marinos y aéreos (es decir, animales voladores y planeadores) según las condiciones ambientales del lugar y el momento de la emisión y las características de la sustancia emitida. Pueden afectar a los organismos de muchas formas diferentes, provocando aumento de la mortalidad, reducción de la movilidad, reducción de la tasa de crecimiento o reproducción, mutaciones, cambios de comportamiento, cambios en la biomasa o la fotosíntesis, actividad, etc. La toxicidad no es el único parámetro que determina el impacto ecotóxico potencial de una sustancia química en el medio ambiente, ya que primero tiene que alcanzar e ingresar a un organismo objetivo potencial. Una sustancia puede ser muy tóxica, pero nunca llegar a ningún organismo debido a su corta vida en el medio ambiente (por ejemplo, su rápida degradación). Por otro lado, otra sustancia puede no ser muy tóxica, pero si se emite en grandes cantidades y durante períodos prolongados de tiempo o tiene

¹² En la evaluación de impactos ambientales realizada en el Software Umberto se encuentra como Freshwater ecotoxicity –FETPinf-; Marine ecotoxicity –METPinf- & Terrestrial ecotoxicity –TETPinf-.

una fuerte persistencia ambiental, aún puede causar un impacto ecotóxico. El mecanismo ambiental de los impactos ecotóxicos, de las sustancias químicas en el LCA se puede dividir en cuatro pasos consecutivos.

1. El modelo de destino estima el aumento de concentración en un medio ambiental dado debido a una emisión cuantificada en el inventario del ciclo de vida.
2. El modelo de exposición cuantifica la biodisponibilidad de la sustancia química en los diferentes medios determinando la fracción biodisponible de la concentración total.
3. El modelo de efectos relaciona la cantidad disponible con un efecto en el ecosistema. Por lo general, esto se considera un indicador de punto medio en la LCA, ya que no se hace ninguna distinción entre la gravedad de los efectos observados (por ejemplo, una disminución temporal / reversible de la movilidad y la muerte reciben la misma importancia).
4. Finalmente, el modelo de severidad (o daño) traduce los efectos sobre el ecosistema en un cambio de población del ecosistema (es decir, biodiversidad) integrado en el tiempo y el espacio. La evaluación del impacto tóxico de los productos químicos en el marco de la LCA debe poder cubrir la gran cantidad de sustancias potencialmente tóxicas en el inventario en términos de factores de caracterización disponibles.

Toxicidad Humana¹³:

La toxicidad humana en el ACV se basa esencialmente en los mismos factores impulsores que la ecotoxicidad: (1) cantidad emitida (determinada en el LCI), (2) movilidad, (3) persistencia, (4) patrones de exposición y (5) toxicidad humana, con los últimos cuatro considerados por el factor de caracterización. Los respectivos mecanismos y parámetros son ciertamente diferente y específico para la toxicidad humana, en particular para el modelo de exposición, donde muchos factores que capturan el comportamiento humano, como los hábitos alimentarios, influyen en el patrón de exposición humana. La exposición a sustancias químicas de los seres humanos puede ser el resultado de emisiones al medio ambiente que afectarán a toda la población, pero también de los muchos ingredientes químicos de los productos que se liberan durante su producción, uso o tratamiento al final de su vida útil, lo que afecta a los trabajadores o consumidores. Las emisiones químicas son responsables de, o contribuyen a, muchos impactos en la salud, como una amplia gama

¹³ En la evaluación de impactos ambientales realizada en el Software Umberto se encuentra como Human Toxicity –HTPinf-.

de enfermedades no cancerosas, así como un mayor riesgo de cáncer para aquellas sustancias químicas que son cancerígenas.

La cadena de causa-efecto vincula la emisión con la masa resultante en los compartimentos ambientales (modelo de destino) y con la ingesta de la sustancia por parte de la población en general a través de las vías de exposición a los alimentos y la inhalación (modelo de exposición humana), y al número resultante de casos de diversos riesgos para la salud humana por comparación de la exposición con la relación dosis-respuesta conocida para el producto químico (modelo de efecto tóxico) y finalmente su daño a la salud de la población en general. En el modelado de caracterización, los eslabones de esta cadena de causa-efecto son expresados, como factores correspondientes a los sucesivos pasos del destino, exposición, efectos y gravedad.

El factor de caracterización de la toxicidad humana de punto medio [número de casos / k emitidos] expresa el impacto tóxico en la población humana mundial por unidad de masa emitida al medio ambiente y puede interpretarse como el aumento del riesgo poblacional de casos de enfermedad cancerosas y no cancerosas debido a una emisión a un medio ambiente específico. Al interpretar los indicadores de toxicidad humana a partir de métodos existentes, es importante tener en cuenta que estos solo proporcionan indicadores de la exposición de la población mundial a las emisiones en interiores y exteriores, mientras que la toxicidad humana por la exposición ocupacional de los trabajadores o la exposición directa relacionada con el uso de productos para los consumidores aún están cubiertas por la metodología y los otros modelos de caracterización, a pesar de su muy alta relevancia.

Formación de material particulado¹⁴:

El material particulado (PM) se puede distinguir según el tipo de formación (primaria y secundaria) y según el diámetro aerodinámico (respirable, grueso, fino y ultrafino). PM primario se refiere a partículas que se emiten directamente, mientras que la PM secundaria se refiere a partículas orgánicas e inorgánicas formadas a través de reacciones de sustancias precursoras que incluyen óxidos de nitrógeno (NOx), óxidos de azufre (SOx),

¹⁴ En la evaluación de impactos ambientales realizada en el Software Umberto se encuentra como Particulate Matter Formation –PMFP-.

amoníaco (NH₃), compuestos orgánicos volátiles y semivolátiles (VOC). Las partículas secundarias incluyen sulfatos, nitratos y materiales carbonosos orgánicos y pueden constituir hasta el 50% de las concentraciones ambientales de PM. Las partículas respirables (PM₁₀) tienen un diámetro aerodinámico inferior a 10 µm, las partículas gruesas (PM_{10-2,5}) entre 2,5 y 10 µm, las partículas finas (PM_{2.5}) de menos de 2,5 µm y las partículas ultrafinas (UFP) de menos de 100 nm (OMS 2006).

El material particulado –PM- causa principalmente efectos a la salud relacionados con la toxicidad. La exposición a PM se considera una categoría de impacto separada en la mayoría de los métodos LCIA, esto se debe principalmente a una serie de diferencias importantes entre la caracterización de la formación de PM y la de la toxicidad humana. Estas diferencias incluyen la compleja química atmosférica involucrada en la formación de PM secundaria a partir de diferentes sustancias precursoras, lo que requiere un modelo de destino diferente. Además, es importante considerar diferentes alturas de emisión, se utilizan datos de monitoreo global para las concentraciones de partículas en el aire y la evaluación del efecto se basa en funciones de exposición-respuesta derivadas principalmente de evidencia epidemiológica, lo que no es posible para la mayoría de los químicos tóxicos debido a la falta de ubicaciones de emisión. e información sobre exposición o dosis-respuesta.

La exposición a PM está asociada en aspectos epidemiológicos y estudios toxicológicos con diversos efectos adversos para la salud y reducción de la esperanza de vida, incluidas enfermedades respiratorias y cardiovasculares crónicas y agudas, mortalidad crónica y aguda, cáncer de pulmón, diabetes y resultados adversos en el parto (Fantke et al. 2015).

Agotamiento de Metales y Fósiles¹⁵:

Diferentes definiciones del problema del agotamiento de metales y fósiles podrían ser resumido como: (1) asumir que el costo de la minería será un factor limitante, (2) asumir que recolectar metales u otras sustancias de fuentes de bajo grado es principalmente una cuestión de energía, (3) asumir que la escasez es una amenaza importante y (4) asumir

¹⁵ En la evaluación de impactos ambientales realizada en el Software Umberto se encuentra como Fossil depletion –FDP- & Metal depletion –MDP-, ambos impactos independientes.

que los impactos ambientales de la minería y el procesamiento de los recursos minerales son el principal problema. (Klinglmair, Sala, & Brandão, 2014).

Las definiciones anteriores reflejan una orientación socioeconómica de la evaluación del agotamiento de los recursos, es decir, la noción de que la extracción de un recurso del medio natural conduce a una disminución de su disponibilidad futura para uso humano. Esto a su vez, se expresa en relación con la cantidad disponible de un recurso en un momento dado en el tiempo (por ejemplo, depósitos de mineral o fósiles reservas de combustible) o las consecuencias futuras (por ejemplo, mayores y / o costes energéticos) de la extracción de una determinada cantidad de un recurso en el presente (Klinglmair et al., 2014).

Todos los depósitos de combustibles fósiles están limitados física o económicamente, lo que los hace finitos y recursos naturales no renovables. Esto se origina en el simple hecho de que se necesitan millones de años para que los combustibles fósiles se acumulen mientras los depósitos se extraen rápidamente, lo que hace imposible para que la tasa de creación se mantenga al día con la tasa de extracción. De manera más general, si la tasa de extracción es más rápida que la tasa de reposición, el recurso será finito en el sentido de que eventualmente será agotado (Höök & Tang, 2013).

b. Evaluación de Impactos de Demanda acumulada de energía (CED)

La demanda de energía acumulada (CED) de un producto representa la energía directa e indirecta utilizada durante todo el ciclo de vida, incluida la energía consumida durante la extracción, fabricación y eliminación de las materias primas y auxiliares. En algunas ocasiones es relevante añadir información al respecto de la suma total de energía fósil consumida por un sistema, siempre de acuerdo a los objetivos y el alcance del estudio de ACV. La información, además, puede ser segmentada por el tipo de fuente generadora de energía. Una forma simple para abordar el problema es la de sumar todos los consumos energéticos y multiplicarlos por el contenido energético del recurso, lo que proporciona un indicador que ofrece tanto información del consumo energético agregado del sistema, como también del agotamiento de determinada fuente de energía. Este planteamiento ya se había considerado en la metodología CML (Niembro & Gonzalez, 2008).

La demanda de energía acumulada (CED) de un producto representa la energía directa e indirecta utilizada durante todo el ciclo de vida, incluida la energía consumida durante la extracción, fabricación y eliminación de las materias primas y auxiliares. En algunas ocasiones es relevante añadir información al respecto de la suma total de energía fósil consumida por un sistema, siempre de acuerdo a los objetivos y el alcance del estudio de ACV. La información, además, puede ser segmentada por el tipo de fuente generadora de energía. Una forma simple para abordar el problema es la de sumar todos los consumos energéticos y multiplicarlos por el contenido energético del recurso, lo que proporciona un indicador que ofrece tanto información del consumo energético agregado del sistema, como también del agotamiento de determinada fuente de energía. Este planteamiento ya se había considerado en la metodología CML (Niembro & Gonzalez, 2008).

Pero el impacto ambiental de un producto o servicio no puede ser estimado sólo en función de la demanda energética. Este método solo tiene sentido en combinación con otros métodos. Sin embargo, se recomienda tener cuidado especial cuando se combinan metodologías para evitar la doble contabilización en el paso de la ponderación de los EICV (Niembro & Gonzalez, 2008). En general, el método DEA expone toda la demanda, valorada como energía primaria, que se plantea en relación con la producción, uso y disposición de un producto o servicio. Por lo tanto, es un indicador como tal, de los impactos ambientales en lo que respecta al rendimiento energético de los sistemas de generación de energía en su ciclo de vida (Niembro & Gonzalez, 2008). Existen diferentes conceptos para determinar el requerimiento de energía primaria. Por cálculos CED, se puede elegir el poder calorífico inferior o bien el superior de los recursos energéticos primarios si estos últimos incluyen la energía de evaporación del agua presente en los gases de combustión.

6.2.9. Fase 4: Interpretación

La interpretación es la fase de un ACV en la que se combinan los resultados de análisis del inventario con la evaluación de impacto. Los resultados de esta interpretación pueden adquirir la forma de conclusiones y recomendaciones para la toma de decisiones. Permite determinar la fase del ciclo de vida del producto que genera las principales cargas ambientales y por tanto que puntos del sistema evaluado pueden o deben mejorarse. En

los casos de comparación de distintos productos, se podrá determinar el comportamiento ambiental para cada uno de ellos (Leiva, 2016).

6.3. Software para la modelación de procesos y evaluación ambiental

El software **Umberto** es una herramienta para el Análisis de Ciclo de Vida, utiliza la base de datos Ecoinvent 3 y LCI Gabi, crea modelos gráficos claros y concisos del ciclo de vida del producto y además presenta los resultados del ACV con tablas, gráficos y diagramas Sankey. Sirve para modelar, calcular, visualizar y evaluar flujos de materiales y flujos de energía, que permite entender procesos complejos en una manera muy sencilla a través de gráficos. Ver <https://www.ifu.com/en/umberto>.

7. ANALISIS DE CICLO DE VIDA -ACV- VÍA RE-REFINACIÓN Y VALORACIÓN ENERGÉTICA DE ALU

En este estudio se utiliza la metodología de ACV para determinar los beneficios ambientales de un proceso de re-refinación de aceites lubricantes usados en Colombia. Se realiza la evaluación del ciclo de vida de 1 k de aceite lubricante usado en etapa de fin de la vida, mediante un análisis comparativo de tipo descriptivo, entre la tecnología de re-refinación (modelo Puerta-Puerta) y la tecnología de valorización energética (modelo Puerta-Tumba) como sistema de referencia dentro del mismo sistema de producto. Se complementó el ciclo de vida del producto, con el modelo de producción y uso del aceite lubricante (modelo Cuna-Uso), que corresponde al proceso que dá origen al aceite lubricante usado que usan ambas tecnologías.

La evaluación de impacto ambiental se realizó mediante el método “ReCiPe 2008 Midpoint (H) V1.13 no LT”, a partir de la selección de 10 de las 18 categorías de impacto que ofrece la metodología. Las categorías de impacto ambiental seleccionadas para este estudio fueron: Cambio climático, ecotoxicidad del agua, eutroficación del agua, toxicidad humana, ecotoxicidad marina, agotamiento del ozono, formación de oxidantes fotoquímicos, formación de partículas, acidificación terrestre, agotamiento de petróleo y de los metales. Así mismo, se realiza un perfil energético para los 3 modelos evaluados mediante el indicador Demanda de Energía Acumulada (CED) en las categorías de energía fósil, hídrica y geotérmica.

Los datos de inventario para los procesos de reciclaje de aceites usados evaluados fueron compilados a partir de información directa suministrada por las empresas proveedores de la tecnología mediante una encuesta escrita, visitas a la planta e información primaria de la empresa. Otra parte de la información fue obtenida en dialogo con expertos en los procesos de tratamiento de aceites usados o consultada en fuentes especializadas. Así mismo, la información de algunos procesos fue extraída de la base de datos de Ecoinvent v1.2 (4), disponible en Software Umberto en el cual se modelaron los procesos (Ver anexo 2:

Procesos modelados) y se realizó la evaluación ambiental bajo el enfoque de sustitución de cargas ambientales (detallado en el apartado de evaluación ambiental). Los resultados de la evaluación ambiental se caracterizaron y se normalizaron con los factores correspondientes del método “ReCipe”. También se presenta de manera complementaria la evaluación de demanda acumulada de energía hasta la fase de caracterización. En la interpretación de los resultados se presenta la evaluación ambiental para los modelos analizados.

7.1. Descripción del ciclo de vida del aceite lubricante usado -Caso de estudio-

El ciclo de vida del aceite lubricante usado a analizar en este estudio, inicia en el momento que se extrae el crudo y se fabrica el lubricante, luego del uso se convierte en un aceite residual o residuo peligroso que ingresa a la etapa denominada fin de la vida del aceite lubricante (ciclo verde de la Figura 8). En esta etapa el aceite usado puede finalizar su ciclo de vida, reciclado como combustible en un proceso de combustión industrial o puede ser reciclado en una planta de re-refinación, para convertirse en subproductos que se incorporan en el mercado de los derivados petroquímicos de donde provienen inicialmente los aceites lubricantes (ver ciclo verde Figura). Se describe el ciclo de vida del aceite lubricante desde la extracción de crudo hasta su uso, bajo la denominación “Aceite lubricante cuna-uso (AL-CU)” y en la etapa del fin de la vida del aceite usado se presentan la alternativa tecnológica de re-refinación bajo el enfoque puerta-puerta (RR-PP) y la tecnología de Valorización energética bajo el enfoque puerta-tumba (VE-PT).

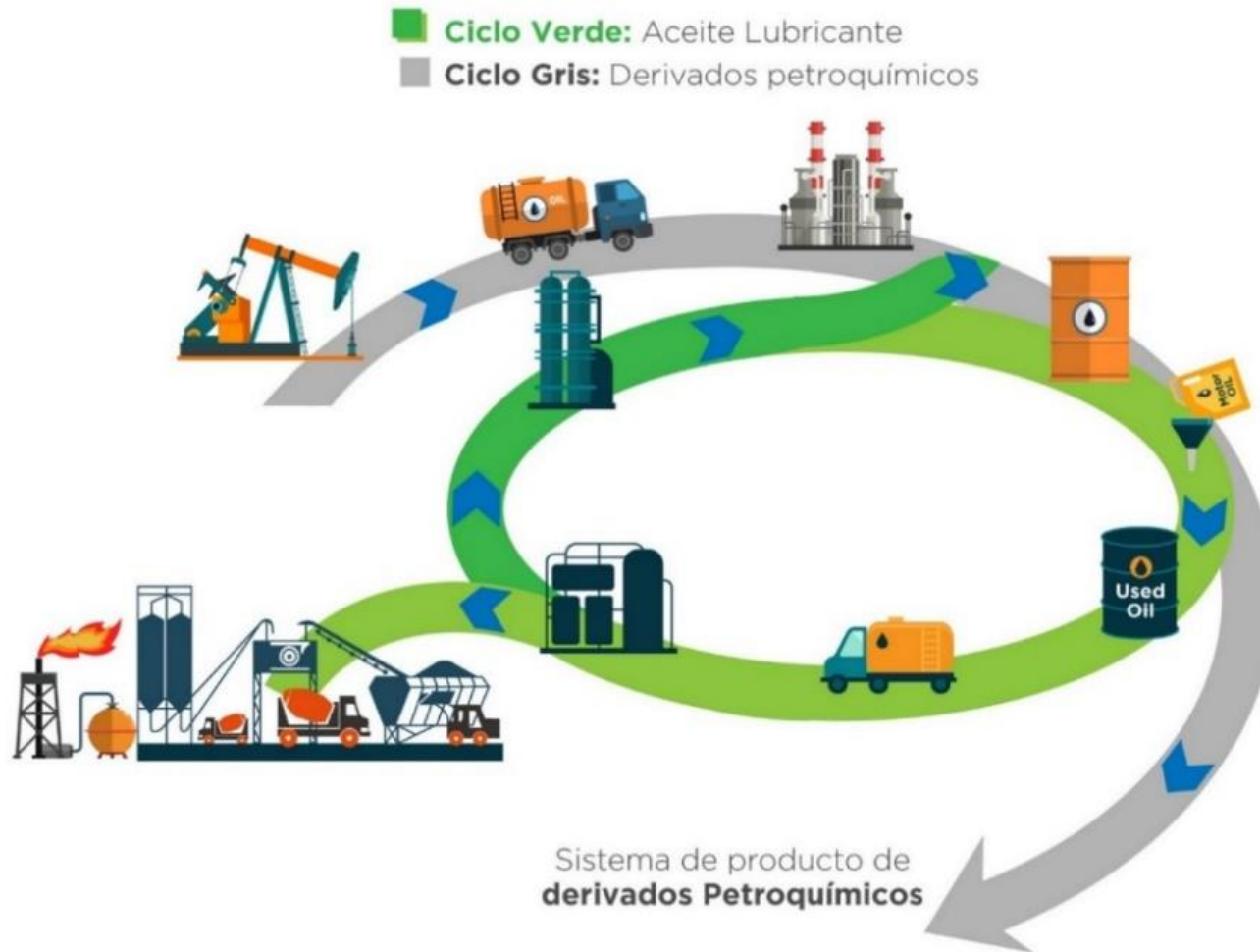


Figura 8. Ciclo de vida del aceite lubricante usado desde la cuna al uso, con dos alternativas de tratamiento.

Fuente: elaboración propia

7.1.1. Modelo de Ciclo de Vida Aceite lubricante Cuna-Uso (AL-CU)

El proceso aceite lubricante Cuna-Uso, corresponde al proceso de fabricación y uso de 1 k de aceite lubricante, elaborado a partir de materias primas frescas derivadas de petróleo crudo (ruta de refinación convencional) y corresponde al proceso de primer plano de las tecnologías analizadas. La “cuna” de este proceso es la obtención de la base lubricante, y culmina con la etapa de “uso”, en la cual el aceite de desecho queda disponible en la “Puerta” de otros procesos para ser dispuesto, tratado o reciclado.

Etapas del ciclo de vida Aceite lubricante Cuna-Uso (AL-CU)

Etapa 1: Obtención base lubricante

Este proceso inicia con la extracción del petróleo en yacimientos petroleros en tierra de la empresa Ecopetrol, ubicada en Barrancabermeja, Santander. Esta actividad de perforación se realiza en torres metálicas a una altura entre 35 y 70 metros, con la ayuda de un taladro con una barra hueca que lleva una broca en la punta para desgastar la superficie y abrir las rocas. Allí se hunde, hasta llegar al manto rocoso que contienen el petróleo crudo que posteriormente, por medio de un equipo especial, se extrae ya sea por la presión natural del gas natural o por uso de bombas, y líquidos o gases de empuje, para su extracción.

El crudo se separa de la solución de empuje de extracción por medios físicos de decantación y químicos de floculación en los que la mayoría del agua utilizada es recuperada. El crudo separado debe ser sometido a varias etapas de filtración, decantación y flotación para que quede completamente limpio y pueda ser transportado a las refinaciones para su fraccionamiento. En el caso de los crudos en Colombia, debido a su elevada viscosidad, se les debe adicionar un diluyente para hacerlos más fáciles de bombear y transportar, bien por poliductos o bien en carrotanques.

El transporte del crudo se realiza mediante Oleoductos desde el pozo de extracción hasta las refinaciones de Ecopetrol ubicadas las ciudades de Barrancabermeja y Cartagena, donde se realiza la refinación del petróleo para la obtención de bases lubricantes y varios derivados petroquímicos. En Colombia existen otras refinaciones menores como

Hidrocasanare, Refiantioquia, Odin, etc, las cuales hacen únicamente "descabezado de crudo" para obtener una fase liviana rica en gasolina y/o querosene, y otra fase pesada y por eso el único fabricante de base lubricante virgen en Colombia es Ecopetrol. La base lubricante mineral se produce a partir del petróleo crudo y el ciclo de producción del aceite lubricante mineral inicia una vez obtenida la base lubricante por destilación del petróleo. Las destilaciones básicas (atmosférica y al vacío) son los primeros pasos del proceso, cuyo objetivo es separar la materia prima del aceite base de los demás productos derivados del petróleo. La fracción de base lubricante corresponde a una de las fracciones semipesados que se obtiene en un corte de destilación entre los 350 °C y 365 °C en torre al vacío, más o menos hacia los platos ubicados al 40% de la altura de la torre. Posteriormente, el destilado ceroso pasa por etapas específicas de refinación que purifican el aceite base de componentes no deseados. En consecuencia, se producen 112 k de aceite base a partir de 1 ton de petróleo crudo. El destilado ceroso representa alrededor del 20% de los productos de destilación y solo la mitad se convierte en aceite base (Raimondi, Girotti, Blengini, & Fino, 2012). Ver figura 9.

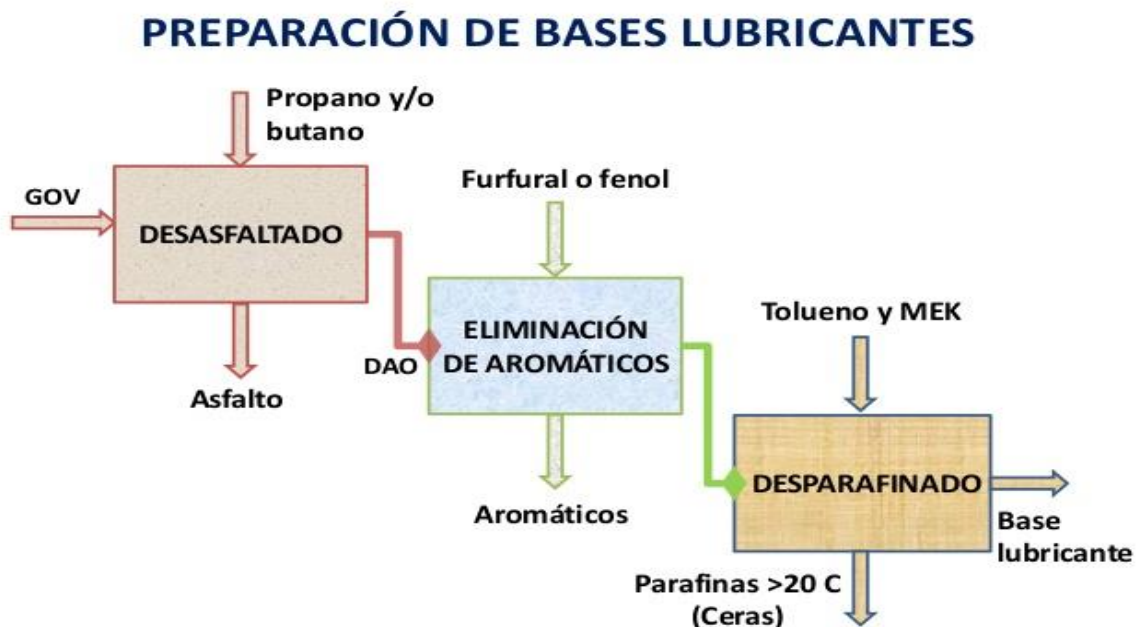


Figura 9. Preparación de bases lubricantes.

Fuente: Carlos E. Sánchez P -2015.

Posteriormente la base ingresa en la unidad de desparafinado con el fin de eliminar los componentes parafínicos, para que los lubricantes sean líquidos a temperaturas bajas (aproximadamente -10 °C). Libre de compuestos aromáticos y parafinas, la base es enviada al proceso final llamado hidroterminado catalítico o hidrocrackeado con el objeto de aumentar la resistencia a la oxidación, mejorar la estabilidad, eliminar el azufre y mejorar la apariencia de su color ya que queda casi transparente, mediante la eliminación de compuestos nitrogenados, donde se pone en contacto el aceite con gas hidrógeno en presencia de un catalizador adecuado (The international Council On Clean Transportation, 2011).

Etapas 2: Fabricación del aceite lubricante.

Las bases lubricantes vírgenes obtenidas en refinería se venden a los fabricantes de aceites lubricantes formulados quienes le agregan, fuera de la refinería, aditivos específicos para modificar sus propiedades de lubricidad, viscosidad, desgaste etc., como ya se ha explicado anteriormente en este trabajo. Los fabricantes de los aceites lubricantes formulados utilizan lo que comúnmente se llama "paquete de aditivos" para agregar a las bases lubricantes mediante mezcla simple a media temperatura, para lograr los diferentes tipos de lubricantes según requerimientos y condiciones específicas. La mezcla promedio de un aceite lubricante es de 75% base lubricante y 25% aditivos.

Etapas 3: de transporte de distribución

El transporte del aceite lubricante formulado se realiza en tractocamiones o isotanques desde la ciudad de Barrancabermeja, hacia otras ciudades principales del país. Este transporte de distribución de productos se realiza en carrotanques tecnología EURO3, con capacidad entre 5.000 y 10.000 galones/vehículo lo cual equivale a 16-32 toneladas métricas/km.

Etapas 4: de uso del aceite lubricante

Este proceso se realiza cuando los aceites de motor, de transmisión o hidráulico, o dieléctrico, con base mineral o sintética, son usados como lubricante al interior de motores

industriales y automotrices, de sistemas de transmisión o de potencia, de engranajes y pistones, y en general componentes o subcomponentes de equipos que siempre están en movimiento; y luego de esto pierde sus propiedades lubricantes y deja de cumplir esa función inicial para convertirse en un aceite de desecho o residuo peligroso. Durante el uso del aceite lubricante se tiene estimado que un 15% de la cantidad total del aceite lubricante que se encuentra al interior del automotor se consume, además se contaminan con productos orgánicos de oxidación, con materiales como carbón, productos provenientes del desgaste de los metales y con otros sólidos. (Soto Castaño et al., 2006).

El aceite lubricante usado que se usa, puede corresponder a la mezcla en distintas proporciones de: Aceite sintético, líquido para transmisión, aceite de motor, aceite de refrigeración, aceites en empresas metalúrgicas, aceite para compresores, aceites para laminar, líquidos hidráulicos industriales, soluciones para el trefilado de cobre y aluminio, aceites utilizados como medio de flotación, aceites dieléctricos libres de PCB's entre otros. Posterior al uso, el aceite lubricante usado es recolectado desde numerosas instalaciones de producción y plantas industriales donde fue usado, y es llevado a los sitios avalados donde será dispuesto o reciclado. La recolección del aceite usado se hace en vehículos con motobomba o transportado en isotanques, en ambos casos, cada tanque, tambor o sistema de almacenamiento deberá estar rotulado y la operación de transporte cumplir el decreto 1609 de 2002 en el territorio colombiano - Artículo compilado en el artículo 2.2.1.7.8.1 del Decreto Único Reglamentario 1079 de 2015, y con NTC 1692 "Transporte de mercancías peligrosas". La recolección de estos aceites usados se realiza en las principales ciudades del país y el destino es la disposición final o una planta de reciclaje de aceites lubricantes usados, ya sea para re-refinación o mezcla de combustibles para valorización energética. Una vez el aceite lubricante es llevado a una planta de reciclaje, los tratamientos que se realizan al aceite lubricante son particulares para cada proceso tecnológico, por lo tanto, se presenta a continuación una descripción de la alternativa tecnológica de re-refinación y de valorización energética.

7.1.2. Modelo de Ciclo de Vida re-refinación puerta-puerta (RR-PP)

La actividad de reciclaje de ALU mediante re-refinación, comprende el momento desde el cual se recibe el aceite lubricante en la Planta de tratamiento –Puerta- hasta el momento en el cual se entregan tres tipos de subproductos al sistema de los productos petroquímico –Puerta-. El proceso de re-refinación evaluado consiste en la recuperación principalmente de las bases lubricantes presentes en aceites minerales industriales y automotrices usados, mediante la operación de destilación y así mantener en uso las bases lubricantes extraídas del petróleo virgen una y otra vez. En este proceso, se recupera también la fracción de los aditivos y se eliminan los contaminantes presentes en los aceites lubricantes usados producto de la degradación por el uso, obteniendo así bases lubricantes y otros subproductos con las mismas características de los productos de primera refinación de crudo sin hidrotreamiento.

La re-refinación por destilación de capa fina, uno de los métodos de re-refinación más seguros desde el punto de vista ambiental, debido a que es un proceso puramente físico, se realiza mediante procesos de destilación a alta temperatura (370 °C) y alto vacío (3 mbar). Este proceso usa evaporadores de capa fina, los cuales ofrecen una gran ventaja en la destilación debido a la alta turbulencia en la capa fina del evaporador lo que permite tratar aceites usados de alta viscosidad, así mismo, el alto flujo calórico a través de la superficie permite un alto rendimiento de evaporación y una alta tasa de concentración del producto en un solo paso. En la Figura 10 Se presenta de manera general el esquema del proceso de re-refinación de capa fina.

En la planta de re-refinación utilizada como referencia en este trabajo, la capacidad máxima de tratamiento de esta tecnología está definida por la capacidad de la Planta de procesar 1500 k/h de alimentación de aceite lubricante usado, y una capacidad real utilizada en promedio del 80%, es decir, para 10,5 Millones de galones/año. Se reciben en promedio 280.000 galones de ALU por mes, y cuenta con una capacidad de almacenamiento de 180 mil galones en materia prima y 230 mil galones en producto terminado.

Esta tecnología corresponde a un proceso multifuncional de ciclo abierto, de única entrada y múltiples salidas, que enlaza dos sistemas de producto. El primer sistema proporciona el

aceite lubricante usado como materia prima para el proceso de reciclado, y el otro sistema usa el residuo como material de entrada para la fabricación de subproductos secundarios que ingresan de nuevo al mercado de los productos petroquímicos para ser usados principalmente a nivel industrial, lo cual acredita a la re-refinación como un proceso eslabón, que otorga una segunda vida a productos que perdieron su funcionalidad inicial.

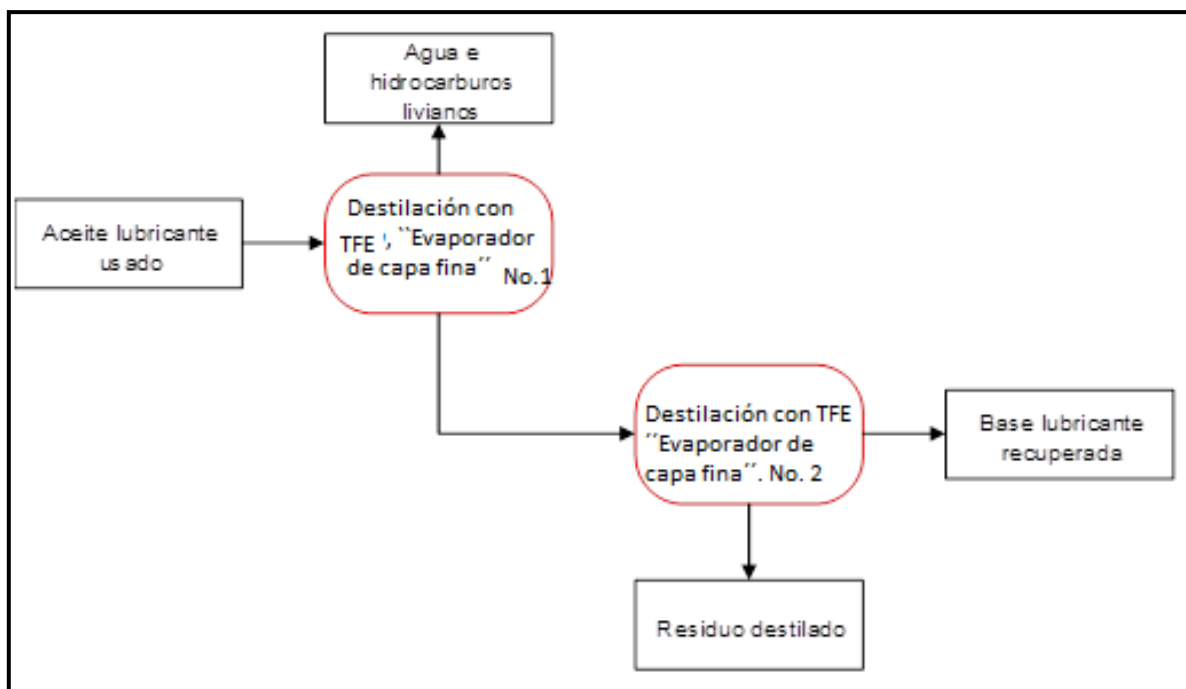


Figura 10. Procesos para la re-refinación por destilación de capa fina al interior de la planta de re-refinación.
Fuente: Biochemical group, 2014

Etapas del fin de ciclo de vida del ALU por la vía re-refinación puerta-puerta (RR-PP)

Etapa 1: Recolección de ALU

El aceite lubricante usado para que ingresa a proceso proviene principalmente de las ciudades de Bogotá y Villavicencio, Santanderes, Cali, Cartagena, Barranquilla y Medellín, el cual llega empacado en canecas y en carotanches tecnología EURO3 con capacidad entre 3,5-7,5 toneladas métricas, con un recorrido promedio de 360 kilómetros para la recolección del ALU.

Etapas 2: Procesos de re-refinación de doble destilación

Una vez los aceites lubricantes usados llegan a la planta de re-refinación, se someten a control e inspección para determinar la aceptación del ALU para el proceso. Para aceptar el ALU que ingresa a la planta se deben cumplir con los parámetros que aparecen en la Tabla 16. En esta primera etapa del proceso que los ALU ingresan al proceso, se elimina gran parte de los contaminantes del aceite usado, como: partículas en suspensión y sedimentos, agua en exceso por encima de 4% en volumen y especies de hidrocarburos ricas en aromáticos cíclicos o halogenados, estos contaminantes deben ser eliminados antes de que el ALU inicie proceso de re-refinación, de doble destilación. En este proceso de re-refinación, los ALU pasan por dos etapas de separación, en la primera, se separan los contaminantes más volátiles como el agua y los hidrocarburos livianos, y en la segunda, se separa la base lubricante (producto deseado), del residuo pesado constituido principalmente por los contaminantes más pesados del aceite. En este proceso se calienta la mezcla para lograr separar cada producto que se encuentra en la solución, a través de la evaporación controlada desde los más volátiles a los menos. Para evaporar los componentes de la materia prima, se requieren dos condiciones esenciales en este proceso: alta temperatura, que aporta energía a la evaporación; y alto vacío (muy baja presión), para reducir la resistencia a la evaporación. Los productos del proceso vuelven a su estado original mediante enfriamiento con agua, en el proceso de condensación. Ver siguiente tabla.

Tabla 16. Parámetros de aceptación o rechazo de la materia prima que ingresa a proceso de re-refinación.

Parámetro	Mínimo	Máximo
Humedad (% w/w)	0	3
Densidad (K/gal)	3.31	3.39
Apariencia a 0°C	No debe cambiar de color	
Prueba de olor	Estándar aceite usado. No solventes, no aceite térmico, no aceite vegetal, no ácidos, no álcalis	
Cromatografía	Estándar de aceite usado. Tiempo de elusión para fracción de base lubricantes: 9 minutos a 17 minutos. Tiempo elusión fracción de livianos: máximo 1 minuto.	

Fuente: Biochemical group, 2014

La base lubricante re-refinada que se obtiene de las destilaciones descritas anteriormente, así como los livianos de la primera destilación, son tratados posteriormente mediante un

proceso de hidrocracking en el cual se inyecta hidrogeno gaseoso en un reactor a alta presión y mediante esta reacción los compuestos insaturados y azufrados son convertidos en especies químicas separables, dejando ambos productos, tanto base lubricante, como livianos con características de color y olor comerciales y completamente utilizables como sustitutos totales de base lubricante virgen y de nafta virgen de primera refinación de petróleo crudo.

Etapas 3: Entrega de producto

La entrega de los productos se realiza desde la Planta de re-refinación ubicada en el municipio de Girardota (Antioquia) con destino a los clientes ubicados en Medellín, Bogotá, Barrancabermeja, Cartagena, Neiva, Barranquilla y Villavicencio. Los principales consumidores de estos subproductos son empresas del sector petroquímico que fabrican aceites y grasas lubricantes, pavimentos, combustibles y diluyentes marinos. El transporte de estos productos se realiza en carrotaques con tecnología EURO3, con capacidad entre 5.000 y 10.000 galones/vehículo, lo cual equivale a 16-32 toneladas métricas/km. Para esta entrega se recorre en promedio 550 km/kg para la entrega de producto. Las características de los productos que se entregan son los siguientes:

a. Línea de producto: Bases lubricantes

Las bases lubricantes están constituidas por una mezcla de hidrocarburos entre 15 a 28 átomos de carbono resultante de un proceso de destilación al vacío, lo que garantiza la completa remoción de compuestos contaminantes que pueden contener los aceites usados, y posterior tratamiento químico para desparafinado y desmetalizado. Aunque se trata de una base lubricante genérica sus propiedades equivalen a la de una base parafínica liviana de primera destilación de crudo. Ver Tabla 17 con las especificaciones técnicas de las bases lubricantes.

Usos: La principal aplicación de la base lubricante genérica es la manufactura de aceites lubricantes tanto para uso en automotores (aceite tipo cárter) como para usos en la industria, así como para la fabricación de grasas industriales. Las bases genéricas son preferidas para la fabricación de aceites de alto índice de viscosidad, también se usan como materia prima para la fabricación de tintas, vaselinas o como agentes ablandadores del fique, tratamientos para el caucho, etc. También encuentran aplicaciones en la fabricación

de algunos combustibles marinos como diluyente y como precursor de formulaciones de combustibles industriales.

Tabla 17. Especificaciones técnicas de las bases lubricantes:

Propiedades / características	Unidades	Método	Especificación
			Mínimo- Máximo
Apariencia	N/A		Clara-Brillante
Olor	N/A		Característico
Agua y sedimento	% volumen	ASTM D-1796	0,04
Cenizas	% masa	ASTM D 482	0,002-0,004
Color ASTM	Clasificación	ASTM D 1500	3.0
Corrosión lámina de cobre, 3 h a 50°C	Clasificación	ASTM D 130	1A
TAN	mg KOH/g	ASTM D 974	0,10-0,18
TBN	mg KOH/g	ASTM D 2896	2,3-2,8
Densidad	K/gal	ASTM D 974	3,25-3,29
Punto de inflamación	°C	ASTM D 92	180-210
Punto de fluidez	°C	ASTM D 97	0
Viscosidad cinemática a 40°C	cSt	ASTM D 445	33-43
Viscosidad cinemática a 100°C	cSt	ASTM D 445	3.8-4.0
Índice viscosidad		ASTM 2270	104-108
Tiempo de separación de la emulsión	Min	ASTM D 1401	dic-15
Aluminio + Silicio	mg/k		Max.3
Azufre	%	ASTM D 4294	0.03-0.06
Contenido Carbón	% (m/m)	DIN 51 732	84-87
Contenido Hidrogeno			13-15
Contenido Oxigeno	% (m/m)	DIN 51732	0,5

Fuente: Biochemical group, 2014

Precauciones de uso y manejo: Como cualquier base lubricante de primera refinación, contiene un aceite mineral a base de petróleo. El contacto repetido o prolongado con la piel puede causar una leve irritación e inflamación caracterizada por resequedad, resquebrajamiento (dermatitis) o acné. La inhalación de aceites minerales a base de petróleo puede causar irritación respiratoria u otros efectos pulmonares luego de la inhalación repetida o prolongada de nieblas de aceite a concentraciones superiores a los

niveles permisibles de exposición en áreas de trabajo. Este material puede quemarse, pero no encenderá fácilmente. Este material emanará vapores cuando sea calentado sobre la temperatura del punto de inflamabilidad pudiendo encenderse cuando está expuesta a una fuente de ignición. En los espacios confinados, el vapor calentado puede encenderse con fuerza explosiva. Las nieblas o rocíos pueden quemarse en las temperaturas debajo del punto de inflamación.

b. Línea de producto: destilados primarios -Base asfáltica-

Los fondos de destilación provenientes del proceso de re-refinación de aceites minerales usados es una mezcla de hidrocarburos más de 60 átomos de carbono, es decir la fracción pesada residual del proceso de destilación al vacío de tales aceites usados. Como no se trata de fondos pesados de destilación primaria de crudo, el contenido de asfaltenos y máltenos es muy bajo y por lo tanto no presenta las mismas propiedades de índice de penetración y de adhesividad de un asfalto virgen, sin embargo los fondos de destilación de aceites usados pueden incorporarse en porcentajes que van desde el 5% hasta el 20% en mezclas con asfalto virgen reduciendo la viscosidad del asfalto virgen y mejorando propiedades de plasticidad según la aplicación específica. Ver la siguiente tabla con las especificaciones para este producto.

Tabla 18. Especificaciones técnicas de los destilados primarios.

Propiedades / características	Unidades	Método	Especificación Mínimo- máximo
Agua y sedimento	%V	ASTM D-1796	1,0
Sulfuro X-ray	%P	ASTM D-4294	0,6 – 0,7
Carbón Conrandson	%P/P	ASTM D-189	9,2
Color ASTM	Clasificación	ASTM D 1500	Negro
Gravedad API	°API	ASTM D-1298	14.5
Densidad	K /gl	ASTM D70-03	3,4818
Punto de inflamación	°C	ASTM D 93	138
Ash	mas %	ASTM D 482	4,5
Viscosidad cinemática a 40°C	cSt	ASTM D 445	27.583
Poder Calorífico (Gross)	BTU/lb	ASTM D-4868	17.646
Poder Calorífico (Net)	BTU/lb	ASTM D-4868	16.657
Aluminio + Silicio	mg/lt	Absorción atómica	25 - 50
Vanadio	mg/lt	Absorción atómica	- 20

Fuente: Biochemical group, 2014

Usos: los fondos de destilación provenientes de la re-refinación de aceites usados están diseñados para ser usados como alimentación o materia prima en mezclas con asfalto virgen de primera destilación en proporciones variables según la aplicación final del asfalto bien como imprimante, bien como emulsión o bien en mezclas con agregados para pavimento, el cual también puede ser utilizado como combustible pesado en mezclas con fuel oil, con crudos livianos o con combustibles de menor viscosidad dado su mínimo contenido de sólidos y de humedad y su alto poder calorífico.

Precauciones de uso y manejo: Según el Código de Regulaciones Federales de los Estados Unidos 40 CFR 261.4(b)(14) los fondos de destilación de re-refinación de aceites usados se clasifican como un residuo sólido, pero no como un residuo peligroso, por lo que su manipulación y uso en mezclas con asfalto virgen está libre de cualquier riesgo de manipulación tanto a nivel ocupacional como ambiental.

c. Línea de producto: gasóleo liviano – Base liviana-

Está constituido por una mezcla de hidrocarburos entre 9 a 18 átomos de carbono, resultante de un proceso de destilación al vacío. Se considera un gasóleo virgen ya que se vende tal como sale de la primera destilación sin ser sometido a los procesos de hidrotratamiento ni de reformado catalítico e isomerización. Tiene un olor característico debido a la naturaleza de su fuente. Ver siguiente tabla con las especificaciones del producto.

Tabla 19. Especificaciones Técnicas: Gasóleo liviano - livianos

Propiedades / características	Unidades	Método	Mín- Máx
Humedad	%V	ASTM D-1796	0
Color ASTM	Clasificación	ASTM D 1500	3.0
Gravedad API			35 - 37
Corrosión lámina de cobre, 3 h a 50°C	Clasificación	ASTM D 130	1A
Densidad	k/gal		3,12 - 3,22
Punto de inflamación	°C	ASTM D 93	23 - 25
Viscosidad cinemática a 40°C	cSt	ASTM D 445	2.47 - 2.51
Aluminio + Silicio	mg/k		No detectado
Vanadio	mg/k		No detectado
Azufre	%		0.1 - 0.15

Fuente: Biochemical group, 2014.

Usos: La principal aplicación de los livianos de re-refinación de aceites usados es servir como diluyente de combustibles negros pesados en las formulaciones de algunos combustibles marinos, y como precursor de formulaciones de combustibles industriales dado su bajo punto de chispa en comparación con su baja viscosidad lo que permite que pueda ser usado como un buen diluyente en combustibles negros y amarillos.

Precauciones de uso y manejo: Como sucede con cualquier nafta o gasolina de primera refinación, el contacto repetido o prolongado con la piel puede causar una leve irritación e inflamación caracterizada por resequedad, resquebrajamiento (dermatitis). La inhalación de estos livianos puede causar irritación respiratoria u otros efectos pulmonares luego de la inhalación repetida o prolongada de nieblas de aceite a concentraciones superiores a los niveles permisibles de exposición en áreas de trabajo. En ocasiones, aunque no es peligroso para la salud, su olor característico puede ser perturbador. Tiene un límite inferior de inflamabilidad de 1.3%. Este material emanará vapores cuando sea calentado sobre la temperatura del punto de inflamabilidad pudiendo encenderse cuando está expuesta a una fuente de ignición. En los espacios confinados, el vapor calentado puede encenderse con fuerza explosiva.

Etapas 4: Sustitución de productos

En esta etapa de sustitución, los subproductos derivados del proceso de re-refinación sustituyen en una relación 1:1 otros productos de la misma naturaleza que son elaborados con materias primas crudas derivadas del petróleo virgen. La sustitución se realiza en equivalencias de masa, calidad y funcionalidad, sin embargo, el menor precio de estos subproductos son el principal criterio de decisión para el consumo de productos provenientes de la re-refinación Ver Tabla 20.

Tabla 20. Relación de sustitución de subproductos de la re-refinación.

Tecnología	Subproducto	Producto sustituido
Re-refinación (Puerta-puerta):	0,75 k de base lubricante	0,75 k de base lubricante de primera refinación
	0,12 k de base asfáltica	0,12 k de base asfáltica o bitumen adhesivo de primera refinación
	0,10 k de base liviana	0,10 k de Gasolina sin plomo de primera refinación.

Fuente: elaboración propia.

7.1.3. Modelo de ciclo de vida de valorización energética puerta-tumba (VE-PT)

El proceso de Valorización energética como sistema de referencia comprende desde el momento en el cual se recibe el aceite lubricante en la Planta de tratamiento –Puerta- hasta el momento en el cual se consumen los combustibles en forma de calor en hornos y/o calderas–Tumba-. Actualmente los hornos asfálteros son los mayores usuarios de estos combustibles. En esta vía de tratamiento el aceite lubricante usado es susceptible de ser utilizado como materia prima o como una fuente energética. El concepto de “valorización energética” corresponde a la sustitución parcial de los combustibles fósiles tradicionales por combustibles derivados de residuos, mediante la generación de energía y/o la recuperación de calor (Lagarinhos & Tenório, 2008).

Esta planta de tratamiento de aceites lubricantes usados tiene varias etapas a través de las cuales realizan procesos físicos y químicos, tales como pretratamiento por medio de filtración y decantación, proceso de filtración electromagnética, filtración con filtro prensa y procesos químicos de mezcla para obtener los combustibles industriales. En la planta de fabricación de combustibles industriales a partir de ALU como vía de valorización energética utilizada como referencia en este trabajo, la capacidad de procesamiento de la planta para producir los combustibles a partir de ALU es de 39.000 galones mensuales, y la capacidad de almacenamiento de 99.807 galones de ALU. Los aceites usados provienen principalmente de Talleres y concesionarios (Sector automotriz) y de mantenimiento de maquinaria. La tecnología de valorización energética cumple con la función de reciclar un residuo petroquímico, para generar energía y calor a partir de lubricantes usados recuperados en forma de combustibles industriales, es decir que reincorpora productos al sistema energético, lo cual le otorga un carácter de sistema multifuncional, con única entrada y dos salidas. El proceso de valorización energética es un sistema eslabón entre el sistema de producto del aceite lubricante usado (primer ciclo de vida) y el proceso de formulación de mezcla de combustibles para ser usados en hornos industriales (segundo ciclo de vida) Ver **¡Error! No se encuentra el origen de la referencia..**

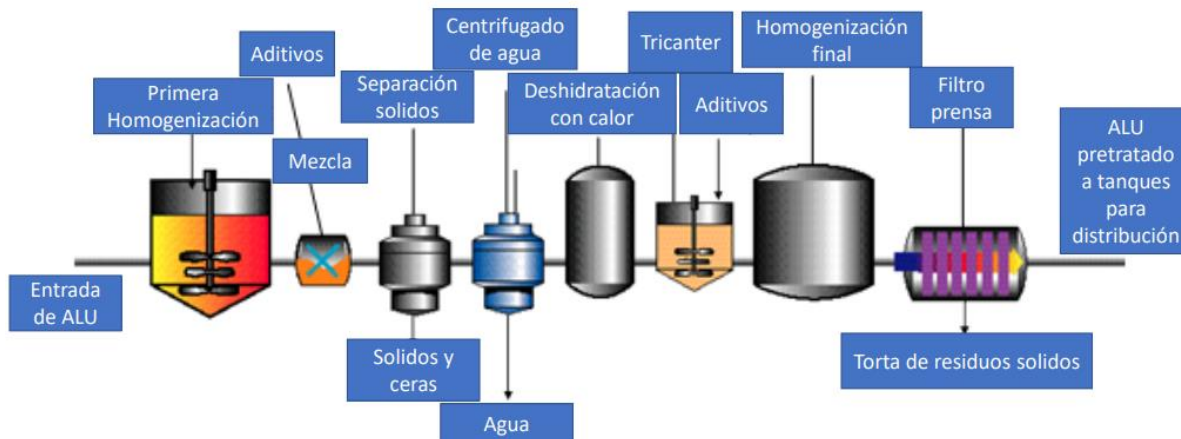


Figura 11. Proceso de tratamiento de ALU para formulación de combustibles industriales al interior de la planta de Valorización energética.

Fuente: Biochemical group, 2014.

Etapas del fin de ciclo de vida del ALU por la vía valorización energética (VE-PT)

Etapas del fin de ciclo de vida del ALU por la vía valorización energética (VE-PT)

Etapas del fin de ciclo de vida del ALU por la vía valorización energética (VE-PT)

Etapas del fin de ciclo de vida del ALU por la vía valorización energética (VE-PT)

Etapas del fin de ciclo de vida del ALU por la vía valorización energética (VE-PT)

Etapas del fin de ciclo de vida del ALU por la vía valorización energética (VE-PT)

Etapas del fin de ciclo de vida del ALU por la vía valorización energética (VE-PT)

El aceite lubricante usado para que ingresa a proceso proviene principalmente de Medellín y su Área Metropolitana, Oriente Antioqueño, Montería, Apartado, Manizales, Pereira, La Pintada, Cañasgordas, La Dorada, entre otras ciudades intermedias del país. Este aceite llega empacado en carrotanques tecnología EURO3 con capacidad entre 3,5-7 toneladas métricas, con un recorrido promedio de 150 km/kg para recoger los ALU's que ingresan a proceso.

Etapas del fin de ciclo de vida del ALU por la vía valorización energética (VE-PT)

Una vez el aceite lubricante llega a la planta de recuperación, se somete a un control e inspección, para determinar cuál debe ser el camino de tratamiento y que posibilidades presenta como combustible industrial, es decir que tipología de mezcla y/o aditivado va a requerir, y que tipología de pretratamiento debe utilizarse. En esta primera etapa del proceso se elimina gran parte de los contaminantes del aceite usado, como agua, sólidos, hidrocarburos ligeros, lodos, partículas gruesas, etc. Este proceso realiza un filtrado físico

doble del ALU y luego un filtrado electroestático. En la mayoría de las plantas de esta vía de recuperación, se utilizan equipos como tricanter, centrífuga, y precipitador electrostático, que permiten una separación casi completa de sólidos y de agua. Esto permite que el aceite pueda ser deshidratado más fácilmente y permite que los usos posteriores en sistemas de atomización o de inyección en hornos y calderas puedan ser más eficientes.

Adicionalmente, una vez realizada la separación de sólidos y agua precipitada, el ALU se somete a un calentamiento a presión atmosférica para completar la deshidratación por medio de calor; esto se hace en una marmita a presión atmosférica y a la temperatura normal de ebullición del agua. En algunos casos, este proceso también conlleva a la separación de algunos volátiles presentes en el aceite, tales como algunos VOCs, nafta, y aromáticos, los cuales deben ser tratados en la planta de recuperación antes de su emisión final al aire.

Mediante este proceso, el ALU filtrado y deshidratado es mezclado con otros combustibles, normalmente más livianos, que permiten lograr ajustes finos en la formulación según el tipo de uso que se le deba dar al combustible final. Estas mezclas normalmente utilizan kerosene, gasolina, nafta natural, liviana de refinación, etc., y aditiva específica como modificadora de viscosidad, modificadora de punto de chispa, antiespumantes, etc., para lograr propiedades específicas en el combustible final formulado. Las principales propiedades modificadas son: viscosidad, inflamabilidad, punto de chispa, poder calorífico. Esto permitirá que, en el uso final, tales combustibles requieran menos calentamiento para su atomización, o requieran menos presión de bombeo, o tengan menos tendencia a la estratificación durante el almacenamiento, o tengan mejor punto de chispa y enciendan más fácil, etc. Todas estas mezclas se hacen en tanques agitados, normalmente atmosféricos, y los aditivos se adicionan con bombas dosificadoras.

Ajuste final de ajuste de los combustibles formulados a partir de ALUs: Este proceso para la preparación de mezclas de combustibles líquidos, consiste en precalentar el ALU formulado hasta la temperatura requerida y luego atomizarlo o inyectarlo según corresponda, es decir convertirlo en partículas pequeñas, con el fin de ofrecer una gran superficie de exposición al momento de la combustión.

Etapa 3: entrega de producto

La entrega de productos se realiza desde la planta de recuperación de ALU el municipio de Copacabana, Antioquia con destino a las vías del Magdalena Medio de Colombia, donde se ubican los hornos donde se usa el combustible Fuel oil derivado del ALU. El transporte de distribución de productos se realiza en carrotaques tecnología EURO3, con capacidad entre 5.000 y 10.000 galones/vehículo, con un recorrido promedio de 330 km/k para la entrega de productos.

El 0.96 K Fuel Oil y el potencial energético de 9120 kcal/k, son usados principalmente como combustible para la producción de calor en hornos y calderas de procesos industriales, para este caso se consideran principalmente en hornos asfaltéros. Los productos para el aprovechamiento energético son usados, además, por el sector cementero, y como fuente de calor para generar potencia (en forma de vapor) o vapor directo de calentamiento en producción de jabones, textileras y floricultoras principalmente. Las características de los productos que se entregan son los siguientes:

a. Línea de producto: Fuel oil

El Fuel oil es un combustible líquido de elevada viscosidad, elaborado a partir de productos residuales de los procesos de refinación del petróleo crudo, y también producido a partir de los aceites lubricantes usados. Es una mezcla de hidrocarburos parafínicos, cicloparafínicos, aromáticos y olefínicos donde predominan cadenas largas de carbono de alto peso molecular, lo que le confiere un elevado poder calorífico. El Fuel oil puede contener también añadidos como el nitrógeno o azufre. La composición química exacta del fuel oil variará dependiendo del origen y de otros factores, está compuesto por moléculas, con más de 20 átomos de carbono, y su color es negro.

Características del Fuel oil: Los combustibles en Colombia están regulados por la NTC 1549 de 1983, que para el caso del Fuel oil No. 6 lo relaciona como equivalente al combustóleo No. 3 y combustóleo No. 6; y al Fuel oil No. 4, en la clasificación dada en la norma ASTM D396-80. Como condición general, esta NTC establece que el combustóleo deberá ser un aceite hidrocarburo homogéneo, libre de ácidos inorgánicos y libre de material extraño sólido o fibroso. Los componentes residuales presentes en el combustóleo deberán permanecer uniformes durante el almacenamiento normal y no deberá separarse

en aceites pesados y aceites livianos. Esta norma establece requisitos que los combustibles No. 3 y No. 6 deben cumplir. Ver Tabla 21.

Tabla 21. Características del combustóleo según la NTC 1549 de 1983

REQUISITOS	No. 3	No. 6
Punto de inflamación, en °C, mín.	55	60
Agua y sedimento, % en volumen, máx.	0,5	2.00
Viscosidad cinemática a 50 °C, en mm ² /s		430-638
Viscosidad cinemática a 40 °C, en mm ² /s	55-24	
Contenido de azufre, % en masa, máx.	1,5	2,5
Punto de fluidez, en °C, máx.	0	15,6
Explosividad, en %, máx.		50.0
Cenizas, en % en masa, máx.	0,1	

Fuente: NTC 1549 de 1983

Usos: El Fuel Oil es conocido también como combustóleo o fuelóleo y está diseñado para usarse como combustible en hornos, secadores y calderas principalmente. También puede utilizarse para calentadores (unidades de calefacción) y en plantas de generación de energía eléctrica. Por otra parte, el fuel oil es un combustible utilizado en la industria en general que tiene la característica de tener puntos de inflamación más altos que los combustibles líquidos más livianos como la nafta. Gracias a esta característica es menos peligroso en su manipulación y es utilizado frecuentemente para alimentar grandes consumos como el de hornos o centrales termoeléctricas. (Gómez, García, Hernández, & Ramírez, 2007).

Precauciones de uso y manejo: El fuel oil al igual que los demás derivados de los hidrocarburos ofrece diferentes tipos de riesgos para la salud humana, medio ambiente, seguridad e impacto derivado de su composición entre otros, entre los cuales se consideran:

Los vapores pueden irritar las mucosas, asfixia por desplazamiento del oxígeno, dolor de cabeza, dificultad al respirar, pérdida de coordinación muscular, visión borrosa y convulsiones. Es tóxico para los organismos acuáticos. A largo plazo puede causar efectos adversos al medio ambiente. Grandes volúmenes de producto pueden penetrar en el suelo y contaminar las aguas subterráneas. No fácilmente biodegradable. Persiste en condiciones anaeróbicas. No clasificado como inflamable, pero puede llegar a arder. Se deben evitar las

condiciones de calor, llamas y chispas; así como evitar agentes oxidantes fuertes y productos peligrosos de descomposición. En condición incompleta genera monóxido y dióxido de carbono y humos tóxicos.

Etapa 4: Sustitución de producto

En esta etapa de sustitución, los subproductos derivados del proceso de Valorización energética sustituyen en una relación 1:1 otros productos de la misma naturaleza que son elaborados con materias primas crudas derivadas del petróleo (Fuel oil), y de la misma manera se sustituye el potencial energético contenido en el ALU. La sustitución se realiza en equivalencias de masa, calidad y funcionalidad, aunque en ocasiones, como ya se ha manifestado en este trabajo, la calidad y funcionalidad deben ajustarse para cada aplicación según el tipo de proceso de combustión al que deba someterse. Sin embargo, el menor precio de estos subproductos son el principal criterio de decisión para el consumo de productos provenientes de la valorización energética y por eso los volúmenes de consumo varían según varía el costo de toda la canasta energética nacional, la cual a su vez está muy influenciada por la variación de los precios internacionales del crudo (Ver Tabla 22).

Tabla 22. Relación de sustitución de subproductos del proceso de valorización energética.

Tecnología	Subproducto	Producto sustituido
Valorización Energética (Puerta-tumba):	0,96 k de Fuel Oil	Fuel Oil #6 origen primera refinación.
	9120 kcal/k	9500 kcal/k

Fuente: elaboración propia.

Etapa 5. Proceso de combustión

Con este proceso de combustión finaliza el ciclo de valorización energética. En este proceso el aceite lubricante usado sirve como combustible sustituto en las cámaras de combustión diseñadas para quemar aceites destilados o aceites pesados de refinación de crudo (fuel oil # 4 y # 6). Los combustibles se bombean hasta el punto de entrada al horno (quemador principal -hogar de combustión-, y quema del combustible). Sin embargo, existen muchos métodos para ingresar el combustible a la cámara de combustión, los cuales dependen del tipo de horno o caldera, del tipo de combustible, del tipo de quemador, de la conformación

de ingreso de aire primario y secundario, etc., ya que en estos sistemas es crítico la relación de aire primario a secundario, la capacidad de formación de microgotas, la forma de contacto, la temperatura del hogar de combustión, etc. Por esta razón se asume en este sistema que se existe una buena combustión, que no depende únicamente del ALU (y sus mezclas) sino del sistema de combustión.

Para este trabajo se ha tomado como referencia la combustión de fuel oil es llevada a cabo en una caldera de 5,9 MW (20 millones de Btu/h, en condiciones de temperatura, turbulencia y exceso de oxígeno estequiométricas. Los principales productos de combustión son calor, agua y dióxido de carbono (CO₂), y emisiones como dióxido de azufre (SO₂), monóxido de carbono (CO), óxidos de nitrógeno (NO₂, NO₃, etc. en general NO_x) y MP -material particulado-. Por lo tanto, los controles de emisiones suelen ser los que se aplican cuando se quema aceite pesado de refinación de crudo por primera vez. En adición, los efluentes gaseosos de tales combustiones son debidamente tratados en precipitadores, torres de lavado, filtros de mangas poliméricas, etc., para garantizar que se han removido material particulado, VOCs, SO_x, CO, mercaptanos, dioxinas, furanos, HC aromáticos y policíclicos y halogenados; esto para garantizar que tal vía de utilización si sea ambientalmente segura.

7.2. Evaluación del análisis de Ciclo de vida -Caso de estudio-

7.2.1. Definición del objetivo y el alcance del Análisis de ciclo de vida - caso de estudio-

a. Objetivo del Análisis de Ciclo de Vida

El objetivo de este estudio es determinar los beneficios ambientales del tratamiento de los aceites lubricantes usados mediante el uso de la tecnología de re-refinación de capa fina en comparación con la tecnología de valorización energética, desde la perspectiva del análisis de ciclo de vida para la fase de fin de la vida, como una manera de ampliar la base de información de las tecnologías de reciclaje de ALU aprobadas por la normatividad colombiana.

b. Contexto de decisión y razones para realizar el estudio

De los aceites lubricantes usados que se producen en el país, aproximadamente al 65% se les realiza tratamiento y disposición por operados avalados, y del 35% de los aceites usados restantes no se tiene registro oficial de su disposición, tratamiento o destinación. En este sentido, cobra relevancia conocer el desempeño ambiental de las tecnologías de reciclaje disponibles para la disposición, tratamiento y recuperación de los aceites lubricantes usados en Colombia, teniendo en cuenta que la mayoría de estos aceites lubricantes se disponen mediante estas dos vías de tratamiento.

c. Audiencia objetivo y difusión al público

La audiencia objetivo está comprendida por los usuarios directos e indirectos de las tecnologías presentadas en este análisis. Si bien la información publicada en este análisis se encuentra en un contexto académico, cualquier parte interesada tiene la posibilidad de consultar los resultados.

d. Alcance del estudio

El alcance de este estudio es realizar un análisis comparativo de tipo descriptivo, entre el sistema de tratamiento de aceites lubricantes usados utilizando la tecnología de re-refinación (modelo Puerta-Puerta) y la tecnología de valorización energética (modelo Puerta-Tumba) como sistema de referencia dentro del mismo sistema de producto de disposición y tratamiento de ALU. Se espera obtener como resultado un perfil ambiental característico de las tecnologías evaluadas a partir de las categorías de impacto ambiental evaluadas para los flujos de referencia y las fases de proceso para cada modelo.

e. Sistema de producto

El sistema de producto en este caso de estudio, corresponde al conjunto de los procesos tecnológicos de re-refinación y valorización energética de los aceites minerales usados, que se llevan a cabo durante la fase del fin de ciclo de vida de este producto, una vez que pierde

la funcionalidad para la cual fue fabricado inicialmente y se convierte en un residuo peligroso con potencial de recuperación de materias primas útiles y fabricación de otros subproductos que se reincorporan al sector industrial y petroquímico por medios de estas tecnologías.

Este sistema de producto funciona solo en la fase del fin de la vida del aceite lubricante usado, el cual puede ser dispuesto y tratado mediante la tecnología de re-refinación o valorización energética, las cuales presentan diferencias en el proceso y en el tipo de subproductos que genera cada vía, lo cual corresponde con un comportamiento ambiental y energético diferenciado, lo cual se presenta como resultado en este estudio.

El ALU mediante la tecnología de re-refinación, se convierte en tres diferentes subproductos para ser usado en el sector petroquímico, principalmente en la cadena de fabricación de lubricantes; y en el segundo caso los ALU se convierten en combustibles para procesos de combustión industrial. En el marco de este análisis, estas dos tecnologías constituyen el sistema de primer plano del análisis de la fase de fin de la vida de los aceites lubricantes usados mediante las tecnologías evaluadas, y por lo tanto, la fracción del ciclo de vida del aceite lubricante desde la cuna hasta el uso, denominado "sistema de fondo" se excluye del análisis comparativo", por ser una fase común previa a las dos vías de tratamiento del aceite lubricante. Esta primera fase del ciclo de la vida del aceite usado, denominados de la cuna a la puerta se presenta como información de referencia en los resultados del estudio. Ver cuadro verde de la Figura 12. Sistema de producto del tratamiento de aceite lubricante usado.

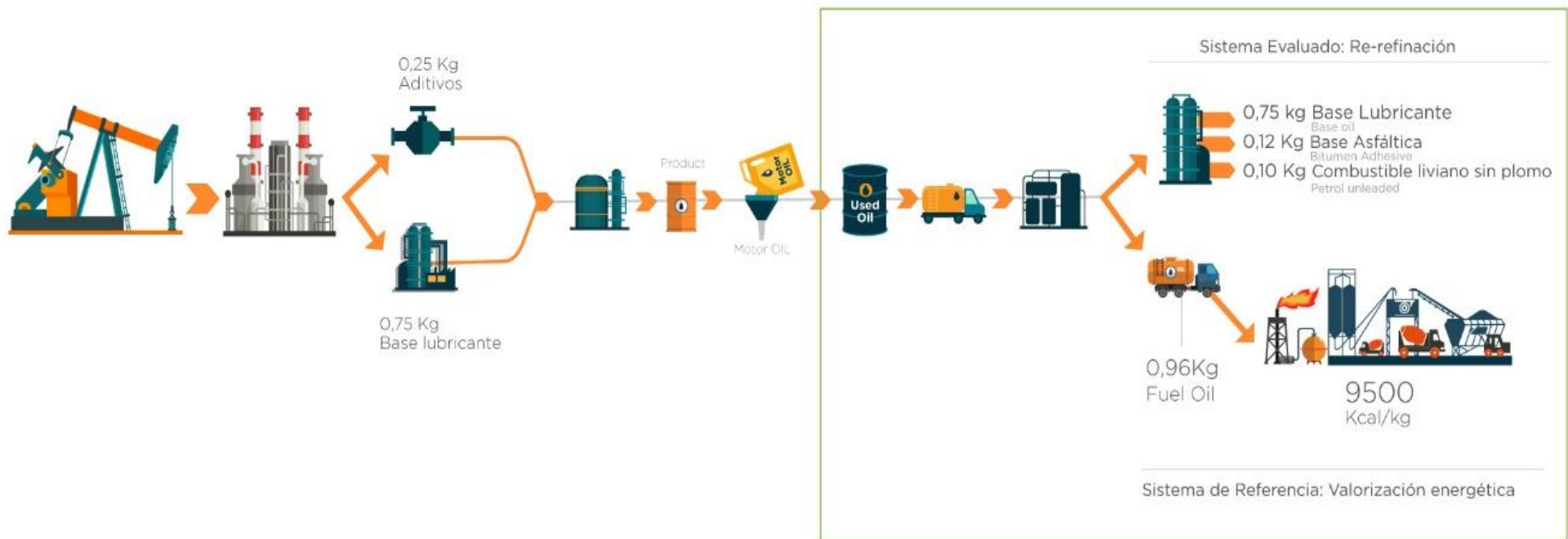


Figura 12. Sistema de producto del tratamiento de aceite lubricante usado, compuesto por la tecnología de re-refinación y valorización energética dentro del recuadro verde.

Fuente: Elaboración propia.

f. Funcionalidad de las tecnologías dentro del sistema de producto

Se describe la funcionalidad de la tecnología de re-refinación y valorización energética, dentro del sistema de producto. Ver Tabla 23.

Tabla 23. Funcionalidad específica de los sistemas evaluados

Funcionalidad del sistema de Re-refinación:	Funcionalidad del sistema de Valorización energética:
- Disposición final de 1 k de aceite lubricante usado como residuo peligroso.	- Disposición final de 1 k de aceite lubricante usado como residuo peligroso.
- Tratamiento y recuperación de materias primas útiles a partir de 1 k de aceite lubricante usado.	- Tratamiento y recuperación de materias primas útiles a partir de 1 k de aceite lubricante usado.
- Formulación y producción de los siguientes productos: 0,75 k de base lubricante, 0,12 K de base asfáltica y 0,10 de base liviana.	- Formulación y producción de los siguientes productos: 0,96 k de Light fuel Oil que aporta 9.210 Kcal/k de poder calorífico.
- Sustitución en el mercado petroquímico de productos de primera refinación por los productos anteriores, a partir de segunda refinación.	- Sustitución en el mercado petroquímico de productos de primera refinación por los productos anteriores, a partir de segunda refinación.

Fuente: elaboración propia.

Así mismo, se presentan las propiedades de los aceites lubricantes usados una vez tratados por medio de estas tecnologías. Ver Tabla 24.

Tabla 24. Propiedades de los aceites lubricantes usados que son transformados mediante las tecnologías evaluadas.

Propiedades del aceite residual usado, transformado vía Re-refinación:	Propiedades del aceite residual usado, transformado vía Valorización energética:
Ofrece una disposición final segura de los ALU, que de otra forma son una fuente alta de contaminación.	Ofrecen una vía de utilización y aprovechamiento como fuente de energía, previniendo su inadecuada disposición en el suelo o en el agua.
Esta tecnología ha sido usada por más de 40 años en Europa y sigue mejorando cada día basada en investigación y desarrollo.	Los combustibles derivados mediante esta tecnología se han usado ampliamente en las industrias a menores costos que los combustibles de primera refinación.
La calidad de los subproductos re-refinados no difiere de la calidad de los productos de primera refinación.	El combustible proveniente de ALU requiere menos aditivos y menos calor para alimentar el proceso de combustión por medio de quemadores de copa rotativa y de atomización.
Permite recuperar la base lubricante, y combustibles que se acumulan durante el uso del lubricante.	Permite una mayor gama de mezclas con otros combustibles livianos.

Propiedades del aceite residual usado, transformado vía Re-refinación:	Propiedades del aceite residual usado, transformado vía Valorización energética:
En los países desarrollados estas bases se promocionan y se vende como Aceite Lubricante Verde, a un mayor precio.	Permite micro distribución a menor costo ya que no hay que hacer compras masivas a Ecopetrol.

Fuente: elaboración propia.

g. Unidad funcional de análisis para ambos procesos tecnológicos

Como resultado de los análisis anteriores de este capítulo, se define la misma unidad funcional para los procesos de Re-refinación y Valoración energética, los cuales pertenecen al mismo sistema de producto, además cumplen una función similar y tienen el mismo flujo de referencia que ingresa a proceso (Ver tabla 25). Estos aspectos comunes permiten la comparación entre ambos procesos y establecer así un marco comparativo ambiental y energético para ambas tecnologías.

Tabla 25. Definición y características de la unidad funcional para ambos procesos tecnológicos.

Unidad Funcional	1 k de aceite mineral usado y recolectado, que ya cumplió su función como lubricante y es potencialmente recuperable mediante procesos tecnológicos, para obtener otros subproductos diferentes al ALU con aplicaciones útiles en el sector industrial.
Sistema de producto:	Sistema de disposición y/o tratamiento de aceites lubricantes usados – ALU-.
Función:	Disposición de Aceites lubricantes usados y recuperación de materiales útiles para otros usos industriales.
Flujo de Referencia	1 k de Aceite lubricante usado que ingresa a proceso.

Fuente: elaboración propia.

h. Flujos de referencia de las salidas del proceso

Los flujos de referencia se asignaron a partir de lo que establece la norma ISO 14044 para procesos multifuncionales. En este caso, los procesos evaluados de re-refinación y valorización energética son sistemas multifuncionales, con una única entrada para ambos procesos es 1k de ALU que equivale a la unidad funcional del proceso, sin embargo, cada proceso genera varios subproductos a partir de la materia prima de entrada, los cuales se

consideran en la ACV como flujos de referencia a los cuales se les realizará la evaluación ambiental para poder obtener el consolidado por modelo (Ver Tabla 26).

Tabla 26. Flujos de Referencia para los sistemas de re-refinación y valorización energética.

Tecnología	Flujo de referencia (Subproductos)
Re-refinación (Puerta-puerta):	0,75 k de base lubricante
	0,12 k de base asfáltica
	0,10 k de base liviana
Valorización Energética (Puerta-tumba):	0,96 k de Fuel Oil con potencial energético de 9500 kcal/k

Fuente: elaboración propia.

i. Resumen del alcance del estudio para cada una de las tecnologías.

A partir de los análisis anteriores de este capítulo, se presenta un resumen del alcance del estudio para cada una de las tecnologías evaluadas. (Ver tabla 27).

Tabla 27. Resumen del alcance del estudio para cada una de las tecnologías.

Fase	RE-REFINACIÓN	VALORIZACIÓN ENERGÉTICA
Tecnología	Recuperación principalmente de las bases lubricantes de los ALU y otros subproductos con las mismas características de los productos de primera refinación de crudo sin hidrot ratamiento.	“Valorización energética” corresponde a la sustitución parcial de los combustibles fósiles tradicionales por combustibles derivados de residuos, mediante la generación de energía y/o la recuperación de calor (Lagarinhos & Tenório, 2008).
Recolección de ALU	Recolección de producto hacia Girardota	Sector automotriz y maquinaria hacia Copacabana
	~ 360 kilómetros/k ALU	~150 km/k ALU
Recuperación y mezcla (proceso)	Operación de destilación (370 °C) y alto vacío (3 mbar)	Capacidad de almacenamiento planta: ~99.807 galones/mes.
	Procesos físicos de presión y vacío.	Procesos físicos y químicos de mezcla
	Capacidad de la Planta: 1500 k/h (80%)	Preparaciones combustibles formulados
	~ 10,5 Millones de galon/año.	
Entrega de producto	Nuevos aceites y procesos industriales	Hornos asfálteros
	Producto terminado: ~230 mil galon/mes	Producto terminado: ~39.000 galones/mes
	550 km/k	330 km/k
Sustitución de producto	0,75 k de base lubricante (1ra R) sin hidrot ratamiento)	Fuel Oil #6 origen primera refinación.
	0,12 k de base asfáltica (1ra R)	9500 kcal/k (sistema energético)

Fase	RE-REFINACIÓN	VALORIZACIÓN ENERGÉTICA
	0,10 k de Gasolina sin plomo (1ra R).	Consumen los combustibles en forma de calor en hornos y/o calderas.
Proceso de combustión	NA	Combustión de fuel oil
		Caldera de 5,9 MW (20 millones Btu/h.)
		Genera: calor, (NO ₂ , NO ₃ , etc. en general NO _x) y MP -. Los efluentes gaseosos son debidamente tratados (Europa).

Fuente: elaboración propia.

7.2.2. Análisis de inventario del Ciclo de Vida -IACV-

El procedimiento seguido para realizar el análisis de inventario incluyó establecer el método de recolección de información y calidad de los datos, definir los límites del sistema de análisis, la construcción del diagrama de flujo (entradas y salidas) y el cálculo de balance de masa y de energía. En este análisis se establecieron los diferentes criterios desde del enfoque de corte y análisis de ciclo de vida tipo atribucional, a partir de los cuales se determinaron los límites para los procesos evaluados.

a. Recolección y calidad de los datos

La información primaria asociada a los procesos tecnológicos de re-refinación (RR-PP) y valorización energética (VE-PT), necesarios para realizar el análisis de ciclo de vida para ambas tecnologías fueron suministrados directamente por las empresas. Los datos de re-refinación fueron suministrados por Biochemical Group SAS a partir de registros propios de la empresa, y la información general de la tecnología de valorización energética fue suministrada por una empresa encargada de producir combustibles en el municipio de Copacabana, Antioquia. En ambas empresas se recolectó información sobre los procesos tecnológicos, logísticos, origen del ALU y destino de los subproductos en una encuesta de 20 preguntas, diligenciada por personas encargadas de cada una de las empresas. Así mismo se tomaron registros durante visitas a cada una de las empresas.

La información del proceso de combustión promedio en Colombia fue suministrada por un experto en el tema, simulando un proceso de combustión bajo el sistema descrito en modelo de valorización energética. Sin embargo, el proceso de sustitución en el consumo de materias primas e impactos ambientales generados, fue modelado en el Software Umberto con información secundaria proveniente de la base de datos de Ecoinvent 3.0. Ver Figura 13. Aquella información de procesos con la cual no se contaba fue consultada en la base de datos Ecoinvent 3.0, disponible en el software Umberto, la cual se detalla en la Tabla 28.

Particularmente el proceso de producción de un aceite lubricante nuevo (AL-CU) fue modelado en su totalidad en el Software Umberto con información secundaria proveniente de la base de datos de Ecoinvent 3.0. Ver Figura 13.

Adicionalmente, la revisión del proceso industrial fue hecha por el ingeniero químico de la empresa Biochemical Group SAS, y la aplicación de la metodología contó con la asesoría de un profesor externo a la universidad experto en el tema de ACV. Así mismo se contó con la opinión de expertos de las empresas y de la universidad Nacional de Colombia para validar la metodología desarrollada y los modelos de los procesos.

AL-CU	RR-PP	VE-PT
<ul style="list-style-type: none"> • <u>INFORMACIÓN SECUNDARIA</u> <ol style="list-style-type: none"> 1. Proceso: producción de 1k de aceite lubricante nuevo 2. Subproceso: Reciclaje de metales <p>Nota: Modelo Aceite Lubricante Cuna- Uso fue modelado en su totalidad en el Software Umberto. Referencia: 75% Base Lubricante y 25% aditivos.</p>	<ul style="list-style-type: none"> • <u>INFORMACIÓN PRIMARIA FASES:</u> <ol style="list-style-type: none"> 1. Recolección ALU 2. Proceso tecnológico 3. Entrega de producto <ul style="list-style-type: none"> • <u>INFORMACIÓN SECUNDARIA:</u> <ol style="list-style-type: none"> 4. Fase Sustitución (<u>Umberto</u>) <ul style="list-style-type: none"> - 0,75 k de base lubricante - 0,12 k de base asfáltica - 0,10 k de base liviana 	<ul style="list-style-type: none"> • <u>INFORMACIÓN PRIMARIA FASES:</u> <ol style="list-style-type: none"> 1. Recolección ALU 2. Proceso tecnológico 3. Entrega de producto <ul style="list-style-type: none"> • <u>INFORMACIÓN SECUNDARIA:</u> <ol style="list-style-type: none"> 4. Fase Sustitución (<u>Umberto</u>) <ul style="list-style-type: none"> - 0,96 k de base lubricante 5. Fase Combustión (<u>Umberto</u>)

Figura 13. Información primaria y secundaria para los modelos de ACV analizados.

Tabla 28. Procesos usados de la base de datos de ecoinvent para los modelos en el Software Umberto.

Nombre Proceso	Nombre Proceso Umberto	Periodo tiempo	Geografía	Tipo	Modelo
Producción de aceite lubricante	Production of lubricating oil	2000 - 2020	RoW: global sin Europa	Flujo de Referencia	AL-CU
Producción base asfáltica de crudo	Bitumen adhesive compound	1994 - 2019	RoW: global sin Europa	Sustitución de materia prima	RR-PP
Producción de base liviana a partir de crudo	Petrol production, unleaded, petroleum refinery operation	2014 - 2019	CO: Colombia	Sustitución de materia prima	RR-PP
Producción de Fuel oil a partir de crudo	Light fuel oil production refinery operation	2014 - 2019	CO: Colombia	Sustitución de materia prima	VE-PT
Manufactura de metales,	Metal working, average for steel product manufacturing	2006 - 2019	RoW: global sin Europa	Producción de caneca	AL-CU
Producción de vapor	Steam production, as energy carrier, in chemical industry	2010 - 2019	RER: Europa	Proceso de Combustión	VE-PT
Producción de energía	Steam production, as energy carrier, in chemical industry	2010 - 2019	RER: Europa	Suministro de energía	RR-PP / VE-PT
Producción de hidrogeno	Hydrogen production, gaseous, petroleum refinery operation	2014 - 2019	CO: Colombia	Suministro de Hidrogeno	RR-PP
Extrusión acero, deformación	Impact extrusion of steel, cold, deformation stroke	2006 - 2019	CO: Colombia	Extrucción de acero	AL-CU

Fuente: Elaboración propia a partir de los datos de la base de datos ecoinvent del software Umberto.

b. Criterios para realizar el análisis comparativo ente ambas tecnologías

- El análisis comparativo descriptivo se realiza a partir de la evaluación del ciclo de vida para la etapa del fin de la vida del aceite lubricante usado en ambas tecnologías.
- La comparación se hace sobre la base de que la función que cumplen ambos sistemas es similar.
- La comparación se hace a partir de la unidad funcional en términos de la función primaria que cumplen ambos sistemas.
- Los modelos del sistema comparados se construirán de manera análoga aplicando las mismas reglas para ambos sistemas.

- Se excluirán aquellas partes del proceso que son idénticas para ambas tecnologías, que corresponde al sistema de fondo.
- La evaluación ambiental se basará en categorías de impacto que demuestre objetividad en el resultado para ambas opciones.

c. Límites con respecto a los procesos evaluados

- Las actividades comparadas cumplen con los permisos de ley.
- Se excluye de este análisis las emisiones y requerimientos materiales y energéticos asociados a la construcción de infraestructura productiva y a la fabricación de equipos utilizados para los procesos.
- Se tendrá en cuenta los volúmenes críticos de valorización energética y aprovechamiento de ALU, determinados por la normatividad vigente.
- Se excluye de este análisis los aceites de origen vegetal y animal. Así como los aceites con contenido de bifenilpoliclorados (PCB).
- Los aceites lubricantes usados que pueden recuperarse en el territorio colombiano deben cumplir con las condiciones de recepción de los ALU establecidas para cada proceso.
- El proceso de combustión se modeló con referencia a un sistema europeo de generación de vapor para la industria petroquímica, lo que supone sistemas de tratamiento de efluentes muy eficientes, por lo que las emisiones de SO_x, NO_x, MP y CO expresadas en K con dos cifras decimales no muestran ningún resultado.
- Las tasas de sustitución de los subproductos se asumen en una relación 1:1

d. Diagrama general del flujo de proceso

Se presenta el diagrama general del flujo de proceso y las convenciones usadas para los procesos para re-refinación (proceso inferior) y valorización energética (proceso superior), con los límites del sistema delimitados. Ver la Figura 14 y Tabla 29.

Frontera de análisis: límites de proceso: Aceite usado que es recolectado a generadores desde el momento en que es recepcionado por el procesador, hasta que es despachado en los diferentes productos que resultan de su procesamiento. Base de cálculo para análisis: 1 kg de aceite usado que entra al proceso

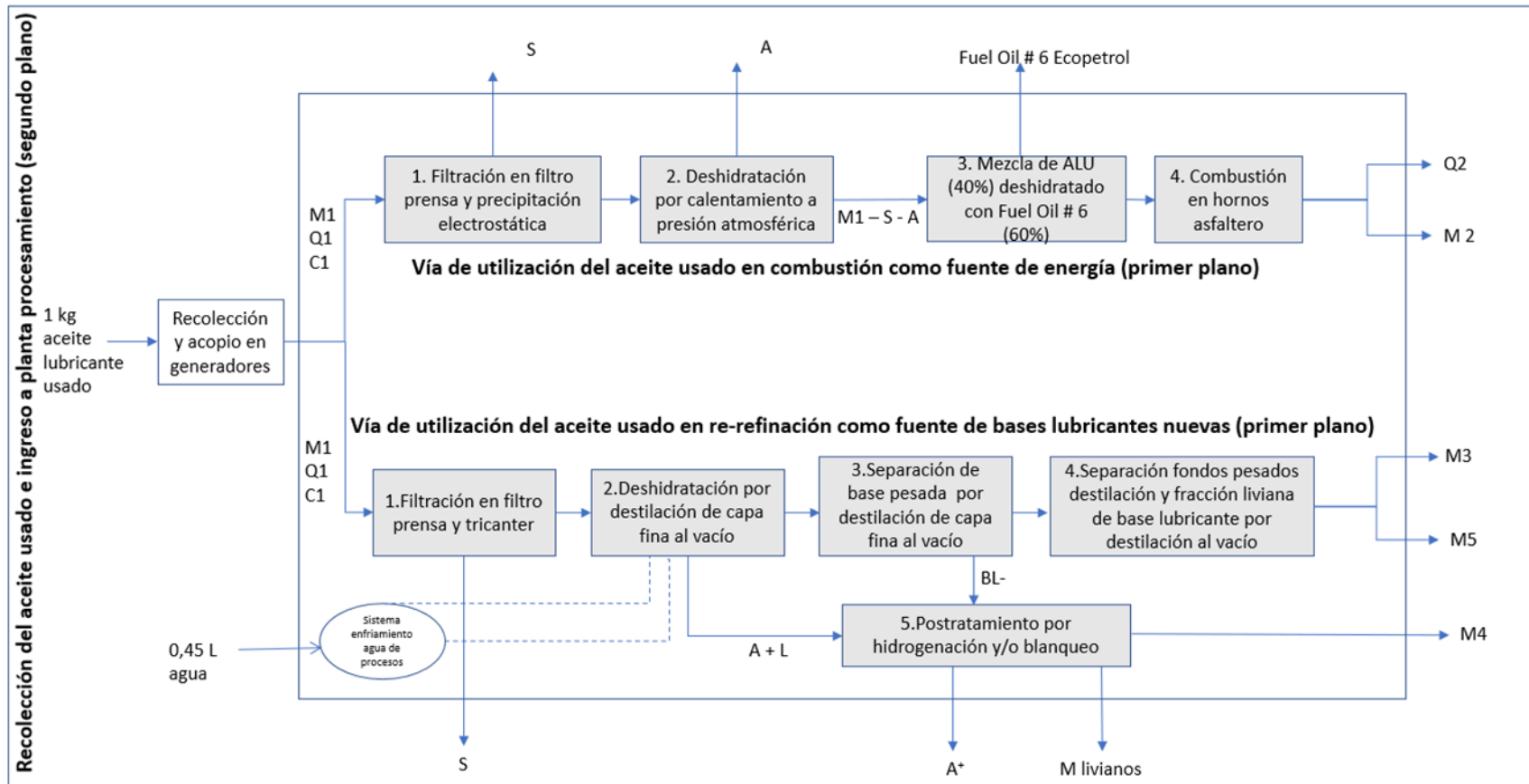


Figura 14. Diagrama de flujo de delimita las fronteras del sistema para el sistema de producto . Fuente: Construcción propia con datos de los procesos industriales analizados.

Tabla 29. Convenciones de las corrientes del diagrama de flujo que delimita las fronteras del sistema.

Corriente	Descripción
M1	Masa de aceite usado que ingresa al sistema: 1 k
Q1	Cantidad de energía contenida en la unidad de masa que ingresa: 9500 kcal
C1	Composición estándar de la unidad de masa que ingresa
S	Masa de sólidos en suspensión que se retiran del proceso de filtración: 0.003 k
A	Masa de agua que se retira de deshidratación atmosférica: 0.04 k
M1 – S - A	Masa de aceite disponible para combustión: 0.957 k
A+	Masa de agua que es llevada a tratamiento en PTAR diseñada para remoción de carga orgánica: 0.04 k. (DBO: 2993 mg/L, DQO: 171917 Mg O2/L)
M livianos	Masa de hidrocarburos livianos de composición semejante a Nafta que resulta del subproceso "Re-refinación": 0.09 k (mezcla de hidrocarburos alcanos entre 9 a 18 átomos de carbono)
M2	Masa de gases que resulta del proceso de combustión en el subproceso "Combustión": Perdida de calor en la corriente de salida de los gases: entre 5% y 7% dependiendo de si tiene o no sistema de recuperación de calor
Q2	Energía utilizable en forma de calor para diferentes aplicaciones en hornos y calderas de la masa filtrada y deshidratada que resulta en el proceso "Combustión": En caso de una caldera para generación de vapor se requiere 54 Kcal por cada K de agua para llevarla a 100°C, o 55.5 Kcal por cada K de agua para llevarla a 130°C
BL-	Masa de base lubricante sin postratamiento que resulta del proceso "Re-refinación en el subproceso 1 de destilación al vacío en evaporador capa fina: es una corriente intermedia y no hace parte del balance final
M3	Base lubricante liviana sin tratamiento para uso en lubricantes baja especificación: 0.10 k
M4	Masa de base lubricante genérica nueva recuperada para formular lubricantes nuevos que resulta de proceso "Re-refinación" en el subproceso 2 de destilación al vacío en evaporador capa fina: 0.75 k
M5	Fondos de destilación para mezcla con base asfáltica virgen: 0.12 k

Fuente: Construcción propia con datos de los procesos industriales analizados.

e. Entradas y salidas por etapas para cada uno de los modelos

A continuación, se presentan los balances de entradas y salidas para los procesos de re-refinación (RR-PP) y valorización energética (VE-PT), como resultado de la modelación de cada una de las etapas del procesamiento de 1 k de aceite lubricante usado en el software Umberto. Se presentan los inventarios de entradas y salidas para cada una de las etapas que comprenden los procesos tecnológicos, desde la etapa 1 de recolección del ALU, así

como las etapas procesamiento tecnológico, entrega de subproductos y etapa de sustitución. El inventario del modelo aceite lubricante cuna uso (AL-CU) se relaciona en el anexo 1, el cual fue modelado en su totalidad a partir de la base de datos Ecoinvent 3.0 del Software Umberto, por lo que corresponde a información secundaria de referencia.

7.2.2.1. Entradas y salidas para el modelo de re-refinación

Entradas y salidas etapa 1: Recolección de ALU para re-refinación

Esta etapa incluye datos de entrada y de salida de la actividad promedio de transporte que recoge 1k de ALU para el proceso de re-refinación. Se modeló el proceso con datos de transporte, flete, en camión de 3,5 a 7,5 ton métricas con tecnología EURO3. Ver Tabla 30.

Tabla 30. Datos de entradas y salidas para la etapa de recolección de ALU, tecnología de re-refinación. extraídos del modelo de inventario en Software Umberto.

Entradas materiales	Valor	Unidad
Calcite, in ground [natural resource/in ground]	0,01	k
Coal, brown, in ground [natural resource/in ground]	0,01	k
Coal, hard, unspecified, in ground [natural resource/in ground]	0,03	k
Energy, gross calorific value, in biomass [natural resource/biotic]	0,03	MJ
Energy, kinetic (in wind), converted [natural resource/in air]	0,01	MJ
Energy, potential (in hydropower reservoir), converted [natural resource/in water]	0,05	MJ
Gangue, in ground [natural resource/in ground]	0,01	k
Gas, natural, in ground [natural resource/in ground]	0,01	m3
Granite, in ground [natural resource/in ground]	0,01	k
Gravel, in ground [natural resource/in ground]	0,19	k
Iron, in ground [natural resource/in ground]	0,01	k
lubricating oil used	1,00	k
Occupation, traffic area, road network [natural resource/land]	0,01	m2*year
Oil, crude, in ground [natural resource/in ground]	0,11	k
Shale, in ground [natural resource/in ground]	0,03	k
Water, turbine use, unspecified natural origin [natural resource/in water]	0,38	m3
Salidas materiales	Valor	Unidad
Carbon dioxide, fossil [air/non-urban air or from high stacks]	0,06	k
Carbon dioxide, fossil [air/unspecified]	0,30	k
Carbon dioxide, fossil [air/urban air close to ground]	0,02	k

Heat, waste [air/unspecified]	0,06	MJ
Heat, waste [water/ground-, long-term]	0,01	MJ
Heat, waste [water/unspecified]	0,01	MJ
Hydrogen-3, Tritium [water/ocean]	0,03	kBq
Hydrogen-3, Tritium [water/surface water]	0,07	kBq
Noble gases, radioactive, unspecified [air/non-urban air or from high stacks]	0,86	kBq
Radon-222 [air/low population density, long-term]	3,22	kBq
Radon-222 [air/non-urban air or from high stacks]	0,09	kBq
Water [water/unspecified]	0,39	m3

Entradas y salidas etapa 2: procesos de re-refinación de doble destilación

Esta etapa incluye el tratamiento primario de los ALU, el proceso tecnológico de doble destilación, y la separación de los productos en la planta de re-refinación. Ver Tabla 31.

Tabla 31. Datos de corrientes de entrada y salida para la etapa de proceso tecnológico de re-refinación.

Entradas				
Tipo	Material	Descripción	cantidad	unidad
Flujo referencia		Aceite usado que ingresa al proceso re-refinación	1	K
calentar proceso		Gas Natural	0,0125611	KWH
Energía motores en proceso		Energía eléctrica	0,2172619	KWH
Agua enfriamiento proceso		Agua de enfriamiento (se recicla infinitas veces dentro del mismo proceso)	0,452381	L
Energía	Q1	Cantidad de energía contenida en la unidad de masa que ingresa. Esta energía no es usada en el proceso de re-refinación.	9500	kcal
Hidrogeno	H2	Hidrogeno que ingresa al proceso para realizar el proceso de Hidrogenación y blanqueamiento de las bases lubricantes y los livianos.	0,010505	K
Salidas				

Tipo	Id	Material	Cantidad	Unidad
Subproducto	M3	Base lubricante liviana sin tratamiento para uso en lubricantes baja especificación. (2%)	0,02	k
Subproducto	M5	Fondos de destilación para mezcla con base asfáltica virgen. (12%)	0,12	k
Producto	M4	Masa de base lubricante genérica nueva recuperada para formular lubricantes nuevos. (75%)	0,75	k
Subproducto	M Livianos	Masa de hidrocarburos livianos de composición semejante a Nafta (mezcla de hidrocarburos alcanos entre 9 a 18 átomos de carbono) (9%)	0,07	k
Recuperación interna de una porción de esta corriente	A+	Masa de agua que se retira de deshidratación atmosférica y es llevada a tratamiento en PTAR diseñada para remoción de carga orgánica (DBO: 2993 mg/L, DQO: 171917 Mg O2/L)	0,04	k
Residuos para tratamiento		Agua final que se lleva a disposición final por tratamiento aeróbico	0,0001065	k
Residuos para tratamiento	S	Masa de sólidos en suspensión que se retiran por filtración y son llevados para tratamiento por incineración	0,0014201	k
Emisión al aire	SO2	Masa de SO2 que se libera directamente al aire	2,4745352	mg
Emisión al aire	MP	Masa de MP que se libera directamente al aire	0,1946969	mg
Emisión al aire	NOX	Masa de NOX que se libera directamente al aire	0,4848582	mg
Emisión al aire	CO	Masa de CO que se libera directamente al aire	0	mg
Emisión al aire	CO2	Masa de CO2 que se libera directamente al aire	0,0590371	m3
Vertimiento agua	DBO	Masa de DBO que se libera directamente al agua	3,212E-06	k
Vertimiento agua	DQO	Masa de DQO que se libera directamente al agua	8,279E-06	k
Vertimiento agua	Grasas aceites	Masa de grasas y aceites que se libera directamente al agua	7,69E-07	k

Vertimiento agua	Solidos totales	Masa de solidos totales que se libera directamente al agua	1,81E-07	k
Vertimiento agua	Hidrocarburos	Masa de hidrocarburos que se libera directamente al agua	4,071E-07	k

Fuente: Construcción propia con datos de los procesos industriales analizados.

Entradas y salidas etapa 3: Entrega de producto de re-refinación

Esta etapa incluye datos de entrada y de salida de la actividad promedio de transporte que entrega los 3 subproductos del proceso de re-refinación (0,75 k de base lubricante, 0,12 k de base asfáltica y 0,10 k de base liviana) en la puerta de las empresas compradoras. Se modeló el proceso con datos de transporte, flete, en camión de 16 a 32 toneladas métricas con tecnología EURO3, Ver Tabla 32.

Tabla 32. Datos de entrada y de salida para la etapa de entrega de producto de re-refinación. extraídos del modelo de inventario en Software Umberto

Entradas material	Valor	Unidad
Coal, hard, unspecified, in ground [natural resource/in ground]	0,01	k
Energy, gross calorific value, in biomass [natural resource/biotic]	0,01	MJ
Energy, potential (in hydropower reservoir), converted [natural resource/in water]	0,01	MJ
Gravel, in ground [natural resource/in ground]	0,09	k
Oil, crude, in ground [natural resource/in ground]	0,03	k
Shale, in ground [natural resource/in ground]	0,01	k
Water, turbine use, unspecified natural origin [natural resource/in water]	0,08	m3
Salidas material		
	Valor	Unidad
Carbon dioxide, fossil [air/non-urban air or from high stacks]	0,01	k
Carbon dioxide, fossil [air/unspecified]	0,09	k
Heat, waste [air/unspecified]	0,02	MJ
Hydrogen-3, Tritium [water/ocean]	0,01	kBq
Hydrogen-3, Tritium [water/surface water]	0,02	kBq
Noble gases, radioactive, unspecified [air/non-urban air or from high stacks]	0,19	kBq
Radon-222 [air/low population density, long-term]	0,72	kBq
Radon-222 [air/non-urban air or from high stacks]	0,02	kBq
Water [water/unspecified]	0,08	m3

Etapa 4: Sustitución de productos de re-refinación

En esta etapa los subproductos provenientes del proceso de la re-refinación y entregados al mercado de los derivados petroquímicos como sustitutos de productos de primera refinación, reemplazan en una cantidad equivalente (relación 1:1) tanto las entradas como las salidas del inventario necesarias para fabricar los subproductos que se están reemplazando. En el inventario de esta etapa los valores de entrada y de salida son negativos e indican una reducción en la sustitución como un “descuento” de materiales que no están siendo usados, ni como materia prima (ver Tabla 33) ni como flujos de salida (ver Tabla 34) para generar los productos que en ausencia de este proceso tecnológico tendrían que producirse de primera refinación.

Tabla 33. Datos de entrada “negativos” para la etapa de sustitución de producto de re-refinación. extraídos del modelo de inventario en Software Umberto.

Entradas materiales	Valor	Unidad
Calcite, in ground [natural resource/in ground]	-0,01	k
Coal, hard, unspecified, in ground [natural resource/in ground]	-0,02	k
Energy, gross calorific value, in biomass [natural resource/biotic]	-0,05	MJ
Energy, kinetic (in wind), converted [natural resource/in air]	-0,01	MJ
Energy, potential (in hydropower reservoir), [natural resource/in water]	-0,05	MJ
Energy, potential (in hydropower reservoir), [natural resource/in water]	-0,01	MJ
Energy, potential (in hydropower reservoir), [natural resource/in water]	-0,01	MJ
Gas, natural, in ground [natural resource/in ground]	-0,05	m3
Gas, natural, in ground [natural resource/in ground]	-0,01	m3
Gas, natural, in ground [natural resource/in ground]	-0,01	m3
Gravel, in ground [natural resource/in ground]	-0,01	k
Iron, in ground [natural resource/in ground]	-0,01	k
Oil, crude, in ground [natural resource/in ground]	-1,01	k
Oil, crude, in ground [natural resource/in ground]	-0,12	k
Oil, crude, in ground [natural resource/in ground]	-0,13	k
Shale, in ground [natural resource/in ground]	-0,01	k
Shale, in ground [natural resource/in ground]	-0,01	k
Water, cooling, unspecified natural origin [natural resource/in water]	-0,03	m3
Water, turbine use, unspecified natural origin [natural resource/in water]	-0,42	m3
Water, turbine use, unspecified natural origin [natural resource/in water]	-0,05	m3
Water, turbine use, unspecified natural origin [natural resource/in water]	-0,06	m3
Water, unspecified natural origin [natural resource/in water]	-0,01	m3

Tabla 34. Datos de salida “negativos” para la etapa de sustitución de producto de re-refinación. Datos extraídos del inventario del modelo en Software Umberto.

Salidas materiales	Valor	Unidad
base oil	-0,75	k
bitumen adhesive compound, hot	-0,12	k
BOD5, Biological Oxygen Demand [water/surface water]	-0,01	k
Carbon dioxide, fossil [air/non-urban air or from high stacks]	-0,16	k
Carbon dioxide, fossil [air/non-urban air or from high stacks]	-0,02	k
Carbon dioxide, fossil [air/non-urban air or from high stacks]	-0,03	k
Carbon dioxide, fossil [air/unspecified]	-0,68	k
Carbon dioxide, fossil [air/unspecified]	-0,04	k
Carbon dioxide, fossil [air/unspecified]	-0,02	k
Carbon dioxide, fossil [air/urban air close to ground]	-0,03	k
Carbon dioxide, fossil [air/urban air close to ground]	-0,01	k
Carbon-14 [air/non-urban air or from high stacks]	-0,02	kBq
Chloride [water/surface water]	-0,02	k
COD, Chemical Oxygen Demand [water/surface water]	-0,01	k
Heat, waste [air/unspecified]	-1,43	MJ
Heat, waste [air/unspecified]	-0,09	MJ
Heat, waste [air/unspecified]	-0,06	MJ
Heat, waste [air/urban air close to ground]	-0,03	MJ
Heat, waste [water/surface water]	-0,01	MJ
Heat, waste [water/unspecified]	-0,35	MJ
Heat, waste [water/unspecified]	-0,01	MJ
Heat, waste [water/unspecified]	-0,01	MJ
Hydrogen-3, Tritium [air/non-urban air or from high stacks]	-0,04	kBq
Hydrogen-3, Tritium [water/ocean]	-0,03	kBq
Hydrogen-3, Tritium [water/surface water]	-0,06	kBq
Hydrogen-3, Tritium [water/surface water]	-0,01	kBq
Hydrogen-3, Tritium [water/surface water]	-0,01	kBq
Noble gases, radioactive, unspecified [air/non-urban air or from high stacks]	-0,86	kBq
Noble gases, radioactive, unspecified [air/non-urban air or from high stacks]	-0,10	kBq
Noble gases, radioactive, unspecified [air/non-urban air or from high stacks]	-0,12	kBq
petrol, unleaded	-0,10	k
Radon-222 [air/low population density, long-term]	-3,54	kBq
Radon-222 [air/low population density, long-term]	-0,41	kBq
Radon-222 [air/low population density, long-term]	-0,50	kBq
Radon-222 [air/non-urban air or from high stacks]	-0,11	kBq
Radon-222 [air/non-urban air or from high stacks]	-0,01	kBq

Radon-222 [air/non-urban air or from high stacks]	-0,02	kBq
Sodium, ion [water/surface water]	-0,01	k
Thorium-228 [water/surface water]	-0,01	kBq
Water [water/ocean]	-0,02	m3
Water [water/surface water]	-0,01	m3
Water [water/unspecified]	-0,42	m3
Water [water/unspecified]	-0,05	m3
Water [water/unspecified]	-0,06	m3

7.2.2.2. Entradas y salidas para el modelo de valorización energética

Entradas y salidas etapa 1: Recepción y tratamiento de ALU para Valorización energética.

Esta etapa incluye datos de entrada y de salida de la actividad promedio de transporte que recoge 1k de ALU para el proceso de valorización energética. Se modeló el proceso con datos de transporte, flete, en camión de 3,5 a 7,5 toneladas métricas con tecnología EURO3. Ver tablas 35.

Tabla 35. Datos de entradas y salidas para la etapa de recolección de ALU, tecnología de valorización energética, extraídos del modelo de inventario en Software Umberto.

Entradas materiales	Valor	Unidad
Calcite, in ground [natural resource/in ground]	0,003	kg
Coal, brown, in ground [natural resource/in ground]	0,002	kg
Coal, hard, unspecified, in ground [natural resource/in ground]	0,012	kg
Energy, gross calorific value, in biomass [natural resource/biotic]	0,011	MJ
Energy, kinetic (in wind), converted [natural resource/in air]	0,004	MJ
Energy, potential (in hydropower reservoir), converted [natural resource/in water]	0,020	MJ
Gangue, in ground [natural resource/in ground]	0,003	kg
Gas, natural, in ground [natural resource/in ground]	0,004	m3
Granite, in ground [natural resource/in ground]	0,003	kg
Gravel, in ground [natural resource/in ground]	0,075	kg
Iron, in ground [natural resource/in ground]	0,004	kg
lubricating oil	1,000	kg
Occupation, traffic area, road network [natural resource/land]	0,004	m2*year
Oil, crude, in ground [natural resource/in ground]	0,044	kg
Shale, in ground [natural resource/in ground]	0,011	kg

Water, turbine use, unspecified natural origin [natural resource/in water]	0,154	m3
Salida Material	Valor	Unidad
Carbon dioxide, fossil [air/non-urban air or from high stacks]	0,024	kg
Carbon dioxide, fossil [air/unspecified]	0,122	kg
Carbon dioxide, fossil [air/urban air close to ground]	0,008	kg
Heat, waste [air/unspecified]	0,024	MJ
Heat, waste [water/ground-, long-term]	0,004	MJ
Heat, waste [water/unspecified]	0,005	MJ
Hydrogen-3, Tritium [water/ocean]	0,014	kBq
Hydrogen-3, Tritium [water/surface water]	0,028	kBq
Noble gases, radioactive, unspecified [air/non-urban air or from high stacks]	0,010	kBq
Radon-222 [air/low population density, long-term]	0,039	kBq
Radon-222 [air/non-urban air or from high stacks]	0,037	kBq
Water [water/unspecified]	0,005	m3

Entradas y salidas etapa 2: Proceso para la preparación de combustibles

Esta etapa incluye el tratamiento primario de los ALU, el proceso tecnológico para la preparación de combustibles. Ver Tabla 36.

Tabla 36. Datos de corrientes de entrada y salida para la etapa de proceso tecnológico preparación de combustibles extraídos del modelo de inventario Software Umberto.

Entradas materiales				
Tipo	Material	Descripción	cantidad	unidad
Flujo de referencia		Aceite usado que ingresa al proceso (densidad: 0.89 k/l)	1	Kg
Masa de combustible de mezcla para ajustar composición a valor aceptado por norma.		Combustible	1,4	Kg
Energía para calentamiento proceso gas natural		Gas natural (gal/galón de aceite usado)	0,00314027	Kwh
Energía motores en proceso.		Energía eléctrica (kwh/galón aceite usado alimentado)	0,13802083	Kwh

Cantidad de energía contenida en la unidad de masa que ingresa. Consumida solo si tratado por incineración como fuente de energía.	Q1	Cantidad de energía contenida en la unidad de masa que ingresa. Consumida solo si tratado por incineración como fuente de energía. Kcla / kg de mezcla	11,333435	Kwh
Salidas materiales				
Tipo	Material	Descripción	cantidad	unidad
Emision al aire	Mp	Masa de mp que se libera directamente al aire	1,7088e-05	Kg
Emision al aire	Mp 10	Masa de mp10 que se libera directamente al aire	1,2864e-05	Kg
Emision al aire	Pb	Masa de pb que se libera directamente al aire	0,00432	Kg
Emision al aire	Co	Masa de co que se libera directamente al aire	0,001608	Kg
Emision al aire	Co2	Masa de co2 que se libera directamente al aire	10,248	Kg
Emision al aire	Nox	Masa de nox que se libera directamente al aire	0,00888	Kg
Emision al aire	So2	Masa de sox que se libera directamente al aire	0,0007344	Kg
Masa liberada	Ash	Masa de ash que se libera directamente	0,08%	Kg
		Suma preliminar	10,2635724	Kg
Agua		Agua	2,57642765	Kg
Calor		Calor generado por la mezcla de (9920 kc/k fuel oil # 6 y 9500 kcl/k alu).	27,200244	Kwh

Entradas y salidas etapa 3: entrega de producto

El transporte de distribución de productos se realiza en carrotanques con capacidad entre 7.5-16 toneladas métricas, tecnología EURO3, con un recorrido promedio de 330 km/k para la entrega de productos. Ver tabla 37.

Tabla 37. Datos de entrada y de salida para la etapa de entrega de producto de valorización energética, extraídos del modelo de inventario en Software Umberto.

Entradas materiales	Valor	Unidad
Coal, hard, unspecified, in ground [natural resource/in ground]	0,004	kg
Energy, gross calorific value, in biomass [natural resource/biotic]	0,004	MJ
Energy, potential (in hydropower reservoir), converted [natural resource/in water]	0,007	MJ
Gravel, in ground [natural resource/in ground]	0,061	kg
Oil, crude, in ground [natural resource/in ground]	0,023	kg
Shale, in ground [natural resource/in ground]	0,006	kg
Water, turbine use, unspecified natural origin [natural resource/in water]	0,057	m3
Salidas materiales		
	Valor	Unidad
Carbon dioxide, fossil [air/non-urban air or from high stacks]	0,010	kg
Carbon dioxide, fossil [air/unspecified]	0,063	kg
Heat, waste [air/unspecified]	0,013	MJ
Hydrogen-3, Tritium [water/ocean]	0,005	kBq
Hydrogen-3, Tritium [water/surface water]	0,011	kBq
Noble gases, radioactive, unspecified [air/non-urban air or from high stacks]	0,133	kBq
Radon-222 [air/low population density, long-term]	0,505	kBq
Radon-222 [air/non-urban air or from high stacks]	0,014	kBq
Water [water/unspecified]	0,058	m3

Entradas y salidas Etapa 4: Sustitución de producto

En esta etapa los subproductos provenientes del proceso de valorización energética son entregados al mercado de los derivados petroquímicos, y cumplen la función de sustituir productos de composición similar en una cantidad equivalente (relación 1:1), así como las entradas y las salidas del inventario necesarias para fabricar los subproductos que se están reemplazando. Los valores negativos en las entradas y salidas indican una reducción o un “descuento” de materiales que no están siendo usados, ni como materia prima (ver Tabla 38) ni como flujos de salida para generar los productos, ya que en ausencia de este producto derivado de proceso tecnológico de reutilización tendría que haberse producido el combustible de primera refinación.

Tabla 38. Datos de entrada y de salida para la etapa de sustitución de producto de valorización energética, extraídos del modelo de inventario en Software Umberto.

Entradas Materiales	Valor	Unidad
Calcite, in ground [natural resource/in ground]	-0,01	kg
Coal, hard, unspecified, in ground [natural resource/in ground]	-0,02	kg
Gangue, in ground [natural resource/in ground]	-0,01	kg
Gravel, in ground [natural resource/in ground]	-0,01	kg
Iron, in ground [natural resource/in ground]	-0,01	kg
Oil, crude, in ground [natural resource/in ground]	-1,05	kg
Shale, in ground [natural resource/in ground]	-0,01	kg
Energy, gross calorific value, in biomass [natural resource/biotic]	-0,02	MJ
Energy, kinetic (in wind), converted [natural resource/in air]	-0,01	MJ
Energy, potential (in hydropower reservoir), converted [natural resource/in water]	-0,05	MJ
Gas, natural, in ground [natural resource/in ground]	-0,05	m3
Water, cooling, unspecified natural origin [natural resource/in water]	-0,01	m3
Water, turbine use, unspecified natural origin [natural resource/in water]	-0,41	m3
Water, turbine use, unspecified natural origin [natural resource/in water]	0,01	m3
Occupation, lake, artificial [natural resource/land]	0,02	m2*year
Energy, potential (in hydropower reservoir), converted [natural resource/in water]	0,09	MJ
Water, turbine use, unspecified natural origin [natural resource/in water]	0,1	m3
Salidas Materiales	Valor	Unidad
BOD5, Biological Oxygen Demand [water/surface water]	-0,01	kg
Carbon dioxide, fossil [air/non-urban air or from high stacks]	-0,17	kg
Carbon dioxide, fossil [air/unspecified]	-0,21	kg
Carbon dioxide, fossil [air/urban air close to ground]	-0,02	kg
Chloride [water/surface water]	-0,03	kg
COD, Chemical Oxygen Demand [water/surface water]	-0,01	kg
light fuel oil	-0,96	kg
Sodium, ion [water/surface water]	-0,02	kg
Heat, waste [air/unspecified]	-0,47	MJ
Heat, waste [water/unspecified]	-0,08	MJ
Carbon-14 [air/non-urban air or from high stacks]	-0,02	kBq
Hydrogen-3, Tritium [air/non-urban air or from high stacks]	-0,04	kBq
Hydrogen-3, Tritium [water/ocean]	-0,03	kBq
Hydrogen-3, Tritium [water/surface water]	-0,06	kBq
Noble gases, radioactive, unspecified [air/non-urban air or from high stacks]	-0,85	kBq
Radium-228 [water/surface water]	-0,01	kBq

Radon-222 [air/low population density, long-term]	-3,52	kBq
Radon-222 [air/non-urban air or from high stacks]	-0,11	kBq
Thorium-228 [water/surface water]	-0,01	kBq
Water [water/ocean]	-0,01	m3
Water [water/unspecified]	-0,42	m3
Carbon dioxide, fossil [air/unspecified]	0,01	kg
Noble gases, radioactive, unspecified [air/non-urban air or from high stacks]	0,01	kBq
Radon-222 [air/low population density, long-term]	0,05	kBq
Water [water/unspecified]	0,01	m3
Carbon dioxide, fossil [air/non-urban air or from high stacks]	0,01	kg
Radon-222 [air/low population density, long-term]	0,01	kBq
Water [water/unspecified]	0,1	m3

Entradas y salidas Etapa 5: Proceso de Combustión

En esta etapa el combustible preparado a partir de aceite lubricante usado, es incinerado en un horno industrial para generar calor. Se presenta el siguiente inventario de entradas y salidas. Ver tabla 39.

Tabla 39. Datos de entradas y salidas para la etapa de combustión de producto. Datos extraídos del inventario del modelo en Software Umberto.

Entradas materiales	Valor	Unidad
Calcite, in ground [natural resource/in ground]	0,01	k
Carbon dioxide, in air [natural resource/in air]	0,09	k
Coal, brown, in ground [natural resource/in ground]	0,06	k
Coal, hard, unspecified, in ground [natural resource/in ground]	0,31	k
Energy, geothermal, converted [natural resource/in ground]	0,01	MJ
Energy, gross calorific value, in biomass [natural resource/biotic]	0,97	MJ
Energy, kinetic (in wind), converted [natural resource/in air]	0,15	MJ
Energy, potential (in hydropower reservoir), [natural resource/in water]	0,35	MJ
Energy, solar, converted [natural resource/in air]	0,01	MJ
Gas, natural, in ground [natural resource/in ground]	1,00	m3
Gravel, in ground [natural resource/in ground]	0,07	k
Iron, in ground [natural resource/in ground]	0,01	k
Occupation, forest, extensive [natural resource/land]	0,06	m2*year
Occupation, forest, intensive [natural resource/land]	0,04	m2*year
Oil, crude, in ground [natural resource/in ground]	0,35	k
Oxygen [natural resource/in air]	4,17	k

Sand, unspecified, in ground [natural resource/in ground]	0,01	k
Shale, in ground [natural resource/in ground]	0,03	k
Volume occupied, reservoir [natural resource/in water]	0,01	m ³ *year
Water, cooling, unspecified natural origin [natural resource/in water]	0,04	m ³
Water, turbine use, unspecified natural origin [natural resource/in water]	2,30	m ³
Salidas materiales	Valor	Unidad
Calcium, ion [water/ground-, long-term]	0,01	k
Carbon dioxide, fossil [air/non-urban air or from high stacks]	0,29	k
Carbon dioxide, fossil [air/unspecified]	0,09	k
Carbon dioxide, fossil [air/urban air close to ground]	3,36	k
Carbon dioxide, non-fossil [air/urban air close to ground]	0,10	k
Carbon-14 [air/non-urban air or from high stacks]	0,01	kBq
Chloride [water/surface water]	0,01	k
Heat, waste [air/unspecified]	0,17	MJ
Heat, waste [water/unspecified]	0,04	MJ
Hydrogen-3, Tritium [air/non-urban air or from high stacks]	0,03	kBq
Hydrogen-3, Tritium [water/ocean]	0,46	kBq
Hydrogen-3, Tritium [water/surface water]	0,40	kBq
Methane, fossil [air/non-urban air or from high stacks]	0,01	k
Noble gases, radioactive, unspecified [air/non-urban air or from high stack]	11,41	kBq
Radium-226 [water/surface water]	0,01	kBq
Radon-222 [air/low population density, long-term]	55,48	kBq
Radon-222 [air/non-urban air or from high stacks]	1,59	kBq
Silicon [water/ground-, long-term]	0,01	k
Sodium, ion [water/surface water]	0,01	k
Sulfate [water/ground-, long-term]	0,03	k
Water [water/unspecified]	2,34	m ³
Xenon-133 [air/non-urban air or from high stacks]	0,03	kBq
Xenon-135 [air/non-urban air or from high stacks]	0,01	kBq
Xenon-135m [air/non-urban air or from high stacks]	0,01	kBq

7.3. Evaluación de impactos ambientales

La evaluación de los impactos ambientales se realizó para el proceso de re-refinación modelo Puerta-Puerta (RR-PP) y para el proceso de valorización energética modelo puerta-tumba (VE-PT) como sistema de Referencia. De manera complementaria, se realizó la evaluación ambiental el modelo Aceite lubricante cuna-uso (AL-CU), bajo las mismas

condiciones de evaluación para los modelos anteriores, con el propósito de tener la perspectiva completa del ciclo de vida del aceite lubricante usado al final del análisis.

La evaluación ambiental para las categorías de impacto ambiental se realizó para cada uno de los flujos de referencia de los modelos analizados. El termino flujo de referencia en esta evaluación ambiental, engloba en un solo termino tanto la unidad funcional del modelo, como los subproductos que genera, para los cuales se asigna a cada uno un flujo de referencia. Así mismo cada flujo de referencia se relaciona con las etapas del modelo específico que está representando. Se presenta en la siguiente tabla los flujos de referencia evaluados por modelo y las etapas que representa, lo cual permite visualizar de manera amplia el desempeño de cada uno de los flujos de referencia (Ver Tabla 40).

Tabla 40. Flujos de referencia para la evaluación ambiental.

Modelo	Flujo de referencia	Abrev.	Etapas
Aceite Lubricante cuna-uso -AL-CU-	1 k de aceite lubricante	A.lub	Fabricación aceite lubricante, transporte y uso del aceite.
	0,04 k de Metal	Metal	Uso y reciclaje de metales
Re-refinación puerta-puerta -RR-PP-	1 k de ALU: <u>unidad funcional</u>	ALU1	Recolección ALU, proceso tecnológico, entrega de producto
	0,75 k de base lubricante	B.lub	Sustitución
	0,12 k de base asfáltica	B.asf	Sustitución
	0,10 k de base liviana	B.liv	Sustitución
Valorización Energética puerta-tumba -VE-PT-	1 k de ALU <u>unidad funcional</u>	ALU2	Recolección ALU, proceso tecnológico, entrega de producto y combustión.
	0,96 k de Fuel Oil con potencial energético de 9500 kcal/k	Fuel oil	Sustitución

7.3.1. Selección y evaluación de categorías de impacto.

Los resultados obtenidos de la evaluación ambiental, muestran que seis de las doce categorías evaluadas arrojaron como resultado un valor igual a cero, que son: Ecotoxicidad terrestre (ECT), Ecotoxicidad marina (ECM), Ecotoxicidad del agua dulce (ECA), Eutroficación del agua dulce (EA), Agotamiento del ozono (AO) y Formación de material

particulado (FMP). Lo cual indica que la relación de entradas y salidas del análisis de inventario no contiene materiales que se relacionen con estas categorías de impacto ambiental y por lo tanto los flujos de referencia evaluados arrojan un valor igual a cero. Estas categorías de impacto serán omitidas en los análisis posteriores (Ver filas resaltadas en la Tabla 41). Por el contrario, las categorías de impacto ambiental evaluadas para los flujos de referencia de los modelos AL-CU, RR-PP y VE-PT que arrojaron resultados valores diferentes de cero son: Cambio climático (CC), Agotamiento de petróleo (AP), Toxicidad humana (TH), Agotamiento metales (AM), Formación de Oxidantes Fotoquímicos (FOF) y Acidificación terrestre (AT); estas categorías de impacto ambiental se continuarán evaluando de aquí en adelante (Ver Tabla 41).

Tabla 41. Evaluación de las categorías de impacto ambiental de los tres modelos analizados AL-CU, RR-PP y VE-PT. Se presentan valores caracterizados para los flujos de referencia

Modelo / flujo de referencia			AL – CU		RR – PP				VE – PT	
Categoría de impacto	Abrev.	*Área impacto	A.lub	Metal	B.lub	B.asf	B.liv	ALU1	Fuel oil	ALU2
Cambio Climático -k CO2-Eq-	CC	G	1,41	0,08	-0,5	-0,04	0,04	0,04	-0,41	4,164
Agotamiento de Petróleo - k oil-Eq-	AP	L	1,42	0,13	-0,93	-0,14	-0,08	0,01	-1,15	1,7
Toxicidad humana -K 1,4-DCB -Eq-	TH	R	0,19	0,01	-0,07	-0,01	-0,01	0,02	-0,04	0,122
Agotamiento de metales -k Fe -Eq-	AM	L	0,2	0,01	-0,02	0	0	0,03	-0,01	0,014
Formaciones oxidantes fotoquímicos -k NMVOC-Eq-	FOF	L	0,02	0	0	0	0	0	0	0,01
Acidificación terrestre -k SO2-Eq-	AT	R	0,01	0	0	0	0	0	-0,01	0,01
Ecotoxicidad agua -K 1,4-DCB -Eq	ECA	L	0	0	0	0	0	0	0	0
Eutroficación del agua -k P-Eq-	EA	L	0	0	0	0	0	0	0	0
Ecotoxicidad marina -k 1,4-DB-Eq-	ECH	R	0	0	0	0	0	0	0	0
Agotamiento de ozono -k CFC-11-Eq-	AO	G	0	0	0	0	0	0	0	0
Formación de material Particulado -k PM10-Eq-	FMP	L	0	0	0	0	0	0	0	0
Ecotoxicidad terrestre -K 1,4-DCB-Eq-	ECT	R	0	0	0	0	0	0	0	0

* Área de impacto: G: Global, R: Regional, L: Local

A partir del resultado anterior, para las categorías de impacto ambiental con valor diferente de cero, se observa que Cambio climático (CC) es la única categoría de impacto ambiental con incidencia global (G), por su parte las categorías de impacto toxicidad humana (TH) y acidificación terrestre (AT) presentan una incidencia regional y las categorías de agotamiento de petróleo (AP), agotamiento metales (AM) y formación de Oxidantes Fotoquímicos (FOF) tienen una incidencia ambiental local (L).

En esta misma tabla, se observan valores positivos y negativos como resultado de la evaluación de los flujos de referencia en cada categoría de impacto ambiental. Los valores positivos indican el aporte cuantitativo del flujo de referencia a la generación del impacto ambiental evaluado, este valor puede llamarse como impacto generado por el flujo de referencia. Por otra parte, los valores negativos indican la cantidad que el flujo de referencia está sustituyendo en la generación del impacto ambiental evaluado, este valor entenderse como impacto evitado o crédito del flujo de referencia.

La evaluación de los impactos ambientales para los modelos de RR-PP y VE-PT presentada, muestra los aportes particulares de los flujos de referencia a cada una de las categorías de impacto. En el caso del modelo RR-PP se observa que todos los flujos de referencia tienen un aporte negativo en esta categoría, particularmente la base lubricante - B.lub- ofrece un impacto evitado equivalente a -0,5 k de CO₂-Eq-/k en cambio climático, y es así el mayor aportante de créditos en esta categoría. En el caso del modelo VE-PT, el ALU2 es el flujo de referencia más aportante a la categoría de cambio climático con una cantidad emitida 4,164 k de CO₂-Eq-/k. Dentro del mismo modelo, el fuel oil otorga un crédito de -0,41 k de CO₂-Eq-/k para la categoría de impacto cambio climático.

La categoría agotamiento del petróleo es otra de las categorías principales dentro del análisis y tiene una relación directa con el consumo de recursos fósiles. En este caso el modelo RR-PP tiene un comportamiento similar a la categoría de impacto anterior, particularmente, en que el flujo de referencia de base lubricante ofrece el mayor aporte de créditos dentro del modelo en esta categoría, con un consumo evitado de -0,93 - k oil-Eq-. El flujo de referencia ALU2 presenta un consumo positivo de 1,7- k oil-Eq- de recursos fósiles. Por su parte, las categorías de impacto toxicidad humana y agotamiento de metales aportan valores positivos asociados a los flujos de referencia de aceite lubricante usado

ALU1 y ALU2. Adicionalmente, en las categorías de impacto formación de oxidantes fotoquímicos y acidificación terrestre, el modelo de re-refinación no aporta ningún impacto en estas categorías.

En la Figura 15 se presenta el resultado de la evaluación ambiental para las seis categorías de impacto seleccionadas evaluadas en los modelos RR-PP (izquierda de la línea punteada) y VE-PT (derecha de la línea punteada).

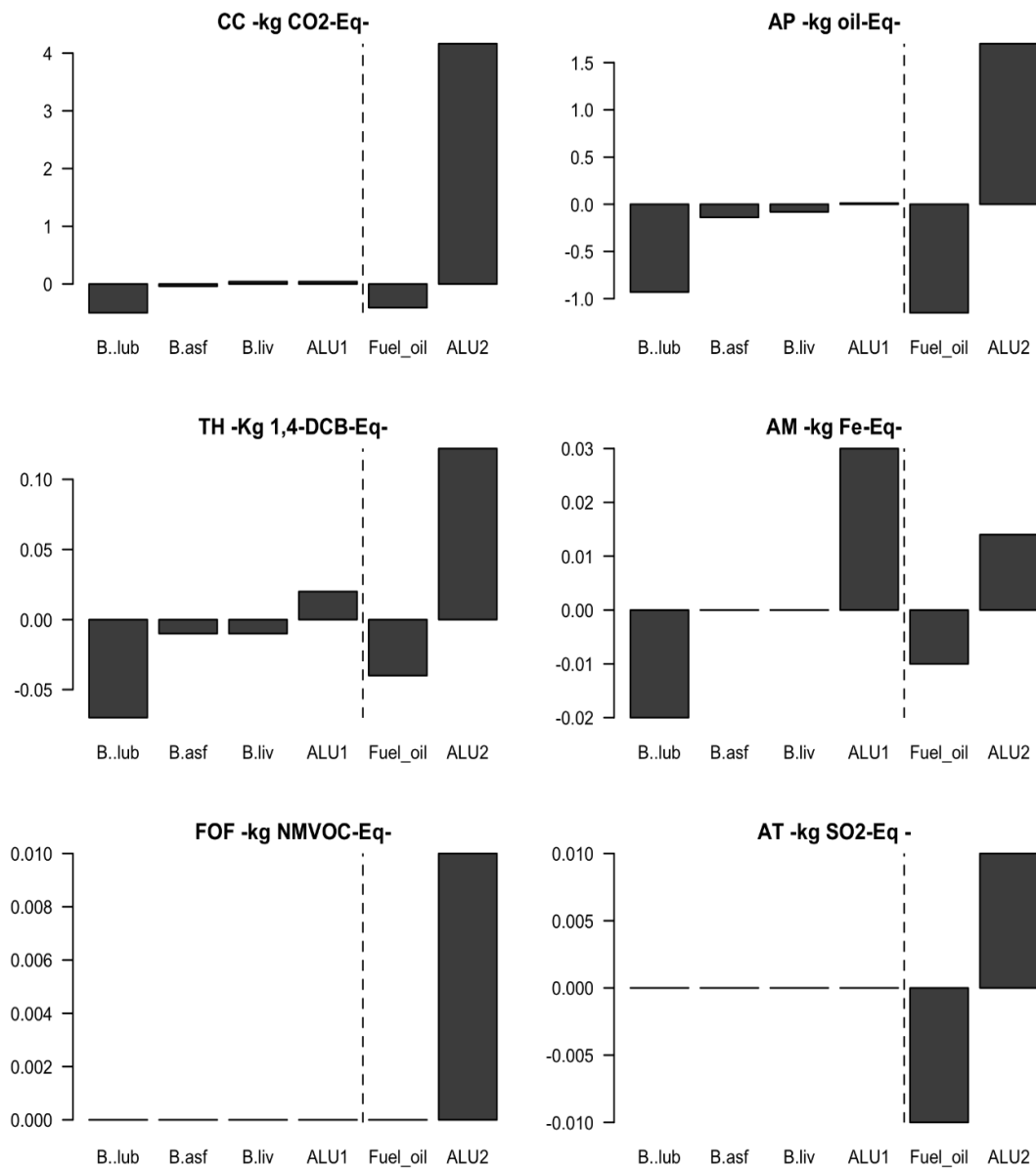


Figura 15. Evaluación de las categorías de impacto ambiental por flujos de referencia, de las opciones de tratamiento de aceites lubricantes usados RR-PP y VE-PT a partir de los valores caracterizados.

Fuente: Elaboración propia.

a. Análisis de contribuciones por etapas y consolidado de impactos ambientales

En este apartado, se amplía la resolución de la evaluación ambiental y se presenta un análisis de contribuciones por etapas de proceso para cada modelo evaluado, así mismo se presenta un consolidado de impactos ambientales generados, impactos ambientales evitados por sustitución y un balance de impactos netos que corresponde a la diferencia entre impactos generados e impactos evitados por etapa y por modelo evaluado, con énfasis gráfico en los modelos RR-PP y VE-PT ver Tabla 42. Los valores para cada categoría de impacto se presentan normalizados -Valor N- con referencia a una persona, y a partir de este valor se expresa el porcentaje de -% C- que cada etapa del proceso realiza al modelo.

Dentro de la tabla mencionada, se hacen consolidados parciales de impactos ambientales evaluados, tal es el caso de fila "impacto generado", la cual equivale a la sumatoria de las cantidades que cada flujo de referencia genera sobre las categorías de impacto, este valor es equivalente al impacto generado por cada modelo. Así mismo, se presentan de manera diferenciada la fila "impactos evitados por sustitución", los cuales hacen referencia al consolidado de cada modelo de aquellos impactos ambientales no generados por cada modelo como créditos del reciclaje; y la fila "impactos netos" es el resultado agregado de las anteriores dos filas de impacto ambiental presentadas, es decir, impactos generados e impactos evitados.

Tabla 42. Análisis de contribuciones por etapas de proceso de los modelos evaluados y consolidado de impactos generados e impactos evitados para las seis categorías.

Modelo	Categorías de impacto	Cambio climático -k CO2-Eq-		Agotamiento petróleo -k oil-Eq-		Toxicidad humana -K 1,4-DCB- Eq-		Agotamiento metales -k Fe-Eq-		Formación de oxidantes fotoquímicos -k NMVOC-Eq-		Acidificación terrestre -k SO2-Eq -	
		Valor N.	% C	Valor N.	% C	Valor N.	% C	Valor N.	% C	Valor N.	% C	Valor N.	%C
AL-CU	Fabricación Aceite Lubricante	1,2E-04	89%	9,7E-04	97%	3,0E-04	90%	2,5E-04	86%	3,8E-04	100%	2,9E-04	100%
	Manufactura	1,3E-05	10%	2,6E-05	3%	3,4E-05	10%	4,2E-05	14%	0,0E+00	0%	0,0E+00	0%
	Transporte	8,9E-07	1%	0,0E+00	0%	0,0E+00	0%	0,0E+00	0%	0,0E+00	0%	0,0E+00	0%
	Impactos generados AL-CU	1,3E-04	100%	1,0E-03	100%	3,4E-04	100%	2,9E-04	100%	3,8E-04	100%	2,9E-04	100%
RR-PP	Recolección ALU	3,5E-05	68,4%	9,0E-05	58,3%	8,5E-06	25,0%	4,2E-05	100,0%	0	0%	0	0%
	Re-refinación	6,2E-06	12,3%	3,9E-05	25,0%	0	0%	0	0%	0	0%	0	0%
	Entrega de Productos	9,8E-06	19,3%	2,6E-05	16,7%	2,5E-05	75,0%	0	0%	0	0%	0	0%
	Impactos generados RR-PP	5,1E-05	100%	1,5E-04	100%	3,4E-05	100%	4,2E-05	100%	0	0%	0	0%
	Impactos evitados - sustitución-	-9,2E-05	- 180,7 %	-8,9E-04	- 575,0 %	-1,5E-04	- 450,0 %	-2,8E-05	-66,7%	0	0%	0	0%
	Impactos netos RR-PP	1,4E-04	-81%	1,0E-03	-475%	1,9E-04	-350%	7,0E-05	33%	0,0E+00	0%	0,0E+00	0%
VE-PT	Recolección ALU	1,2E-05	3,4%	2,6E-05	2,4%	4,2E-06	2,0%	5,6E-06	28,6%	0	0%	0	0%
	Recuperación ALU y Mezcla	1,8E-06	0,5%	6,4E-06	0,6%	0	0%	0	0%	0	0%	0	0%

Categorías de impacto	Cambio climático -k CO2-Eq-		Agotamiento petróleo -k oil-Eq-		Toxicidad humana -K 1,4-DCB-Eq-		Agotamiento metales -k Fe-Eq-		Formación de oxidantes fotoquímicos -k NMVOC-Eq-		Acidificación terrestre -k SO2-Eq -	
	Valor N	% C	Valor N	% C	Valor N	% C	Valor N	% C	Valor N	% C	Valor N	% C
Entrega de Productos	6,6E-06	1,8%	1,3E-05	1,2%	1,7E-05	8,2%	0	0%	0	0%	0	0%
Combustión	3,5E-04	94,4%	1,0E-03	95,9%	1,9E-04	89,8%	1,4E-05	71,4%	1,9E-04	100,0%	2,9E-04	100,0%
Impactos generados VE-PT	3,7E-04	100,0%	1,1E-03	100,0%	2,1E-04	100,0%	2,0E-05	100,0%	1,9E-04	100,0%	2,9E-04	100,0%
Impactos evitados - sustitución-	-3,7E-05	-9,8%	-7,4E-04	-67,6%	-6,8E-05	-32,7%	-1,4E-05	-71,4%	0	0%	-2,9E-04	-
Impactos netos VE-PT	3,3E-04	90%	3,5E-04	32%	1,4E-04	67%	5,6E-06	29%	1,9E-04	100%	0,0E+00	0%

Fuente: Elaboración propia.

Notas:

- Valor N. corresponde a valor normalizado a un ciudadano con relación a la población europea, mediante factores de normalización (FN) contenidos en la herramienta "ReCipe para cada categoría de impacto.
- % C: porcentaje de contribución con respecto al mismo modelo.

b. Contribuciones para los modelos RR-PP y VE-PT

Se presentan de manera consolidada las contribuciones que realizan las diferentes etapas de los modelos RR-PP y VE-PT a cada una de las categorías de impacto ambiental analizadas. El análisis se realiza solo a las etapas similares o “comunes” entre las dos vías de tratamiento de aceites lubricantes usados, que están generando impactos ambientales. Ambas alternativas tecnológicas tienen como primera etapa la Recolección ALU (R), seguida de una etapa de proceso (P) tecnológico particular que corresponden a re-refinación y valorización energética respectivamente. Luego, continúa con la etapa entrega de productos (EP) a los consumidores, hasta esta etapa se realiza este análisis de contribuciones. Si bien la etapa de sustitución de materias primas es una etapa común se excluye de este análisis por ser un impacto evitado, el cual se presenta en detalle más adelante. Particularmente, la etapa de combustión es exclusiva del modelo de valorización energética, por lo tanto, se excluye también de este análisis.

Específicamente, para el proceso tecnológico de re-refinación -RR-PP-, los resultados del análisis muestran que genera impactos directos en cuatro de las seis categorías de impacto ambiental evaluadas, estas categorías de impacto son: cambio climático, agotamiento de petróleo, toxicidad humana y agotamiento de metales. Por su parte, el proceso tecnológico de valorización energética hasta la etapa de entrega de producto, genera impactos ambientales en estas mismas categorías, ya que la formación de oxidantes fotoquímicos y acidificación terrestre están asociadas a las etapas de combustión. En este sentido, este análisis hará énfasis en el proceso tecnológico y presentará en el siguiente apartado la etapa combustión y sustitución.

La etapa de recolección de ALU (R) es la más aportante en todas las categorías de impacto ambiental del modelo RR-PP; aporta el 68% al impacto en cambio climático y el 58% al agotamiento de petróleo, así mismo esta es la única etapa del proceso en la cual se genera AM=100%. Por su parte la etapa de proceso de re-refinación (P) es la menos aportante en la generación de impactos, principalmente aporta en CC es de 12% y en AP es de 25%. Por su parte la etapa entrega de producto (EP) corresponde en gran medida a la actividad de transporte y este aporte en cambio climático es de 19% y en agotamiento de petróleo es de 16,7%. Las etapas del modelo VE-PT tiene un comportamiento similar al proceso de re-refinación cuando se comparan solo los procesos tecnológicos en los impactos CC y AP.

La etapa de recolección de ALU (R) es la más aportante es estos impactos y única etapa con AM, seguida de la etapa de entrega de producto (EP) y con los menores impactos se encuentra la etapa de proceso con aportes al impacto. Por su parte la categoría de agotamiento de metales (AM). Ver Figura 16.

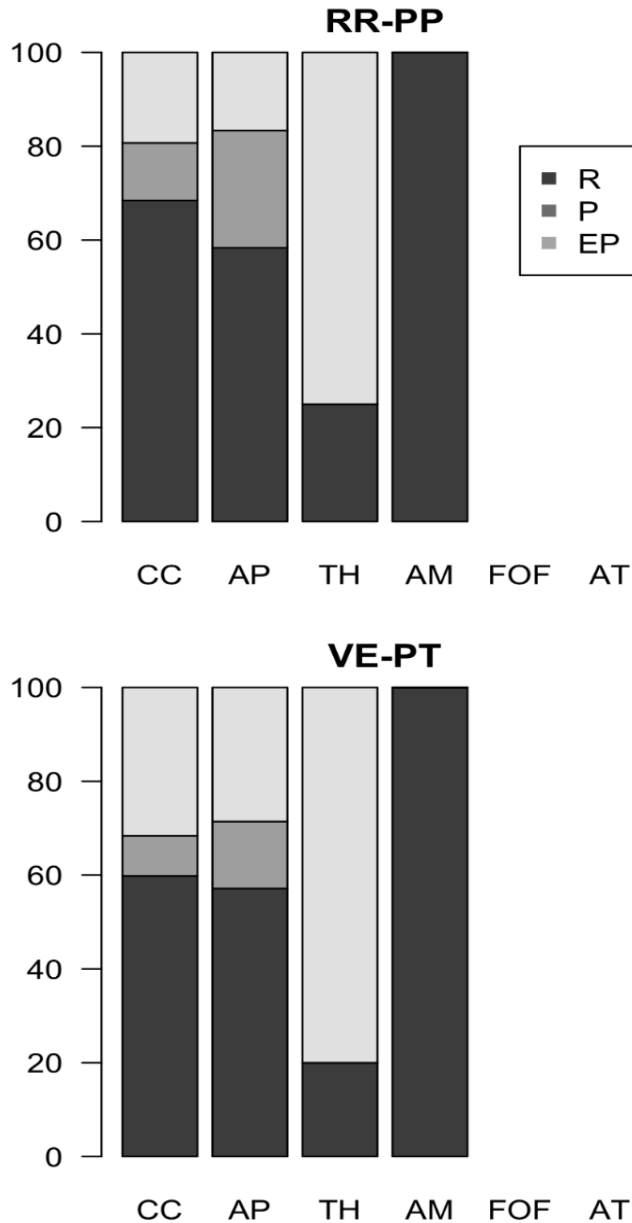


Figura 16. Análisis de contribuciones (%C) de las etapas del modelo RR-PP y VE-PT a cada una de las categorías de impacto.

Nota: Este grafica excluye combustión y sustitución, y considera las etapas de recolección ALU (R), proceso tecnológico (P) y entrega de producto (EP para cada proceso.

Fuente: elaboración propia.

Consolidado de impactos ambientales para los modelos RR-PP y VE-PT

En este apartado de consolidado de impactos ambientales para los modelos evaluados, se desagregan las categorías de impacto ambiental en impactos generados e impactos evitados por sustitución, expresadas en valores normalizados por persona de acuerdo a la Tabla 42. Como ya se mencionó en el apartado anterior, las etapas para ambas vías de reciclaje de ALU son similares hasta la etapa de sustitución, sin embargo, el proceso de combustión es exclusivo para el proceso de VE-PT. En tal sentido, se presentan los impactos ambientales de manera diferenciada entre impactos generados por los procesos tecnológicos (color gris); impactos generados por el proceso de combustión exclusivo para el modelo VE-PT (color negro) y los valores negativos representan los impactos evitados por sustitución (color azul) asociados a cada modelo. Esta diferenciación se impactos se pueden visualizar en la Figura 17. En la misma figura, en la parte inferior (color gris), se aprecia gráficamente el balance neto de las categorías de impacto ambiental por modelo. Este resultado, equivale a descontar los créditos de reciclaje generados por la sustitución (impactos evitados), de los impactos ambientales generados por cada modelo, con el propósito de obtener un perfil de impacto ambiental neto.

De acuerdo a los resultados obtenidos, el modelo RR-PP y VE-PT tienen un perfil ambiental equivalente en impactos generados para cada categoría de impacto sin incluir el proceso de combustión. Este proceso en particular, presenta los mayores impactos ambientales en todas las categorías evaluadas, con valores superiores al 70% en todas las categorías de los impactos con respecto al proceso de VE-PT, y contribuye principalmente con el impacto AP=95,9%, CC=94,4%, TH=89,8%, AM=71%, FOF Y AT=100%.

Por su parte, los impactos evitados están dados por el reciclaje que se realiza de los ALU en forma de diferentes subproductos, de lo cual resulta la sustitución de impactos ambientales por el uso evitado de materias primas. Estos impactos evitados constituyen el beneficio ambiental de estos procesos, que para el caso de RR-PP es mayor con respecto a VE-PT.

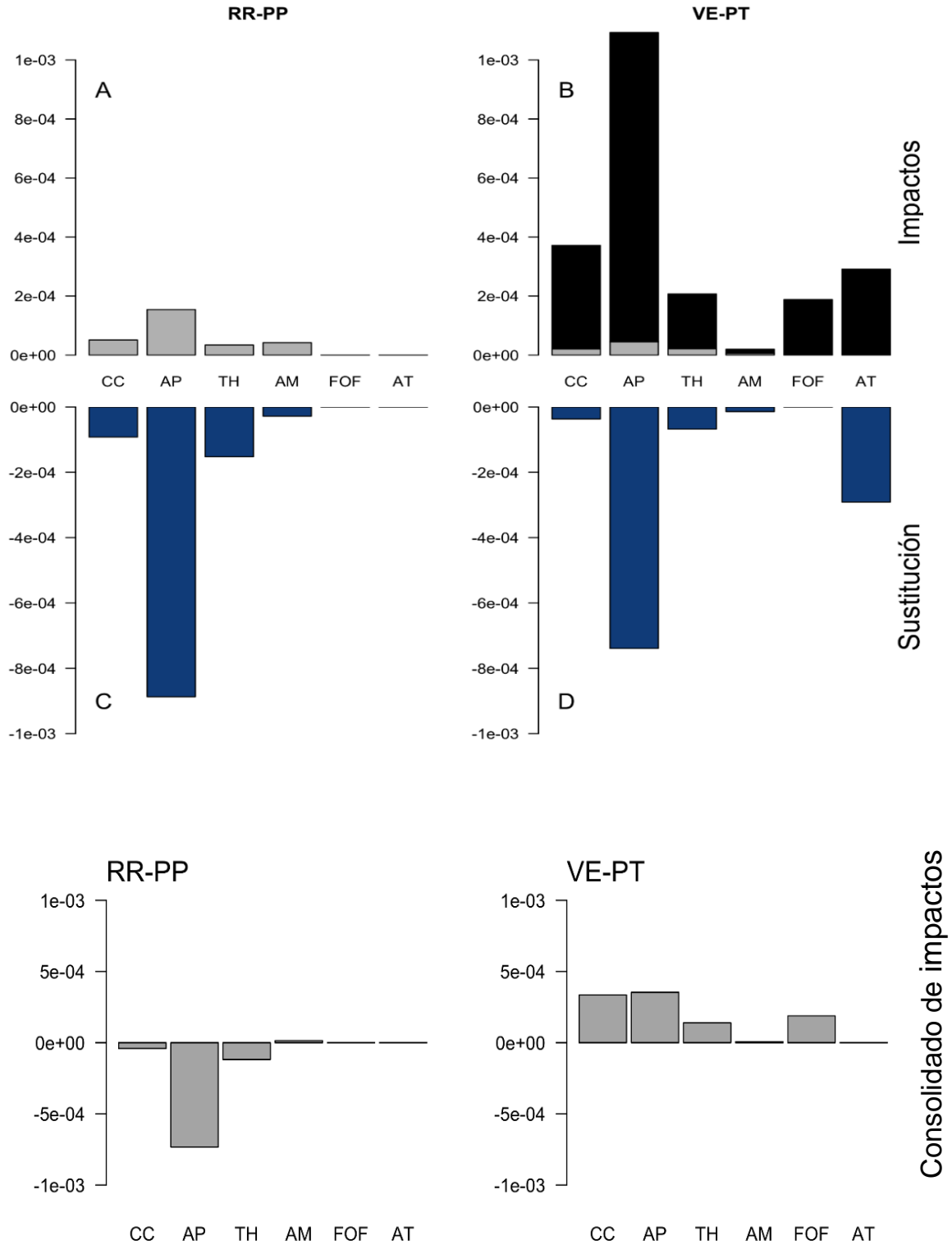


Figura 17. Consolidado de categorías de impacto ambiental generados por el modelo RR-PP y VE-PT (A y B en gris). Impactos generados por combustión del modelo VE-PT (B en negro) e impactos evitados por sustitución (C y D en azul). Se presentan el consolidado de impactos ambientales netos por modelo en (abajo-gris). Todos los valores están normalizados.

Fuente: elaboración propia.

c. Análisis de ciclo de vida del aceite lubricante usado

En este apartado se presenta de forma agregada el ciclo de vida del aceite lubricante usado, en dos etapas. La primera etapa, se denomina ciclo de vida “aceite lubricante cuna-uso¹⁶ (AL-CU)” y corresponde al primer momento de vida del aceite lubricante que inicia desde el momento que se obtiene la base lubricante de petróleo virgen (cuna), pasa por la etapa de fabricación de aceite lubricante y luego se transporta para distribución de consumidores, para finalizar con la etapa de uso del lubricante, para convertirse en un aceite usado. Como se observa en la (Figura 18), el modelo AL-CU genera impactos ambientales en todas las categorías evaluadas a lo largo del ciclo de vida, principalmente en el agotamiento de petróleo, sin embargo las categorías de toxicidad humana, agotamiento de metales (AM), formación de oxidantes fotoquímicos y acidificación terrestre presentan impactos importantes en relación a un ciudadano, incluso mayor que el impacto en cambio climático. Ver Tabla 42. Análisis de contribuciones por etapas de proceso de los modelos evaluados y consolidado de impactos generados e impactos evitados para las seis categorías.

La segunda etapa se denomina fin de la vida del aceite lubricante usado y corresponde a las dos opciones de recuperación del aceite lubricante usado que son “re-refinación puerta-puerta (RR-PP)” y “valorización energética puerta-tumba (VE-PT)”, alternativas de reciclaje de ALU presentadas en este estudio, las cuales indican que una vez usado el aceite, puede tomar una u otra vía, y en este sentido es posible visualizar gráficamente el perfil ambiental del aceite lubricante para cada una de estas rutas de tratamiento.

Modelo AL-CU + RR-PP: corresponde a la agregación de los modelos Aceite lubricante cuna-puerta y re-refinación puerta-puerta. Este modelo indica la trayectoria de impactos ambientales de un aceite lubricante promedio, que es usado en Colombia y se recicla por la vía de re-refinación, para finalmente ser entregado en forma de subproductos recuperados en la puerta de las empresa consumidoras como materias primas para otros procesos.

Este modelo genera impactos ambientales relevantes antes del uso del lubricante en las seis categorías evaluadas, sin embargo al ser tratado por la vía de re-refinación, las mismas categorías de impacto otorgan créditos de reciclaje, expresados en valores negativos, sin

¹⁶ AL-CU fue modelado con datos de referencia de la base de datos Ecoinvent 3.0 disponible en Software Umberto. (Ver Tabla 28).

emabargo, el balance neto de impactos ambientales, es mayor que cero en el primer ciclo de vida del ALI en los terminos que se describió.

Modelo AL-CU + VE-PT: corresponde a la agregación de los modelos Aceite lubricante cuna-puerta y valorización energética puerta-tumba. Este modelo indica la trayectoria de impactos ambientales de un aceite lubricante promedio, que es usado en colombia y se recicla por la vía de valorización energética, se transforma en combustible industrial y es incinerado en un horno para la generación de calor. Este modelo tiene como punto de partida los impactos ambientales generados por el aceite lubricante hasta su uso, a los cuales se le adicionan los impactos ambientales netos del proceso de valorización energética para dar como resutlado un modelo con impactos ambientales agregados de primer uso.

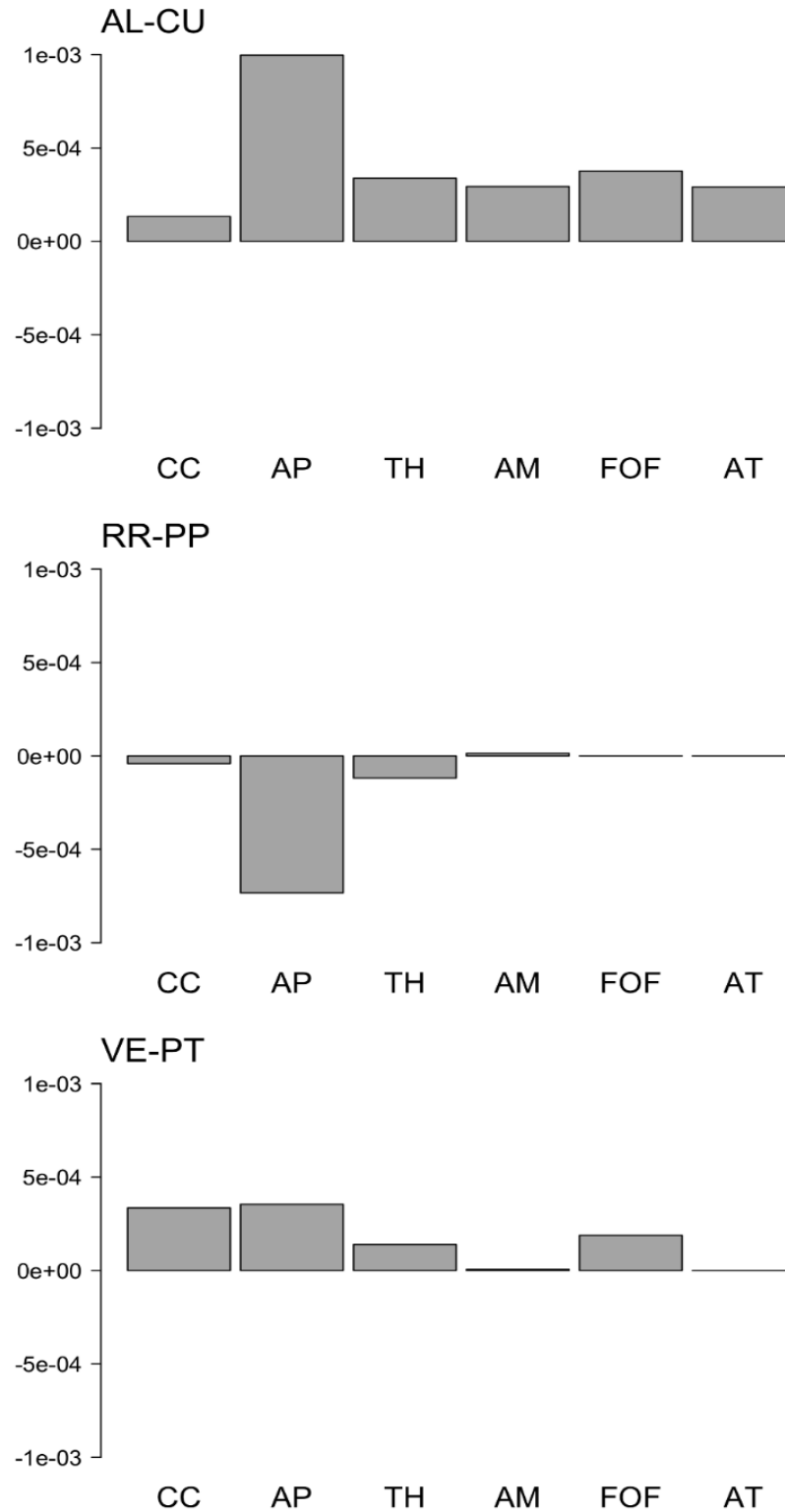


Figura 18. Ciclo de vida gráfico del aceite lubricante usado compuesto por agregación de modelos. Modelo del ciclo de vida del aceite lubricante cuna-uso (AL-CU) y modelos del fin de la vida de ALU compuesto por re-refinación puerta-puerta (RR-PP) y valorización energética puerta-tumba (VE-PT).

Fuente: Elaboración propia.

d. Consolidado de la Huella de Carbono

A partir de los resultados anteriores, se presenta un consolidado gráfico de la huella de carbono, la cual es otra manera de nombrar las emisiones de gases efecto invernadero - GEI- expresadas en unidades de CO₂, aparte de la categoría de impacto cambio climático evaluada en este estudio (ver Tabla 41). Sin embargo, por tratarse de un indicador bastante usado en el área de sostenibilidad, se presenta de manera diferenciada para los tres modelos evaluados (RR-PP, VE-PT, AL.CU), y para cada uno de los flujos de referencia (FR) por modelo. El resultado que se presenta en la Figura 19 como huella de carbono neta, es el resultado agregado de las emisiones de GEI generadas y las emisiones de GEI evitadas de todos los flujos de referencia de cada modelo. De acuerdo a lo anterior, la menor huella de carbono la ofrece el modelo RR-PP, seguido del modelo AL-CU y finalmente el modelo de VE-PT que casi dobla al modelo anterior. Si se comparan los procesos de RE-PP y VE-PT sin incluir la etapa de combustión, la huella de carbono de ambos modelos sería negativa y muy similar.









Re-refinación (RR-PP)(Kg Co2 eq/modelo)				
Base Asfáltica (-0.12 kg)	Base lubricante (-0,75 kg).	Base liviana (-0.10 kg)	Aceite lubricante usado (1 kg ALU)	Huella Carbono Neta
				-0,45
Valorización energética (VE-PT) (Kg Co2 eq/modelo)				
Light Fuel oil (-0,96 kg)		Aceite lubricante usado (1 kg ALU)		Huella Carbono Neta
				3,754
Aceite lubricante (AL-CU) (Kg Co2 eq/modelo)				
Metal working (-0,04 kg)		Aceite lubricante) (1 Kg)		Huella Carbono Neta
				1,53

Figura 19. Consolidado gráfico de la huella de carbono, como indicador de sostenibilidad de los tres modelos evaluados RR-PP, VE-PT y AL-CU.

Fuente: Elaboración propia.

e. Evaluación energética a partir de la Demanda energética acumulada

Como se mencionó anteriormente, la demanda de energía acumulada representa la energía directa e indirecta utilizada durante el ciclo de vida del producto, en las categorías de energía fósil (petróleo, carbón y gas natural), hídrica (agua) y geotérmica (calor interno de la tierra). Esta energía se relaciona con los consumos durante la extracción, fabricación y eliminación de las materias primas y auxiliares del producto, dependiendo de la etapa del ciclo de vida analizada, para este se analiza el aceite lubricante antes y después del uso de manera separada y se aplican las mismas condiciones de corte que en la evaluación ambiental. Este análisis es complementario a la evaluación de impacto ambiental, y se realiza para añadir información relevante sobre la energía primaria consumida, lo que indica finalmente el consumo energético agregado del modelo evaluado, como también el agotamiento de determinada fuente de energía. A continuación, en la Tabla 43 se presenta el resultado de la evaluación de la demanda acumulada de energía para los tres modelos y sus respectivos flujos de referencia.

Tabla 43. Evaluación del indicador Demanda Acumulada de Energía para los modelos AL-CU, RR-PP y VE-PT.

Modelo / flujo de referencia	Tipo de energía (MJ-Eq)			
	Fósil	Geotérmica	Hídrica	DAE Neta
Aceite lubricante cuna-uso (AL-CU)	66,11	0,02	0,68	66,81
Aceite lubricante	60,36	0,02	0,65	61,03
Metal	5,75	0	0,03	5,78
RR puerta-puerta (RR-PP)	-50,17	0	0,73	-49,44
Aceite lubricante usado	0,53	0	0,32	0,85
Base lubricante	-41	0	0,23	-40,77
Base asfáltica	-5,84	0	0,15	-5,69
Base liviana	-3,86	0	0,03	-3,83
V.E puerta-tumba (VE-PT)	11	0,01	0,39	11,4
Aceite lubricante usado	61,23	0,01	0,44	61,68
Fuel oil	-50,23	0	-0,05	-50,28

Fuente: Elaboración propia.

Para ampliar la resolución del análisis, se detalla a continuación los aportes del proceso de sustitución de producto equivalente a créditos del reciclaje en la categoría DAE consolidada por modelo y flujo de referencia en forma tabulada y gráfica. Ver Tabla 44.

Tabla 44. Créditos del reciclaje en la categoría de impacto Demanda acumulada de energía para los modelos AL-CU, RR-PP y VEPT.

Modelo	Flujo Referencia -FR-	FR (k)	DAE	Sustitución	Sustitución total	DAE Neta
AL-CU	Aceite lubricante	1	67,47	0	-0,66	66,81
	Metal	-0,04		-0,6		
RR-PP	Aceite lubricante usado	1	10,92	0	-60,36	-49,44
	Base lubricante	-0,75		-48,49		
	Base asfáltica	-0,12		-6,24		
	Base liviana	-0,1		-5,63		
VE-PT	Aceite lubricante usado	1	61,68	0	-50,28	11,4
	Fuel oil	0,96		-50,28		

Fuente: Elaboración propia.

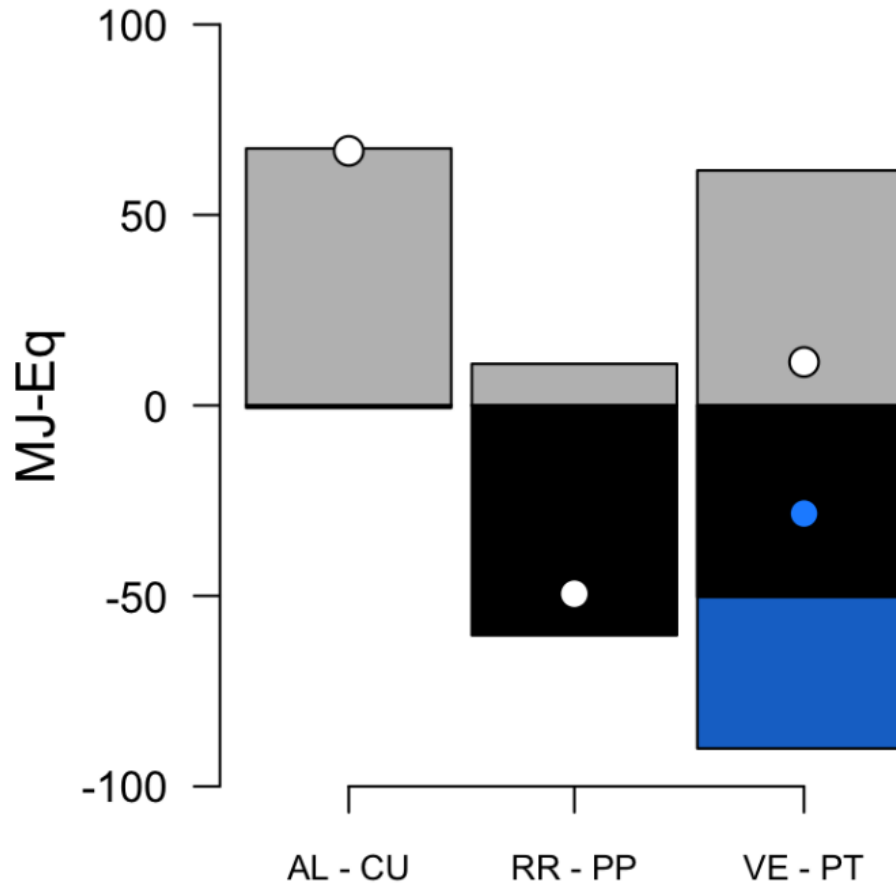


Figura 20. Balance del indicador Demanda Acumulada de energía para os modelos AL-CU, RR-PP y VE-PT.

Fuente: elaboración propia

El resultado anterior presentado en la gráfica y en la figura 20, muestra que únicamente el modelo de RR-PP presenta un valor negativo en la DEA neta derivado principalmente del proceso de sustitución de producto con un aporte neto de -49,44 MJ/k que puede considerarse como un ahorro energético en la producción de los productos que sustituye. De manera similar, el ahorro energético del modelo VE-PT es -50 MJ/k, sin embargo, la DAE neta es 11,4 MJ/k derivado de un impacto superior en el proceso de combustión, sin embargo, es en este proceso donde se encuentra el valor de esta tecnología, ya que realiza una sustitución real de 9500 Kcal/k en el sector industrial. Por su parte, el modelo AL-CU presenta un consumo neto de 66,81 MJ/k con una sustitución asociada al reciclaje de canecas en las

cuales se transporta el aceite lubricante. A continuación, se presenta gráficamente los resultados, donde el color gris represente la DAE, el color negro representa la sustitución de producto y el color azul representa la sustitución energética para el caso del modelo VE-PT. Ver Figura 20.

7.4. Interpretación de resultados

La primera fuente de resultados para realizar este análisis fue la metodología planteada, que tuvo como punto de partida la norma ISO 14040, y la aplicación de varios elementos tomados de la literatura y el software para modelar los procesos. Para iniciar, se menciona que la información para el ACV de las alternativas de tratamiento de aceites usados, fue tomada de fuentes primarias, opiniones de expertos e información secundaria, para modelar los procesos en el software Umberto LCA+, a partir del inventario de entradas y salidas. Los resultados caracterizados de la evaluación ambiental fueron normalizados para hacer comparables los impactos ambientales de los modelos analizados en términos de magnitud, para cada flujo de referencia en relación a la masa y para cada categoría de impacto ambiental. Así mismo, el análisis de impactos ambientales se realizó con enfoque de corte para los modelos analizados, y para el caso de las alternativas de reciclaje de ALU, se asumió que el ALU llega a las plantas libre de cargas ambientales.

Adicionalmente, se presentan resultados para el modelo AL-CU como un referente para visualizar el ciclo de vida completo de ALU, este modelo se proyectó a partir de datos hipotéticos promedio para Colombia y usando procesos contenidos en la base de datos referenciada. A partir de los planteamientos de la norma ISO 14044 para sistemas multifuncionales en un contexto comparativo, se aplicó un enfoque de jerarquización en forma de expansión del sistema, con el fin de determinar los créditos del reciclaje derivados de la producción evitada de materias primas y contaminación, y de esta manera contabilizar las funciones secundarias que otorgan créditos por la producción evitada que ofrece el reciclaje. Dentro la perspectiva del

ciclo de vida, la contribución total de los impactos ambientales de los modelos se obtuvo como el resultado de las diferencias entre el impacto del tratamiento de recuperación de los aceites usados menos el impacto del sistema principal evitado, este último representa la bonificación o los créditos para cada modelo.

Si bien los modelos RR-PP y VE-PT cumplen la misma función de disponer y tratar los aceites lubricantes usados bajo un enfoque de reciclaje, los subproductos y los impactos ambientales asociados a cada una de las vías de tratamiento analizadas difieren principalmente en el proceso tecnológico, en el tipo y cantidades de los subproductos entregados y en el uso final de los subproductos en el mercado. Los subproductos de RR-PP se reintegran al ciclo petroquímico, mientras que los derivados del proceso de VE-PT terminan su vida en un proceso de combustión, de esta manera, tanto los usuarios que entregan los ALU a las plantas de tratamiento, como los usuarios que usan los subproductos son diferentes para ambas tecnologías. En ese sentido, cada usuario tiene una perspectiva diferente sobre cual tecnología puede ser mejor. Por su parte, ambos procesos tienen etapas similares que corresponden a la etapa de recolección de ALU y a la etapa de entrega de subproductos. Lo cual se evidenció en la generación de impactos ambientales “similares” para ambos modelos. La única etapa diferente entre ambos modelos es la combustión de fuel oil, exclusiva del modelo VE-PT.

a. Resultados con respecto a la evaluación ambiental

Se encontró que seis de las diez categorías de impacto evaluadas presentan un valor igual a cero, que son: ecotoxicidad terrestre, ecotoxicidad marina, ecotoxicidad del agua dulce, eutroficación del agua dulce, agotamiento del ozono y formación de material particulado. Si bien este resultado es coherente con los procesos evaluados como se explicó al inicio de este apartado, también ratifica la importancia de los procesos tecnológicos y operaciones seguras en la cadena de los aceites lubricantes usados. De manera paralela, las categorías de impacto ambiental evaluadas para los modelos RR-PP, VE-PT y AL-CU, que arrojaron como resultado

valores diferentes a cero, evidencian que la incidencia geográfica del ciclo de vida del aceite lubricante hasta el fin de la vida tiene lugar a escala regional y local donde se desarrollan los procesos tecnológicos de producción, manufactura y uso de los subproductos. Las cuales son: toxicidad humana y acidificación terrestre, las cuales registran mayor impacto a una escala regional, agotamiento de petróleo, agotamiento metales y formación de oxidantes fotoquímicos tiene mayor incidencia local. Por último, el cambio climático es la única categoría de impacto ambiental con incidencia global.

La categoría ambiental con mayor relevancia para todos los modelos evaluados es el agotamiento de petróleo, derivado directamente del uso de la base lubricante como constituyente principal del aceite lubricante. Este impacto, es relevante tanto en el consumo de materias primas frescas (impacto generado) necesarias para la fabricación del aceite lubricante (97%), como en la sustitución de productos derivados del petróleo, por subproductos provenientes del reciclaje del ALU en forma de impactos evitados, que para el caso de RR-PP corresponde al -475% y para VE-PT corresponde a -67%. Lo cual sugiere una disminución en el uso de materias primas al aplicar estas tecnologías.

Un resultado que llama la atención en los tres modelos evaluados, es el consumo de metales que se ve reflejado en la categoría de impacto ambiental agotamiento de metales. En primer lugar, se evidencia esta contribución significativa por el uso de las canecas de metal de 55 galones, como se le conoce en el mercado. En estas se realiza el transporte del aceite lubricante antes y después del uso con una relación de consumo de 0,21 k metal/k aceite y una tasa de reciclaje promedio del 30%. Particularmente este impacto, tiene un 14% de contribución en la manufactura del aceite para el modelo AL-CU. Mientras que para los modelos RR-PT y VE-PT en la etapa de recolección de ALU con una contribución del 100% y 28% respectivamente. Adicionalmente, contribuye al consumo de metales la base tecnológica de las actividades industriales, que para el primer modelo fabrica el

aceite lubricante (14%) y para el modelo VE-PT (71,4%) consume los combustibles en hornos con componentes metálicos en su sistema de combustión.

La categoría global cambio climático es especialmente relevante para los modelos AL-CU y VE-PT, en cuyo caso la fabricación del aceite lubricante sigue siendo la etapa con mayores impactos para el primer modelo (89%) y la etapa de combustión (94%) para el segundo modelo. En el caso del modelo RR-PP, este impacto es relevante de manera agregada para las etapas de recolección de ALU y entrega de producto (77,7%), como consecuencia de las operaciones de transporte. Sin embargo, al comparar estas mismas etapas agregadas con el modelo de VE-PT, se encuentra un impacto 30% menor con respecto a la re-refinación, como resultado de una menor distancia recorrida para la recolección del ALU y entrega del producto. Esta situación se explica debido a la ubicación de los proveedores de ALU para las dos plantas analizadas, lo cual no debe tomarse como resultado generalizable ya que es variable según la ubicación geográfica de generadores y procesadores, según patrones de consumo y según época del año. Esta categoría de impacto, además se presenta de manera diferenciada como huella de carbono por tratarse de un indicador bastante usado en el área de sostenibilidad.

La categoría de impacto acidificación terrestre, en la cual se contabilizan las emisiones atmosféricas de dióxido de azufre que luego se depositan al suelo, vegetación o agua, solo genera contribuciones en los modelos VE-PT y AL-CU con un valor correspondiente a 0,01 k SO₂-eq/k (equivalente a 1x10⁷ microgramos/m³). Llama la atención este resultado, porque este valor es superior a los 100 microgramos/m³ de SO₂ que permite la ley colombiana de calidad del aire, lo que significa que cada k de aceite lubricante producido a partir de refinería de crudo, o incinerado por la vía de combustión tendría un efecto de acidificación terrestre que está un millón de veces por encima de lo permitido. Es importante tener en cuenta, que el SO₂ en el aire pasa de ácido sulfúrico a ácido sulfuroso, el cual por cada k de SO₂ genera estequiométricamente 1,5 k de ácido sulfúrico cuando se hidroliza. Es decir que esos valores que se liberan a la atmósfera, se integran al suelo creando acidificación terrestre cerca de las fuentes de generación. Este impacto particular

se controla con el uso de un sistema de lavado de gases (scrubber) para remoción de SO₂, el cual no es utilizado en Colombia actualmente. Es decir que se puede mejorar el rendimiento ambiental de una combustión con tecnología moderna, pero ese no es el caso general colombiano, para el cumplimiento de la resolución 1446 de 2005.

El impacto ambiental toxicidad humana es quizás uno de los más complejos de analizar, ya que depende de varios factores impulsores como cantidad emitida del contaminante, movilidad, persistencia, patrones de exposición y toxicidad humana de una sustancia química. Por su parte, este impacto es preponderante en la etapa de fabricación del aceite lubricante (90%) en AL-CU y en la etapa de combustión (89,8%) de la vía VE-PT. En el caso de los aportes netos para las etapas que involucra transporte para RR-PP es de 0,02 -K 1,4-DCB -Eq- y para VE-PT (sin combustión) es de 0,01-K 1,4-DCB -Eq-.

Por último, la formación de oxidantes fotoquímicos es un impacto local presente solo en los modelos AL-CU y VE-PT y está asociado a procesos industriales que emiten óxidos de nitrógeno e hidrocarburos no saturados, principalmente en las etapas de fabricación del aceite lubricante (100%) y en la etapa de combustión (100%). Particularmente, el proceso de re-refinación no contribuye con la generación de este impacto.

b. Resultados de la evaluación de demanda acumulada de energía

De acuerdo con los resultados en esta evaluación, la energía fósil es el tipo de energía con mayor demanda, para los tres modelos. Particularmente para el modelo AL-CU, el mayor consumo de energía fósil se relaciona con el uso de petróleo para la fabricación del flujo de referencia aceite lubricante. Mientras que en el modelo VE-PT, el mayor consumo energético se refiere a la combustión que se realiza del Fuel oil. Por su parte el modelo RR-PP presenta consumo energético derivado de la recolección y proceso tecnológico de re-refinación. En conjunto, los modelos RR-

PP y VE-PT presentan valores negativos “similares” para la demanda de energía fósil, lo cual hace referencia a los consumos energéticos evitados que son derivados del reciclaje del ALU en la etapa de sustitución. Por su parte, la demanda acumulada de energía hídrica está relacionada en los tres modelos con el consumo de energía eléctrica para los procesos tecnológicos que generan los productos. En este caso el modelo RR-PP es el mayor consumidor, seguido por el modelo AL-CU y finalmente VE-PT, el cual alcanza un consumo evitado en el flujo de referencia Fuel oil derivado de la sustitución y bajos consumos de energía eléctrica en el proceso tecnológico de mezcla de combustible. Finalmente, la demanda acumulada de energía geotérmica es la menos relevante de las categorías evaluadas, sin embargo, en este análisis se presenta en el modelo AL-CU y está relacionada con uso de esta energía en el proceso de extracción del petróleo crudo, y también aparece en el modelo VE-PT asociada exclusivamente al proceso de combustión.

Si bien la vía de valorización energética presenta un mejor desempeño en el indicador demanda energética acumulada respecto al modelo de re-refinación, este resultado solo indica la energía total requerida para obtener el combustible fuel oil derivado del ALU, sin embargo, no puede entenderse como el potencial energético que este sustituye con respecto a otros combustibles industriales que cumplen la misma función. El análisis de esta función específica para la ruta de valorización energética es una actividad que debe realizarse en el marco de otros estudios, ya que esta por fuera del alcance de este análisis de ciclo de vida.

c. Resultados de la sustitución de productos

Para este análisis, el resultado de sustitución se realizó a partir de 1 k de ALU potencialmente recuperable, que genera subproductos derivados del proceso de re-refinación (0,75 K de Base lubricante, 0,12 K de base asfáltica y 0,10 de base liviana) y derivado del proceso de valorización energética (0.96 K de Fuel oil) equivalente a 9.120 Kcal de energía, que pueden sustituir materias primas frescas y los impactos derivados, para la fabricación de los mismos subproductos

provenientes del sector primario en una relación 1:1. De esta manera, los créditos del reciclaje para los flujos de referencia de salida analizados para ambos modelos (RR-PP y VE-PT), se constituye en el potencial de sustitución de cada subproducto, que para este caso fueron determinados con respecto a subproductos disponibles en la base de datos de Ecoinvent 3.0. En tal sentido, al momento de la sustitución de un producto real, el análisis debe ser ampliado para comparar la sustitución de los subproductos del reciclaje mencionados con los productos sustituidos directamente

d. Resultados de la evaluación ambiental del modelo AL-CU

La evaluación ambiental con valores normalizados realizada al modelo AL-CU en los flujos de referencia aceite lubricante (Lubricating oil) y Metales (Metal working) arroja como resultado consolidado una mayor incidencia en las categorías de impactos ambiental Agotamiento de petróleo, siendo esta la más sobresaliente, seguida de la categoría formación de oxidantes fotoquímicos, toxicidad humana y acidificación terrestre. Particularmente la categoría cambio climático representa el menor impacto en esta etapa del ciclo de vida. Por su parte los impactos ambientales asociados al flujo de referencia Metal Working están asociados principalmente a los procesos metalúrgicos necesarios para la producción de canecas para el transporte del aceite lubricante y procesos industriales, y los valores de sustitución están relacionados con el reciclaje de canecas que se reincorporan a los procesos metalúrgicos una vez pierden su vida útil. Este modelo tiene mucha incidencia en las categorías de impacto local.

e. Resultados de la evaluación ambiental del modelo RR-PP

La función principal de la re-refinación es reutilizar los aceites lubricantes usados como fuente de bases lubricantes vírgenes, en sustitución de las obtenidas de primera refinación de crudo para la formulación de aceites lubricantes nuevos. Este es un ciclo circular que puede ser repetido n veces sobre la misma base lubricante para recuperar al menos el 75% de este como base lubricante re-refinada. Debido

a que la destinación de la base lubricante es para fabricar nuevo lubricante formulado principalmente y reemplazar la base virgen, se generan menos que en la refinería de crudo. Cuando se trata de la base asfáltica, este se usa al 100% como asfalto virgen, por lo tanto, su impacto es mayor porque es un residuo pesado. En el caso de base liviana, el hecho de que la gasolina sin plomo sea tan costosa de fabricar debido a los procesos de isomerización, hidrogenación, etc, es energéticamente muy generador de impactos. Es así, que la alternativa de la re-refinación es un sistema eslabón entre la biosfera –recursos naturales renovables y no renovables- y la tecnosfera –proceso tecnológico para el tratamiento de ALU-. Así mismo, es un sistema de regeneración que otorga una segunda vida a los compuestos de aceites lubricantes que ya culminaron su primer ciclo de vida. La producción de estos subproductos, genera la sustitución de la producción primaria de materias primas del sector de los hidrocarburos, este particular, convierte el sistema de producto de la Re-refinación en un ciclo de reciclaje abierto multifuncional, que recupera materias primas de un sistema de producto y las incorpora a otros sistemas de producto en forma de subproductos.

Entre tanto, la recuperación de aceites lubricantes por la vía de re-refinación conduce a la conservación de los recursos renovables y no renovables significativamente, y genera un alivio de cargas ambientales cuando se compara con la producción de bases lubricantes vírgenes en gran escala en las refinerías de petróleo crudo, ya que el aprovechamiento por re-refinación no requiere inversiones en exploración de petróleo, y las acciones de explotación sería equivalentes al costo de la recolección de los ALU desde el sitio de generación hasta la planta de re-refinación. Los resultados generales demuestran que el tratamiento de aceites lubricantes usados por la ruta de re-refinación hace que la carga ambiental sea menor que cuando se disponen mediante los procesos de utilización como combustible. Mediante el proceso de re-refinación, se rompe también con el paradigma de que el aceite lubricante usado es un residuo, ya que este deja de ser solamente un residuo peligroso para convertirse en una materia prima sustituta para productos derivados de petróleo. Aún más, el aceite base re-refinado constituye un

hidrocarburo cuya única diferencia con el petróleo crudo reside en que, como resultado de su destilación, surgen menos productos derivados. En este tratamiento el aceite mineral usado se somete a un proceso muy similar al que se somete el petróleo crudo, la diferencia se encuentra en la etapa de desparafinación ya que el aceite usado ya no contiene las parafinas del crudo gracias al proceso que ya sufrió en la refinería. (Gómez, García, Hernández, & Ramírez, 2007).

El proceso de Re-refinación de capa fina se diferencia de otras tecnologías de re-refinación principalmente en dos aspectos principales: a) por ser destilación a alto vacío se puede obtener un producto refinado como base lubricante de mejor calidad porque la destilación se puede hacer a menor temperatura que cuando se hace a presión atmosférica, y por tanto se protege más la molécula de hidrocarburo evitando que sufra un cracking excesivo y b) permite un mayor aprovechamiento del aceite usado ya que el corte de destilación es mayor en la fracción de base lubricante que es la fracción objetivo del aprovechamiento del aceite usado.

A partir de los resultados de la evaluación ambiental para el modelo RR-PP en cuanto a impactos ambientales generados, se evidencia que el agotamiento del petróleo y el agotamiento de metales son las categorías con mayor impacto, y al mismo tiempo, son las categorías con mayor sustitución y las que mayores créditos de reciclaje aportan. Si bien también se generan impactos ambientales en las demás categorías de cambio climático, toxicidad humana, formación de oxidantes fotoquímicos y acidificación terrestre, el proceso de sustitución “compensa” estos impactos hasta obtener un perfil ambiental neto para este modelo que oscila entre créditos del reciclaje por sustitución para las categorías cambio climático, agotamiento del petróleo y toxicidad humana, en otras categorías casi se logra la neutralidad de los impactos generados. Excepto en la categoría agotamiento de metales que corresponde a los empaques en los cuales se transporta el ALU que es recibido para procesar mediante esta tecnología. Sin embargo, como ya se ha mencionado, es importante destacar que la re-refinación no presenta riesgos ambientales debido a acidificación de suelos, o a formación de oxidantes

fotoquímicos, con relación a los otros dos modelos evaluados; lo que de manera directa contribuye a proteger el suelo y las potencialidades que dicho efecto tiene sobre fuentes hídricas, ciclos de eutroficación, capacidad de regeneración de suelos, etc.

f. Resultados de la evaluación ambiental del modelo VE-PT

La función específica de la combustión de los aceites usados es utilizarlos como fuente de energía en hornos y calderas como sustituto de combustibles pesados de primera refinación de crudo. La relación de producción de Fuel Oil está representada en 0.96 K de Fuel oil a partir de 1 k de aceite usado que ingresa al proceso de recuperación de ALU, con un potencial de energía utilizable de 9500 kcal/k. Este Fuel oil es utilizado como combustible sustituto en procesos de combustión industrial, principalmente en hornos de producción de Asfalto. Aunque es una fuente de energía potencial, como se demostró anteriormente, esta combustión presenta desventajas ambientales en términos de factores de emisión y de impactos ambientales negativos derivados de los procesos de combustión industriales. La valoración energética es una vía de uso que permite la recuperación del ALU y evita que sea dispuesto sin ningún tipo de uso pudiendo terminar en fuentes hídricas o en suelo, con potencial daño ambiental severo como ya se ha descrito. Sin embargo, debe aclararse que esta es una vía aceptada como alternativa cuando la capacidad de re-refinación es nula o escasa como ocurre en Colombia, pero que no es una vía de uso ambientalmente segura como se concluirá más adelante en los análisis de efectos ambientales.

El fuel oil que se sustituye se obtiene como residuo luego de la destilación topping, de aquí se obtiene entre un 30% y un 50% de esta sustancia, siendo el combustible más pesado de los que se puede destilar a presión atmosférica del crudo. Dentro del proceso de destilación, se obtiene el Fuel Oil, como subproducto de alta demanda, lo que incrementa su valor. La producción de este subproducto, que se obtiene de las principales destilerías del país, es de 4.000.000 toneladas anuales.

Siendo las principales destilerías las que generan la mayor producción. En el caso particular del ALU, usado como fuente de energía, el análisis no profundizó en la sustitución energética que este subproducto realiza con respecto a otras fuentes de energía que potencialmente puede sustituir como gas natural, querosene u otro tipo de combustible industrial. Sin embargo, deben también considerarse los efectos derivados de las combustiones inadecuadas o de tratamientos inadecuados de los gases de combustión cuando se acude a la valorización energética como vía de recuperación de los aceites usados. Por su parte, la sustitución del Fuel oil derivada del ALU, para usar como combustible, aporta al cumplimiento de la meta de recuperar el 69% de los ALU al 2022 como fuente de valorización energética.

La categoría cambio climático, particularmente en el flujo de referencia aceite lubricante usado (Lubricating oil used) representa el mayor aporte a esta categoría de impacto, si se considera que el resultado neto del impacto entre los valores negativos y positivos, generan un resultado cercano a cero, este impacto se acerca a la neutralidad, como consecuencia de los impactos evitados. El impacto neto de un débito de 90% en cambio climático para el modelo de valorización energética, comparado con el impacto neto de un crédito de 81% para re-refinación. Esto es una clara evidencia de que la valorización energética no debe ser la vía de uso de los ALUs ya que va en contraposición a los compromisos de Colombia en términos de metas ambientales. Así mismo la valorización energética, al contrario de la re-refinación, si presenta riesgos ambientales en las categorías de acidificación de suelos, y de formación de oxidantes fotoquímicos, lo que de manera directa contribuye a deteriorar el suelo con las potencialidades consecuencias negativas que dicho efecto tiene sobre fuentes hídricas y calidad de los suelos, en especial en Colombia donde los suelos son en promedio más ácidos que alcalinos, aumentando las exigencias de neutralizadores de PH y con ellos aumentando costo de tratamiento de la tierra y aumentando costo de producción de alimentos.

8. CONCLUSIONES

La adecuada disposición de los aceites lubricantes usados mediante la incorporación de las tecnologías de re-refinación y de valorización energética, representan en conjunto un beneficio en la reducción de impactos ambientales y en el consumo de materias primas derivadas del petróleo como consecuencia de la actividad de reciclaje. Por su parte, la alternativa de re-refinación demostró mayores beneficios ambientales en la etapa de sustitución de tres tipos de productos provenientes de primera refinación, que redundan en evitar la generación de impactos ambientales en la fabricación de estos subproductos y en aumentar la disponibilidad futura de crudo de petróleo como consecuencia de mayores tasas de reciclaje presentes. Estos beneficios pueden resumirse en indicadores de: extracciones evitadas de recursos naturales no renovables como el petróleo y los metales, contaminación evitada de sustancias que afectan la salud y degradan los ecosistemas más cercanos a los sitios de operación, impactos ambientales evitados que afectan la calidad atmosférica y generan cambio climático, consumos energéticos evitados provenientes de los fósiles e hidroenergía y finalmente de manera agregada, impactos evitados sobre la salud de las poblaciones directamente expuestas a los impactos ambientales analizados. Si bien la alternativa de valorización energética ofrece sustitución en forma de combustible como subproducto, el proceso de combustión final inclina la balanza de impactos evitados hacia impactos generados, lo cual no permite la generación neta de créditos del reciclaje para esta alternativa de tratamiento. Sin embargo, es necesario recordar, que la comparación entre estas vías de reciclaje se hizo en términos de masa y no en términos de sustitución energética donde la vía de valorización energética ofrece los mayores beneficios, en ese sentido, son los usuarios finales de los subproductos de ambas tecnologías quienes eligen la mejor alternativa en términos prácticos, sin embargo a manera de conclusión, la vía de re-refinación

ofrece mayores beneficios ambientales en términos de menores impactos potenciales generados y mayores impactos evitados que aportan a la sostenibilidad ambiental de un recurso no renovable como el petróleo.

De manera complementaria, la valorización energética tiene su valor como fuente de energía para los procesos industriales, y en ese sentido, se asume que una buena combustión, no depende únicamente del ALU (y sus mezclas) sino del sistema de combustión que usa, por lo que es indispensable que esta vía incorpore controles tecnológicos y garantice estándares ambientales seguros que cumplan con todos los criterios sugeridos por la ley en relación a las condiciones de horno, a las relaciones de mezcla y a los sistemas de tratamiento de efluentes, lo cual debe ser cumplido por los usuarios finales de los combustibles. Si bien la vía de valorización energética es un camino aprobado en varias legislaciones, incluida la colombiana, y es una vía que representa beneficios principalmente en términos de sustitución de combustibles, de este estudio se concluye que la tecnología de re-refinación representa la vía de uso de los aceites usados más segura en términos ambientales y más efectiva en términos de demanda acumulada de energía. Por lo tanto, debería ser la solución tecnológica principal a aplicar y promover en Colombia.

Tal como se ha mencionado anteriormente, el ahorro energético y los impactos ambientales del ciclo de vida completo del aceite usado procesado en la fase del fin de la vida por la tecnología de re-refinación para recuperación de bases lubricantes permite la optimización de la energía primaria y de los recursos no renovables utilizados. Mientras que utilizar el aceite usado como combustible alternativo sustituyendo combustibles pesados como fuel oil acumula impactos a lo largo del ciclo de vida. Esto comprueba lo indicado por la EPA, la energía consumida por la vía de re-refinación es entre un 50% a un 85% menos que la consumida en el refinado de petróleo crudo para obtener base lubricante virgen de primera refinación. Adicionalmente, se podrían percibir beneficios de la producción evitada de crudos y ahorros económicos asociados a esta actividad para Colombia ya que en el país los costos de levantamiento y administración para la producción de crudo

son similares al promedio mundial, según algunos estudios de la ACP de 2015 y 2016. Sin embargo, al sumarle los costos de transporte, Colombia se ubica entre el 25% de la producción más costosa del mundo (Econ & Abril, 2020) y en este sentido, la re-refinación ofrece beneficios asociados a la eficiencia en el uso doméstico de los derivados de hidrocarburos como el aceite lubricante mediante las tasas de reciclaje, y constituye una solución a dos problemas que son el ambiental de los aceites usados y al mejoramiento del sector empresarial con etiquetas de sostenibilidad, por el usos de los subproductos de la re-refinación como un insumo incluso a menor precio.

Dado que la etapa de recolección de ALU y entrega de producto son las más aportantes en todas las categorías de impacto ambiental tanto para el modelo RR-PP, como para el modelo VE-PT (sin combustión), las decisiones tendientes a hacer un aprovechamiento de los ALUs en Colombia, deberían seguir la tendencia que se tiene en los países europeos, esto es, que las plantas de proceso para ambas tecnologías sean pequeñas y estén diseminadas en varios puntos en todo el país alrededor de los grandes centros de generación y consumo para así evitar traslados por largas distancias tanto en la recolección del ALU como en la distribución de los productos generados.

A partir del contexto normativo presentado en esta tesis, se evidencia que existe una contradicción legal y conceptual entre la resolución 1446 de 2005 que en su artículo 2 establece los requisitos y condiciones para aprovechar como combustible el aceite de desecho o usado generado en el país y el Decreto 4741 de 2005 que en sentido contrario en su extenso articulado, clasifica los aceites usados como un residuo peligroso, razón por la cual es pertinente y conveniente la existencia de normatividad actualizada que dirima la contradicción, teniendo en cuenta las políticas ambientales vigentes en relación a cambio climático, calidad del aire y salud pública. Asimismo, se requiere que el marco normativo regule las medidas tendientes a reducir los impactos adversos de la generación y el manejo inadecuado del aceite residual, y estructure un sistema de tratamiento integral que incluya la

gestión ambiental y planes posconsumo, con el fin de que esta actividad se realice de manera selectiva y de acuerdo con los requerimientos legales, y que involucre en el proceso a los generadores o productores de los aceites lubricantes usados.

En términos generales, este estudio puede proveer información hasta ahora no cuantificada con relación a los beneficios ambientales del uso adecuado de los aceites lubricantes usados, que pueden aportar en especial a los trabajos adelantados por el Fondo de Aceites Usados, la Comisión Quinta de la Cámara de Representantes y algunas empresas privadas, que tienen la necesidad de crear un marco de referencia objetivo frente al uso adecuado de este residuo en el marco de los compromisos adquiridos por Colombia para la reducción de emisiones de GEI, tasas de reciclaje y compromisos internos generados a través del CONPES.

Adicionalmente, la aplicación de la metodología de análisis de ciclo de vida permitió evaluar, bajo la misma premisa de funcionalidad dos alternativas de reciclaje de aceites lubricantes usados, aplicando un análisis comparativo de tipo descriptivo para determinar los beneficios ambientales. Dado que este análisis implicó diferentes variables como contexto comparativo de sistemas multiproducto y de sistemas de reciclaje abiertos, análisis de varios flujos de referencia y enfoque de análisis ambiental por sustitución, el marco metodológico se logró mediante la integración de un conjunto de herramientas tales como en el método “ReCiPe 2008 V1.13 de punto medio, jerárquico y de corto plazo. Este método de evaluación ambiental fue el que mejor se ajustó a las tipologías de impactos ambientales de los modelos evaluados, y por lo tanto, permitió resultados que se hallan más cercanos a al desempeño ambiental de las tecnologías referenciadas. Así mismo, el modelo metodológico usó como apoyo la base de datos Ecoinvent 3.0 y el software Umberto para modelar los procesos. A partir de lo anterior, esta metodología puede ser replicada a otros sistemas de reciclaje en estudios similares de este tipo.

A partir de la metodología anterior, este trabajo puede ser continuado y mejorado con mayor cantidad de datos que incorporen más compañías en Colombia y que

permita la modelación completa de toda la cadena del tratamiento de ALUs, y profundizar en el estudio de sustitución en todos los flujos de referencia, vía comparación con los productos sustituidos, ya que lo que se obtiene en este estudio es un potencial de sustitución de cada flujo de referencia que debe ser ajustado con información primaria de los productos que se sustituyen.

9. BIBLIOGRAFIA

- Advanced Monitoring Technologies. (2017). FACTORES QUE INFLUYEN EN LA DEGRADACIÓN DE LUBRICANTES SINTÉTICOS Y MINERALES.
- Ángel Garay, Graciela López, Viviana Vila, H. V. (2010). Combustión En Hornos Distintos Tipos De Combustible. [Http://Es.Scribd.Com/Doc/36365133/Combustion-Hornos](http://Es.Scribd.Com/Doc/36365133/Combustion-Hornos), 1–24.
- Asociación Colombiana del Petróleo. (2019). informe 2019 Fondo de aceites usados, 14.
- Ayala, J. L., Pancho, F. A., Jimenez, F. V., & Zambrano, T. (2018). Valoración energética del aceite lubricante usado en sistemas térmicos de combustión de la industria cementera ecuatoriana. *Novasinerгия Revista Digital De Ciencia, Ingeniería Y Tecnología*, 1(2), 60–70. <https://doi.org/10.37135/unach.ns.001.02.07>
- Ayala, J. L., Pancho, F. A., Jimenez, F. V., Valverde, T. Z., & Mosquera, J. G. (2018). Valoración energética del aceite lubricante usado en sistemas térmicos de combustión de la industria cementera ecuatoriana. *NOVASINERGIA*, 60-69.
- Bogotá, S. D. (2008). *Catalogo en Linea - IDEAM*. Obtenido de http://documentacion.ideam.gov.co/cgi-bin/koha/opac-detail.pl?biblionumber=7976&shelfbrowse_itemnumber=8385
- Carreño, P. (2016). *Regeneration of Used Lubricant Oils*. Peru: National University of Engineering.
- Convenio 063 de 2005. (2006). *Manual Técnico para el Manejo de Aceites Lubricantes Usados*. Bogota, Colombia: MINISTERIO DE AMBIENTE, VIVIENDA Y DESARROLLO TERRITORIAL.
- Daniels, D. G. (1995). *Technical Report: Assessment of Opportunities to Increase the Recovery and Recycling of Waste Oil*. Department of Energy Argonne National Laboratory.
- Delgado, E., & Parra, J. (2007). *Combustibles Alternativos a partir de Aceites Usados con Tratamiento de Limpieza*. Chile: Investigaciones de Ingeniería.
- Departamento Nacional de Planeacion . (2016). *Crecimiento verde para Colombia*. Bogota: GGGI.

- Dominguez, F. A., Ayala, J. L., RomeroCardenas, E., & Maria Ortiz Zurita, P. F. (2017). Aprovechamiento energético de aceites usados y su contribución a la economica circular mediante el coprocesamiento en hornos cementeros . *Revista Ciencia UNEMI*, 51-64.
- Dresel, T. M. (2007). *Lubricants and Lubrication*. Alemania: WILEY-VCH.
- Echeverry, H. (2012). Re-refinación de Aceites Usados en Colombia: Primer Paso hacia la Sostenibilidad de un Recurso No Renovable. *Revista Ambiental Éolo*.
- Gil, M. J. (2004). *Re-Refinacion de aceites lubricantes usados de motor e hidraulico por el metodo de extraccion con solventes*. Bogota, Colombia .
- Gobierno de Colombia; Ministerio de Minas y Energia . (2018). *Plan Integral de Gestion del Cambio Climatico / Sector Minero Energetico*. Bogota: MINMINAS.
- Gomez, C. M., Garcia, G. C., Hernandez, A., & Ramirez, P. (2007). *La industria de la re-refinación de aceite mineral usado en Argentina. Oportunidad de negocios con beneficio ambiental* . Buenos Aires, Argentina : Universidad del CEMA.
- Grau, A., & Farré, O. (2011). *Situacion y potencial de valoracion energetica directa de residuos* . Madrid, España : Instituto para la Diversificacion y Ahorro de Energia .
- GreenPeace. (2012). Impactos ambientales del petroleo. Mexico.
- Hamilton, S. S. (2015). Optimal Recycling Policy for Used Lubricating Oil: The Case of California's Used Oil Management Policy.
- Höök, M., & Xu, T. (2013). Depletion of fossil fuels and anthropogenic climate change – a review. *Energy Policy*, 797–809.
- Jacinto Soto, H. (2006). *Potencial contaminación por cromo en el proceso de refinación del petróleo*. Lima, Peru: Facultad de Quimica e Ingeniera Quimica, Universidad Ayor de San Marcos.
- James H, G., Glenn E, H., & Mark J, K. (2004). *Petroleum Refining: Technology and Economics*. New York: Taylor & Francis Group .
- Klinglmair, M., Sala, S., & Brandão, M. (2013). Evaluación del agotamiento de recursos en LCA: una revisión de métodosy cuestiones metodológicas. *Springer-Verlag Berlin Heidelberg*.
- Madrid, F. d. (2012). *Guía de valoración energética de residuos*. Madrid, España: Energy Management Agency.
- Majano, G. M. (2010). Mineral oil regeneration using selective molecular sieves as sorbents. *Chemosfera* 78. *El sevier*.

- MINAMBIENTE; GOBIERNO NACIONAL . (2019). *Agenda 30: Transformando Colombia* . Bogota: MinAmbiente.
- Minergia. (2020). Presentacion "Plan Integral de Gestion del Cambio Climatico/Sector Minero Energetico". Bogota, Colombia .
- Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible; Ministerio de Comercio, Industria y Turismo. (2019). *Estrategia Nacional de Economia Circular* . Bogota: Gobierno de Colombia .
- Moya, L. B. (2009). Desde El Aceite Lubricante Usado Hasta Su Puesta En El Mercado Tras Su Regeneración. .
- NORIA.MX. (s.f.). (<http://noria.mx/lublearn/comprendiendo-las-diferencias-entre-los-grupos-de-aceites-base/>). Obtenido de [comprendiendo-las-diferencias-entre-los-grupos-de-aceites-base/](http://noria.mx/lublearn/comprendiendo-las-diferencias-entre-los-grupos-de-aceites-base/).
- Norris, J., Stewart, R., & Passant, N. (2006). Review of the fate of lubricating oils in the UK.
- Orozco, J. M. (2013). *Metodologia de Gestion Ambiental para Aceite Dielectrico de Transformador: "Analisis del Ciclo de Vida (ACV)"*. Medellin, Colombia : Universidad Nacional de Colombia.
- Orozco, J. M. (2013). *Metodologia de Gestion Ambiental para Aceite Dielectrico de Transformador: Analisis del ciclo de Vida*. Medellin, Colombia: Universidad Nacional de Colombia.
- Planeacion, D. N., & EnerSinc. (2018). *Green Growth Policy Proposals*. Departamento Nacional de Planeacion.
- SAVING THE AMAZON. (2020). *SAVING THE AMAZON*. Obtenido de 3 metas para el crecimiento verde en Colombia : <https://www.savingtheamazon.org/en/3-metas-crecimiento-verde-colombia/>
- SOCIAL, C. N., COLOMBIA, R. D., & PLANEACIÓN, D. N. (2018). *POLÍTICA DE CRECIMIENTO VERDE 3934 - ANEXOS*. Bogota: CONSEJO NACIONAL DE POLÍTICA ECONÓMICA Y SOCIAL.
- Sostenible, M. d. (Septiembre de 2020). *Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible*. Obtenido de Planes Sectoriales de Mitigación: <https://www.minambiente.gov.co/index.php/estrategia-colombiana-de-desarrollo-bajo-en-carbono/planes-sectoriales>
- TECNALIA. (2018). *Estudio en la intensidad de utilización de materiales y economía circular en Colombia*. Tecnalía.

- Tejedor, A. S. (1999). *Química Orgánica Industrial*. Obtenido de <https://www.eii.uva.es>
- The Global Green Growth Institute and Green Climate Fund Partnership. (2020). *GGGI*. Obtenido de Lanzamiento de la Segunda Fase del Crecimiento Verde Colombia - GGGI 2020-2030: <https://ggi.org/launch-of-the-second-phase-of-the-green-growth-colombia-gggi-2020-2023/>
- The international Council On Clean Transportation. (2011). *Introduccion a la refinacion del petroleo y produccion de gasolina y diesel con contenido ultra bajo de azufre* . Bethesda, Maryland: MathPro.
- Tuset, S. (Septiembre de 2020). *Condorchem Envitech*. Obtenido de VALORIZACIÓN ENERGÉTICA DE RESIDUOS: <https://blog.condorchem.com/valorizacion-energetica-de-residuos/>
- Uribatan, P. (2002). Revisión y analisis de las Experiencias de Argentic, Brasil, Colombia y Mexico respecto a los cinco elementos claves para el manejo ambiental de lubricantes usados, . *Empresa Repamar para GTZ*.

10. ANEXOS

Anexo 1. Análisis de inventario entradas y salidas AL-CU.

Tabla 45. Datos de entrada para el modelo AL.CU. Datos extraídos del inventario del modelo en Software Umberto.

Entradas Material	Valor	Unidad
Calcite, in ground [natural resource/in ground]	0,03	k
Carbon dioxide, in air [natural resource/in air]	0,03	k
Clay, unspecified, in ground [natural resource/in ground]	0,02	k
Coal, brown, in ground [natural resource/in ground]	0,06	k
Coal, hard, unspecified, in ground [natural resource/in ground]	0,24	k
Coal, hard, unspecified, in ground [natural resource/in ground]	-0,02	k
Energy, geothermal, converted [natural resource/in ground]	0,02	MJ
Energy, gross calorific value, in biomass [natural resource/biotic]	0,33	MJ
Energy, gross calorific value, in biomass [natural resource/biotic]	-0,02	MJ
Energy, kinetic (in wind), converted [natural resource/in air]	0,11	MJ
Energy, kinetic (in wind), converted [natural resource/in air]	-0,01	MJ
Energy, potential (in hydropower reservoir), converted [natural resource/in water]	0,56	MJ
Energy, potential (in hydropower reservoir), converted [natural resource/in water]	0,01	MJ
Energy, potential (in hydropower reservoir), converted [natural resource/in water]	-0,05	MJ
Gangue, bauxite, in ground [natural resource/in ground]	0,01	k
Gangue, in ground [natural resource/in ground]	0,04	k
Gas, natural, in ground [natural resource/in ground]	0,20	m3
Gas, natural, in ground [natural resource/in ground]	-0,01	m3
Gravel, in ground [natural resource/in ground]	0,10	k
Gravel, in ground [natural resource/in ground]	-0,01	k
Gravel, in ground [natural resource/in ground]	0,01	k
Iron, in ground [natural resource/in ground]	0,01	k
Iron, in ground [natural resource/in ground]	-0,01	k
metal working, average for steel product manufacturing	0,11	k
Nitrogen [natural resource/in air]	0,01	k
Occupation, forest, intensive [natural resource/land]	0,05	m ² *year
Oil, crude, in ground [natural resource/in ground]	1,12	k

Oxygen [natural resource/in air]	0,01	k
Sand, unspecified, in ground [natural resource/in ground]	0,02	k
Shale, in ground [natural resource/in ground]	0,16	k
Shale, in ground [natural resource/in ground]	-0,01	k
Sodium chloride, in ground [natural resource/in ground]	0,01	k
Volume occupied, reservoir [natural resource/in water]	0,03	m ³ *year
Water, cooling, unspecified natural origin [natural resource/in water]	0,07	m ³
Water, turbine use, unspecified natural origin [natural resource/in water]	4,34	m ³
Water, turbine use, unspecified natural origin [natural resource/in water]	0,07	m ³
Water, turbine use, unspecified natural origin [natural resource/in water]	-0,38	m ³
Water, turbine use, unspecified natural origin [natural resource/in water]	0,01	m ³

Tabla 46. Datos de entrada para el modelo AL.CU. Datos extraídos del inventario del modelo en Software Umberto.

Salidas Material	Valor	Unidad
Aluminium [water/ground-, long-term]	0,01	k
BOD5, Biological Oxygen Demand [water/surface water]	0,01	k
Calcium, ion [water/ground-, long-term]	0,01	k
Carbon dioxide, fossil [air/non-urban air or from high stacks]	0,67	k
Carbon dioxide, fossil [air/non-urban air or from high stacks]	0,01	k
Carbon dioxide, fossil [air/non-urban air or from high stacks]	-0,04	k
Carbon dioxide, fossil [air/unspecified]	0,22	k
Carbon dioxide, fossil [air/unspecified]	-0,01	k
Carbon dioxide, fossil [air/unspecified]	0,01	k
Carbon dioxide, fossil [air/urban air close to ground]	0,31	k
Carbon dioxide, fossil [air/urban air close to ground]	-0,02	k
Carbon dioxide, non-fossil [air/urban air close to ground]	0,02	k
Carbon-14 [air/non-urban air or from high stacks]	0,02	kBq
Chloride [water/surface water]	0,02	k
COD, Chemical Oxygen Demand [water/surface water]	0,01	k
Heat, waste [air/unspecified]	0,44	MJ
Heat, waste [air/urban air close to ground]	0,03	MJ
Heat, waste [air/urban air close to ground]	-0,01	MJ
Heat, waste [soil/industrial]	-0,01	MJ
Heat, waste [water/ground-, long-term]	0,04	MJ
Heat, waste [water/ground-, long-term]	-0,05	MJ

Heat, waste [water/surface water]	0,01	MJ
Heat, waste [water/unspecified]	0,09	MJ
Hydrogen-3, Tritium [air/non-urban air or from high stacks]	0,04	kBq
Hydrogen-3, Tritium [water/ocean]	0,40	kBq
Hydrogen-3, Tritium [water/ocean]	0,01	kBq
Hydrogen-3, Tritium [water/ocean]	-0,03	kBq
Hydrogen-3, Tritium [water/surface water]	0,83	kBq
Hydrogen-3, Tritium [water/surface water]	0,02	kBq
Hydrogen-3, Tritium [water/surface water]	-0,07	kBq
lubricating oil	1,00	k
metal working, average for steel product manufacturing	-0,04	k
NM VOC, non-methane volatile organic compounds, unspecified origin [air/urban air close to ground]	0,02	k
Noble gases, radioactive, unspecified [air/non-urban air or from high stacks]	9,98	kBq
Noble gases, radioactive, unspecified [air/non-urban air or from high stacks]	0,15	kBq
Noble gases, radioactive, unspecified [air/non-urban air or from high stacks]	-0,71	kBq
Noble gases, radioactive, unspecified [air/non-urban air or from high stacks]	0,03	kBq
Radium-226 [water/surface water]	0,01	kBq
Radon-222 [air/low population density, long-term]	36,69	kBq
Radon-222 [air/low population density, long-term]	0,50	kBq
Radon-222 [air/low population density, long-term]	-2,36	kBq
Radon-222 [air/low population density, long-term]	0,11	kBq
Radon-222 [air/non-urban air or from high stacks]	1,04	kBq
Radon-222 [air/non-urban air or from high stacks]	0,01	kBq
Radon-222 [air/non-urban air or from high stacks]	-0,07	kBq
Silicon [water/ground-, long-term]	0,01	k
Sodium, ion [water/surface water]	0,01	k
Sulfate [water/ground-, long-term]	0,02	k
Thorium-228 [water/surface water]	0,01	kBq
Water [air/unspecified]	0,01	m3
Water [water/unspecified]	4,40	m3
Water [water/unspecified]	0,07	m3
Water [water/unspecified]	-0,39	m3
Water [water/unspecified]	0,01	m3
Xenon-133 [air/non-urban air or from high stacks]	0,04	kBq
Xenon-135 [air/non-urban air or from high stacks]	0,01	kBq

Anexo 2.3. Modelo VE-PT Créditos

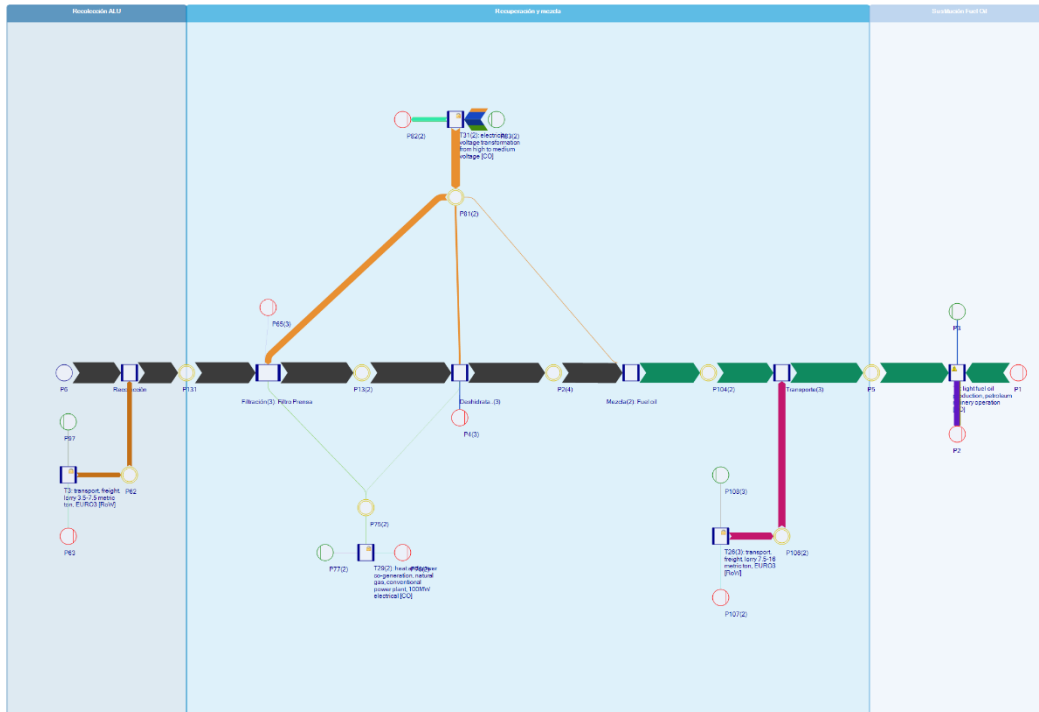


Figura 23. Modelo Sankey para el fin de la vida del aceite lubricante usado por valorización energética, contabilizando sustitución.

Anexo 2.4. Modelo RR-PP

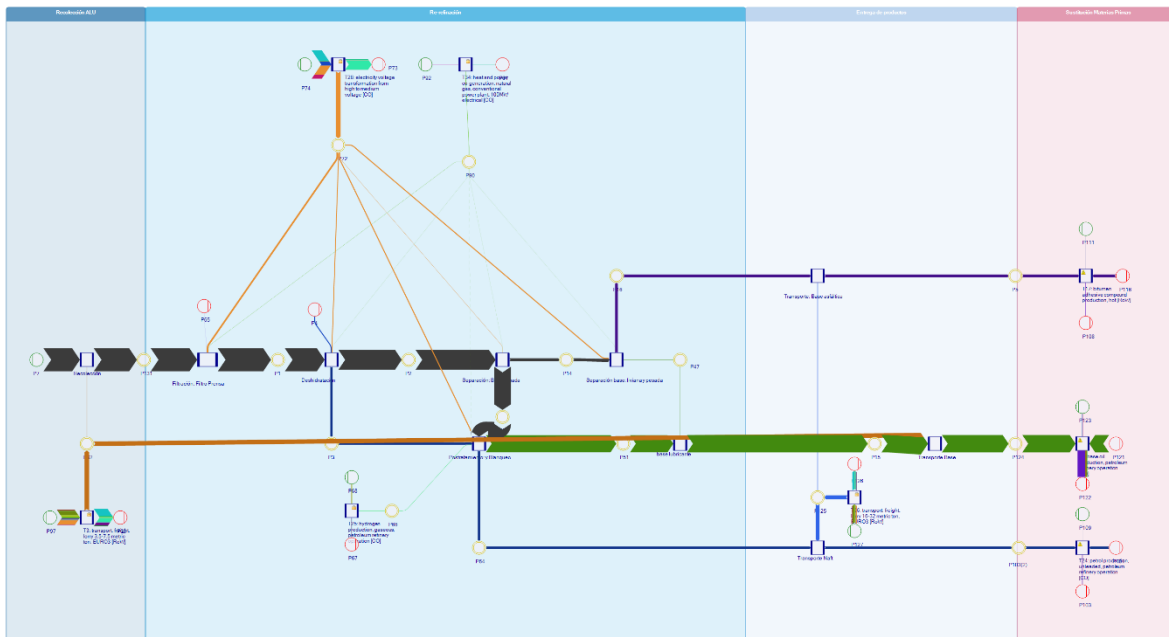


Figura 24. Modelo Sankey para el fin de la vida del aceite lubricante usado por re-refinación.