

EVALUACIÓN INTEGRAL DE LA GESTIÓN SOSTENIBLE DE RESIDUOS  
GENERADOS POR ACEITES LUBRICANTES USADOS DE ORIGEN  
AUTOMOTRIZ.

JORGE ANDRÉS CRISTANCHO GÓMEZ

UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER  
FACULTAD DE INGENIERÍAS FÍSICO QUÍMICAS  
ESCUELA DE INGENIERÍA DE PETRÓLEOS  
MAESTRIA EN INGENIERÍA DE PETRÓLEOS Y GAS  
BUCARAMANGA

2022

EVALUACIÓN INTEGRAL DE LA GESTIÓN SOSTENIBLE DE RESIDUOS  
GENERADOS POR ACEITES LUBRICANTES USADOS DE ORIGEN  
AUTOMOTRIZ.

JORGE ANDRÉS CRISTANCHO GÓMEZ

Trabajo de grado para optar por el título de  
Magister en Ingeniería de Petróleos y Gas

Director

ADAN YOVANI LEÓN BERMÚDEZ

Ing. Químico, PhD.

UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER  
FACULTAD DE INGENIERÍAS FÍSICO QUÍMICAS  
ESCUELA DE INGENIERÍA DE PETRÓLEOS  
MAESTRIA EN INGENIERÍA DE PETRÓLEOS Y GAS  
BUCARAMANGA

2022

## DEDICATORIA

*“No faltó palabra de todas las buenas promesas que Jehová había hecho a la casa de Israel; **todo** se cumplió”*

**Josué 21, 45**

*A Dios por su infinita fidelidad y misericordia*

*A mis padres por su amor y apoyo incondicional*

*A mis hermanos quienes han ido ese motor y aliento de vida*

*Al Dr. Francisco Niño por su paciencia, acompañamiento y respaldo*

*A mis amigos y familiares que de una u otra manera estuvieron en el día a día  
dándome una mano en la consecución de esta meta*

## **AGRADECIMIENTOS**

Agradezco infinitamente a mi director y amigo el PhD. Adán León, por su guía, aliento y apoyo incondicional.

A Andrey Caballero y el Grupo de Investigaciones en Corrosión (GIC) de la Universidad industrial de Santander, por su don de servicio, amabilidad y apoyo en la gestión de equipos, reactivos y análisis a desarrollar.

A la Escuela de ingeniería de Petróleos y en especial al personal de apoyo del programa de Maestría en ingeniería de Petróleo y Gas, por su amabilidad y gestión en cada uno de los procesos administrativos.

## CONTENIDO

|  |    |
|--|----|
| <b>1. OBJETIVOS</b> .....  | 19 |
| 1.1 OBJETIVO GENERAL.....  | 19 |
| 1.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS.....   | 19 |
| <b>2 MARCO TEORICO</b> .....   | 20 |
| <b>2.1 GENERALIDADES DE LOS ACEITES LUBRICANTES</b> .....  | 20 |
| 2.1.1 Aditivos.....  | 22 |
| 2.1.2 Consumo de aceites lubricantes en Colombia.....  | 24 |
| 2.1.3 Bases lubricantes .....  | 24 |
| 2.1.4 Clasificaciones de aceites base .....  | 25 |
| 2.1.4.1 Grupo 1. Aceites base convencionales.....  | 25 |
| 2.1.4.2 Grupo 2. Aceites básicos convencionales modernos .....   | 26 |
| 2.1.4.3 Grupo 3. Aceites base no convencionales (Por sus siglas en ingles UCBOS) ....                      | 26 |
| 2.1.4.4 Grupo 5. Aceites base sintéticos especializados .....  | 27 |
| <b>2.2 ACEITES LUBRICANTES USADOS</b> .....  | 27 |
| 2.2.1 Degradación del aceite lubricante mineral.....   | 29 |
| 2.2.1.1 Temperatura de operación.....  | 31 |
| 2.2.1.2 Agua .....   | 32 |
| 2.2.1.3 Combustibles.....  | 32 |
| 2.2.1.4 Sólidos y polvo .....  | 32 |
| 2.2.2 Impactos al medio ambiente .....   | 33 |
| <b>2.3 REGENERACION DEL ACEITE USADO</b> .....   | 35 |
| 2.3.1 Proceso ácido-arcilla.....   | 37 |
| 2.3.2 Proceso de destilación .....   | 38 |
| 2.3.3 Proceso de Extracción con solventes .....  | 39 |
| 2.3.4 Tecnología de evaporación de película delgada (TFE por sus siglas en inglés)) +<br>hidroacabado..... | 41 |
| 2.3.5 TFE + acabado de arcilla .....   | 41 |
| 2.3.6 TFE + acabado solvente .....   | 44 |
| 2.3.7 Extracción con solventes con hidroacabado.....   | 45 |
| <b>2.4 METODOS DE DECISIÓN MULTICRITERIO</b> .....   | 47 |
| 2.4.1 Clasificación métodos de decisión multicriterio. ....  | 53 |
| <b>2.5 ANALISIS DEL CICLO DE VIDA</b> .....  | 55 |
| 2.5.1 Ciclo de vida de un producto.....  | 58 |
| 2.5.2 Metodología del Análisis del Ciclo de Vida .....   | 61 |
| <b>2.5.2.1</b> Definición de objetivos y alcances: .....   | 62 |
| <b>2.5.2.2</b> Inventario del Ciclo de Vida (ICV):.....  | 64 |
| <b>2.5.2.3</b> Evaluación de los Impactos del Ciclo de Vida (EICV): .....                                  | 68 |
| <b>2.5.2.4</b> Interpretación de resultados:.....  | 70 |
| <b>3 MARCO LEGAL</b> .....   | 71 |

|          |  |            |
|----------|--|------------|
| <b>4</b> | <b>METODOLOGIA EXPERIMENTAL .....</b>  | <b>72</b>  |
| 4.1      | Evaluación de las principales tecnologías de valorización de aceites lubricantes utilizadas a nivel mundial .....  | 73         |
| 4.2      | Normalización de los datos cuantitativos .....   | 79         |
| 4.3      | Proceso experimental para la regeneración de aceites lubricantes usados .....  | 83         |
| 4.4      | Evaluación financiera Proceso experimental para la regeneración de aceites lubricantes usados .....  | 101        |
| 4.5      | Evaluación financiera proceso de destilación al vacío.....   | 109        |
| 4.6      | Evaluación ambiental mediante la metodología del Análisis del Ciclo de Vida. ....  | 117        |
| <b>5</b> | <b>ANALISIS DE RESULTADOS .....</b>  | <b>132</b> |
| 5.1      | Selección tecnología de regeneración de aceites lubricantes usados mediante el análisis multicriterio .....  | 132        |
| 5.2      | Proceso experimental para la regeneración de aceites lubricantes usados .....  | 133        |
| 5.2.1    | Caracterización aceite lubricante usados .....   | 133        |
| 5.2.2    | Caracterización Base Lubricante Recuperada .....   | 133        |
| 5.2.3    | Resultados análisis de espectroscopía de <sup>1</sup> H-RMN .....  | 134        |
| 5.2.4    | Resultados análisis de contenido de metales mediante espectrometría de emisión atómica .....   | 135        |
| 5.2.5    | Resultados Evaluación ambiental mediante la metodología del Análisis del Ciclo de Vida en el software SimaPro 7.1 del Proceso de regeneración de aceite lubricantes usados mediante la tecnología de re-refinado y del proceso de valoración energética como combustible. .... | 136        |
| 5.2.6    | Resultados Evaluación ambiental mediante la metodología del Análisis del Ciclo de Vida en el software OpenLCA del Proceso experimental para la regeneración de aceites lubricante usados. ....   | 138        |
| <b>6</b> | <b>CONCLUSIONES .....</b>  | <b>140</b> |
| <b>7</b> | <b>RECOMENDACIONES .....</b>   | <b>142</b> |
| <b>8</b> | <b>BIBLIOGRAFIA .....</b>  | <b>143</b> |

## LISTA DE TABLAS

|                  |   |     |
|------------------|---|-----|
| <b>Tabla 1.</b>  | Composición media de un aceite base.....  | 20  |
| <b>Tabla 2.</b>  | Características típicas de los aceites usados.....  | 29  |
| <b>Tabla 3.</b>  | Comparación MADM y MODM.....  | 53  |
| <b>Tabla 4.</b>  | Listado de criterios o atributo a evaluar.....  | 75  |
| <b>Tabla 5.</b>  | Tabla comparativa de varias tecnologías de regeneración (aspecto económico) 77  |     |
| <b>Tabla 6.</b>  | Tabla comparativa de varias tecnologías de regeneración (aspecto de protección ambiental).....                          | 78  |
| <b>Tabla 7.</b>  | Datos normalizados del vector de pesos de criterio.....   | 80  |
| <b>Tabla 8.</b>  | Datos normalizados de la matriz de alternativas.....  | 81  |
| <b>Tabla 9.</b>  | Datos normalizados de la matriz de puntuación de las alternativas...  | 82  |
| <b>Tabla 10.</b> | Resultados de la Evaluación de tecnologías de regeneración de aceites lubricantes usados.....                           | 83  |
| <b>Tabla 11.</b> | Solubilidad y polaridad de solvente y soluto.....   | 85  |
| <b>Tabla 12.</b> | Listado de equipos Proceso experimental para la regeneración de aceites lubricantes usados.....                         | 101 |
| <b>Tabla 13.</b> | Listado de personal operativo para el proceso experimental para la regeneración de aceites lubricantes usados.....      | 102 |
| <b>Tabla 14.</b> | Listado de personal administrativo para el proceso experimental para la regeneración de aceites lubricantes usados..... | 102 |
| <b>Tabla 15.</b> | Listado de equipos proceso de destilación al vacío.....   | 109 |
| <b>Tabla 16.</b> | Listado de personal operativo proceso de destilación al vacío.....  | 110 |
| <b>Tabla 17.</b> | Listado de personal administrativo proceso de destilación al vacío.....   | 110 |
| <b>Tabla 18.</b> | Resumen del inventario para la recuperación de 1000 kg de aceite lubricante usado.....                                  | 124 |
| <b>Tabla 19.</b> | Resultados de la Evaluación de tecnologías de regeneración de aceites lubricantes usados.....                           | 132 |
| <b>Tabla 20.</b> | Caracterización aceite lubricante usado recolectado.....  | 133 |
| <b>Tabla 21.</b> | Caracterización Base Lubricante Recuperada.....   | 134 |

|                  |   |     |
|------------------|---|-----|
| <b>Tabla 22.</b> | Tabla de resultados análisis de espectroscopía de <sup>1</sup> H-RMN .....  | 134 |
| <b>Tabla 23.</b> | Contenido de metales .....  | 135 |
| <b>Tabla 24.</b> | Porcentaje de remoción en el proceso .....  | 136 |
| <b>Tabla 25.</b> | Inventario de ciclo de vida de diferentes escenarios para la gestión de 1000 kg aceite usado.....                                 | 136 |
| <b>Tabla 26.</b> | Resultados de la Evaluación ambiental mediante ACV del Proceso para la regeneración de aceite lubricante usados en Open LCA ..... | 138 |
| <b>Tabla 27.</b> | Escala para comparación por parejas .....   | 157 |
| <b>Tabla 28.</b> | Índice aleatorio RI .....   | 161 |
| <b>Tabla 29.</b> | Porcentajes máximos del ratio de consistencia CR.....   | 161 |
| <b>Tabla 30.</b> | Formato Matriz de Pugh.....   | 178 |
| <b>Tabla 31.</b> | Cálculo del vector de pesos de criterio.....  | 183 |
| <b>Tabla 32.</b> | Cálculo de la matriz de puntuación de las alternativas.....   | 185 |
| <b>Tabla 33.</b> | Matriz de puntuación Tasa de Reciclaje.....   | 187 |
| <b>Tabla 34.</b> | Normalización Matriz de puntuación Tasa de Reciclaje.....   | 188 |
| <b>Tabla 35.</b> | Matriz de puntuación uso de materiales químicos peligrosos .....  | 189 |
| <b>Tabla 36.</b> | Normalización Matriz de puntuación uso de materiales químicos peligrosos<br>190   |     |
| <b>Tabla 37.</b> | Matriz de puntuación requerimiento de espacio .....   | 191 |
| <b>Tabla 38.</b> | Normalización Matriz de puntuación requerimiento de espacio .....   | 192 |
| <b>Tabla 39.</b> | Matriz de puntuación madurez de la tecnología .....   | 193 |
| <b>Tabla 40.</b> | Normalización Matriz de puntuación madurez de la tecnología .....   | 194 |
| <b>Tabla 41.</b> | Matriz de puntuación capacidad de producción .....  | 195 |
| <b>Tabla 42.</b> | Normalización Matriz de puntuación capacidad de producción.....   | 196 |
| <b>Tabla 43.</b> | Matriz de puntuación calidad de producto terminado .....  | 197 |
| <b>Tabla 44.</b> | Normalización Matriz de puntuación calidad de producto terminado  | 198 |
| <b>Tabla 45.</b> | Matriz de puntuación consumo energético.....  | 199 |
| <b>Tabla 46.</b> | Normalización Matriz de puntuación consumo energético .....   | 200 |
| <b>Tabla 47.</b> | Matriz de puntuación impacto ambiental .....  | 201 |

|                  |  |     |
|------------------|--|-----|
| <b>Tabla 48.</b> | Normalización Matriz de puntuación impacto ambiental ..... | 202 |
| <b>Tabla 49.</b> | Matriz de puntuación CAPEX.....                            | 203 |
| <b>Tabla 50.</b> | Normalización Matriz de puntuación CAPEX .....             | 204 |
| <b>Tabla 51.</b> | Matriz de puntuación OPEX.....                             | 205 |
| <b>Tabla 52.</b> | Normalización Matriz de puntuación OPEX .....              | 206 |

## LISTA DE FIGURAS

|            |   |    |
|------------|---|----|
| Figura 1.  | Diagrama esquemático del proceso ácido-arcilla .....  | 39 |
| Figura 2.  | Diagrama esquemático del proceso de destilación .....   | 40 |
| Figura 3.  | Diagrama esquemático del proceso de extracción con solventes .....  | 42 |
| Figura 4.  | Diagrama esquemático del proceso TFE con hidroacabado.....  | 43 |
| Figura 5.  | Diagrama esquemático del proceso TFE con acabado con arcilla.....   | 44 |
| Figura 6.  | Diagrama esquemático del proceso TFE con acabado con solvente.....  | 45 |
| Figura 7.  | Diagrama esquemático del proceso de extracción con solventes con hidroacabado .....   | 46 |
| Figura 8.  | Métodos Multicriterio .....   | 47 |
| Figura 9.  | Proceso de decisión multicriterio.....  | 52 |
| Figura 10. | Ciclo de vida del producto .....  | 61 |
| Figura 11. | Ejemplo de entradas y salidas en el ciclo de vida .....   | 66 |
| Figura 12. | Diagrama de bloques de la metodología experimental .....  | 74 |
| Figura 13. | Metodología desarrollada para el planteamiento y validación técnica del procedimiento experimental para la regeneración de aceites lubricantes usados ..... | 88 |
| Figura 14. | Tubo de ensayo con relación de mezcla optima .....  | 89 |
| Figura 15. | Mezcla de aceite lubricante usado y solvente .....  | 90 |
| Figura 16. | Agitación mecánica mezcla de aceite lubricante usado y solvente .....   | 91 |
| Figura 17. | Proceso de precipitación de hollín e impurezas del aceite lubricante usado  | 92 |

|  |     |
|--|-----|
| Figura 18. Equipo de destilación atmosférica.....  | 93  |
| Figura 19. Base lubricante recuperada .....  | 93  |
| Figura 20. Proceso de absorción con arenas naturales .....   | 94  |
| Figura 21. Producto terminado (Base lubricante recuperada).....  | 95  |
| Figura 22. Diagrama Proceso experimental para la regeneración de aceite lubricantes usados .....   | 96  |
| Figura 23. Comportamiento del factor de parafinidad vs n.....  | 97  |
| Figura 24. Cambio en el índice de refracción de las dolomitas .....  | 99  |
| Figura 25. Resultados análisis de sensibilidad del VPN en Crystal Ball del proceso experimental para la regeneración de aceites lubricantes usados.....  | 108 |
| Figura 26. Resultados análisis de sensibilidad del VPN en Crystal Ball del proceso de destilación al vacío.....  | 116 |
| Figura 27. Ciclo de vida de la Cuna a la Puerta (Cradle to Gate) Aceite Lubricante para uso automotriz .....   | 118 |
| Figura 28. Ciclo de vida de la Cuna a la Puerta (Cradle to Gate) Aceite Lubricante Usado con valoración de aceites lubricantes usados mediante la recuperación de base lubricantes tipo II ..... | 119 |
| Figura 29. Ciclo de vida de la Cuna a la Puerta (Cradle to Gate) Aceite Lubricante Usado con valoración energética en el uso como combustible .....  | 120 |
| Figura 30. Ciclo de vida de la Cuna a la Puerta (Cradle to Gate) Valoración de aceites lubricantes usados mediante la recuperación de base lubricantes para el proceso planteado. ....           | 128 |
| Figura 31. Diagrama modelado del Proceso experimental para la regeneración de aceite lubricante usados en OpenLCA.....   | 130 |
| Figura 32. Entradas y salidas del Proceso experimental para la regeneración de aceite lubricante usados en OpenLCA.....  | 131 |
| Figura 33. Comparación impactos ambientales de diferentes escenarios de gestión de 1.000 gr de aceite lubricante usado .....   | 139 |
| Figura 34. Ejemplo de estructura jerárquica AHP .....  | 154 |
| Figura 35. Estructura de un problema multicriterio.....  | 164 |
| Figura 36. Modelos básicos de criterios generalizados.....   | 169 |
| Figura 37. Representación gráfica del perfil de una alternativa.....   | 174 |

## LISTA DE CUADROS

|  |     |
|--|-----|
| <b>Cuadro 1.</b> Normativa aplicable a la gestión de aceites usados en Colombia..... | 71  |
| <b>Cuadro 2.</b> Variables consideradas proceso planteado.....                       | 101 |
| <b>Cuadro 3.</b> Variables consideradas proceso de destilación al vacío .....        | 109 |

## LISTA DE ANEXOS

|  |     |
|--|-----|
| <b>Anexo A</b> .....   | 150 |
| Clasificación métodos de decisión multicriterio.....   | 150 |
| <b>Anexo B</b> .....   | 179 |
| Evaluación de las principales tecnologías de revalorización de aceites lubricantes<br>utilizadas a nivel mundial ..... | 179 |

## RESUMEN

**TITULO:** Evaluación integral de la gestión sostenible de residuos generados por aceites lubricantes usados de origen automotriz.

**AUTOR:** Jorge Andrés Cristancho Gómez

**PALABRAS CLAVE:** Aceites lubricantes usados, Bases lubricantes, Matriz multicriterio, Análisis de Ciclo de Vida, <sup>1</sup>H-RMN.

### DESCRIPCIÓN:

En este trabajo se realizará una evaluación integral de los residuos generados por aceites lubricantes usados (ALU) de origen automotriz, teniendo en cuenta los aspectos: técnicos, financieros y ambientales. Mediante un análisis multicriterio de los procesos las 7 tecnologías disponibles a nivel mundial en una escala industrial en la actualidad: El proceso ácido-arcilla, el proceso de destilación al vacío, el proceso de extracción con solventes, la tecnología de evaporación de película delgada (TFE por sus siglas en ingles), TFE + acabado con arcilla, TFE + acabado con disolvente y TFE + hidroacabado y la extracción con disolventes + hidroacabado; del análisis multicriterio aplicando la técnica de decisión AHP o proceso jerárquico, se preselecciona el proceso de destilación al vacío.

Tomando como base el proceso planteado por utilizada por (FAN, 2010)<sup>1</sup>, donde se plantea una extracción con solvente binario en una mezcla de hexano - DMK, en una relación de 1:3 y una relación solvente - aceite usado de 9:1, con una agitación mecánica a 300 RPM y una filtración por arenas naturales para mejorar el acabado,

---

<sup>1</sup> FAN, William Tsung-Chieh. Regeneration of used petroleum-based lubricants and biolubricants by a novel green and sustainable technology. PhD Environmental Engineering. University of Southern California, 2010.

se establece el proceso experimental, el cual logra regenerar el 88% del aceite lubricante usado y mediante análisis del  $^1\text{H-RMN}$ , se pudo establecer que la calidad de la base parafínica recuperada es de similares características a la de Ecopetrol.

A continuación, mediante una evaluación financiera, se muestra la viabilidad de ambos procesos de gestión, tanto el proceso experimental como el proceso de destilación al vacío.

Finaliza con una evaluación ambiental mediante la metodología de Análisis de Ciclo de Vida de tres modos de gestión de residuos: aprovechamiento energético, re-refinado por destilación al vacío y el proceso experimental

## ABSTRACT

**TITLE:** Comprehensive evaluation of the sustainable management of waste generated by used lubricating oils of automotive origin

**AUTHOR:** Jorge Andres Cristancho Gomez

**KEYWORDS:** Used lubricating oils, Lubricant bases, Multicriteria matrix, Life Cycle Analysis, <sup>1</sup>H-NMR.

### DESCRIPTION:

In this work, a comprehensive evaluation of the waste generated by used lubricating oils (ULO) of automotive origin will be carried out, taking into account the technical, financial and environmental aspects. Through a multi-criteria analysis of the processes, with the 7 technologies available worldwide on an industrial scale today: The acid-clay process, the vacuum distillation process, the solvent extraction process, the thin-film evaporation technology (TFE), TFE + clay finishing, TFE + solvent finishing and TFE + hydrofinishing and solvent extraction + hydrofinishing; From the multicriteria analysis applying the AHP decision technique or hierarchical process, the vacuum distillation process is preselected.

Based on the process proposed and used by (FAN, 2010), where an extraction with binary solvent is proposed in a mixture of hexane - DMK, in a ratio of 1:3 and a solvent - used oil ratio of 9:1, with a mechanical agitation at 300 RPM and a filtration through natural sands to improve the finish, the experimental process is established, which manages to regenerate 88% of the used lubricating oil and through <sup>1</sup>H-NMR analysis, it was possible to establish that the quality of the recovered paraffinic base has similar characteristics to that of Ecopetrol.

Next, through a financial evaluation, the viability of both management processes is shown, both the experimental process and the vacuum distillation process.

It ends with an environmental assessment using the Life Cycle Analysis methodology of three modes of waste management: energy use, re-refining by vacuum distillation and the experimental process.

## INTRODUCCIÓN

Los aceites lubricantes, son un subproducto valioso de la refinación del crudo; cuya función esencial es la de reducir la fricción y desgaste en las maquinas, este es un proceso continuo que con el paso del tiempo de servicio lleva a una degradación de dichos aceites, lo cual lo lleva a salir de servicio debido a la perdida de sus propiedades fundamentales.

Con el establecimiento de nuevas industrias, el aumento del número de transportes vehiculares y la industrialización de la agricultura y el desarrollo de la industria en general, la demanda mundial de aceites lubricantes viene aumentando, por tanto, la cantidad de desecho generado por el uso de los aceites lubricantes en estos procesos es enorme y dependiendo de su gestión, puede considerarse como una fuente de contaminación o como un recurso. 1 L de aceite de motor usado como combustible tiene un valor calórico de alrededor de 8000 kJ, que se puede usar para encender una bombilla de 100 W durante un día o proporcionar energía a un calentador eléctrico de 1000 W durante 2 h<sup>2</sup>; 3,8 L de aceite de motor usado se pueden regenerar principalmente en 2,3 kg de aceite lubricante. Asimismo, se requieren 67 L de crudo para extraer 1 L de aceite de motor, mientras que solo se requieren 1,6 L de aceite usado para generar la misma cantidad de aceite de motor. Los estudios también mostraron que un barril de petróleo crudo de 150 kg normalmente contiene solo 1,9 kg de aceite base de calidad lubricante. Además, la eficiencia del reciclaje de lubricantes usados esta aproximadamente entre el 60% al 75% con el beneficio que el aceite lubricante reciclado necesita menos energía en comparación con los aceites lubricantes derivados del petróleo crudo<sup>3</sup>.

---

<sup>2</sup> PRAMANIK, K. Properties and use of Jatropha curcas oil and diesel fuel blends in compression ignition engine. *Renewable energy*, 2003, vol. 28, no 2, p. 239-248.

<sup>3</sup> JAFARI, Ahmad Jonidi; HASSANPOUR, Malek. Analysis and comparison of used lubricants, regenerative technologies in the world. *Resources, Conservation and Recycling*, vol. 103. 2015. 179-191.

Cada año, aproximadamente 50 millones de galones de aceites lubricantes son consumidos en Colombia. Los aceites lubricantes son el resultado de una combinación de “aceites base”, que proveen las características lubricantes primarias y “aditivos” utilizados para aumentar su rendimiento, eficiencia y vida útil. Estas bases lubricantes, mezcladas con aditivos en una proporción aproximada del 10%, dan como resultado el lubricante nuevo<sup>4</sup>

Los aceites lubricantes usados contienen impurezas de tipo fisicoquímico altamente contaminantes; causando impactos ambientales considerables, tales como: una gota de aceite usado puede contaminar un 1 m<sup>3</sup> de agua y la incineración inadecuada de 5 litros de aceite provocaría la contaminación del aire que respira una persona durante tres años (1 Millón de m<sup>3</sup>); además, el inadecuado manejo de los mismos, generaría mediante la combustión, la emisión a la atmosfera de metales como arsénico, cadmio, cromo, plomo y antimonio entre otros, repercutiendo en daños a la salud humana y los recursos naturales<sup>5</sup>. Buscando mitigar los impactos ambientales y a su vez, tener un mayor beneficio en cuanto al aprovechamiento y valorización de los residuos generados por el uso automotriz de los aceites lubricantes usados; se viene dando una creciente tendencia en la regeneración y reutilización de éstos. Por lo tanto, existe en la actualidad varias alternativas para el aprovechamiento de los aceites lubricantes usados, a través de su recuperación y/o extracción de la base lubricante, que sirve en la formulación de nuevos aceites.

Este trabajo pretende dar una evaluación integral de la gestión sostenible de residuos generados por aceites lubricantes usados de origen automotriz, teniendo en cuenta los aspectos: técnicos, financieros y ambientales. Para tal fin, se llevará a cabo una evaluación mediante un análisis multicriterio de los procesos y/o tecnologías más utilizadas actualmente para la valoración de aceites lubricantes, a

---

<sup>4</sup> Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible. MANUAL TÉCNICO PARA EL MANEJO DE ACEITES LUBRICANTES USADOS DE ORIGEN AUTOMOTOR E INDUSTRIAL. Bogotá. 2014.

<sup>5</sup> FONDO DE ACEITES USADOS ASOCIACION COLOMBIANA DEL PETROLEO. Informe Año 2019. Bogotá. 2019.

partir de la recuperación de bases lubricantes mediante la aplicación de la técnica de decisión AHP o proceso analítico jerárquico.

Entre las tecnologías disponibles en la actualidad, las cuales serán la base del análisis están: El proceso ácido-arcilla, el proceso de destilación al vacío, el proceso de extracción con solventes, que generan lodos ácidos y causan la llamada contaminación secundaria; la tecnología de evaporación de película delgada (TFE por sus siglas en inglés), la cual se ha enfatizado en la disminución de la contaminación secundaria y consta de tres modos de procesamiento diferentes, dependiendo de su modo de acabado, a saber: TFE + acabado con arcilla, TFE + acabado con disolvente y TFE + hidroacabado y la extracción con disolventes + hidroacabado, que toma el hidrotreatmento como acabado después del tratamiento con solventes<sup>6</sup>.

Con base en las nuevas tecnologías presentadas en los últimos 10 años, se propondrá un nuevo proceso a escala laboratorio, el cual se analizará técnica-económicamente para determinar su factibilidad y se comparará con la opción seleccionada del análisis multicriterio realizado a las tecnologías mencionadas anteriormente. Posteriormente se realizará un análisis del comportamiento ambiental, de los dos procesos preseleccionados mediante la aplicación de la metodología del análisis de ciclo de vida.

---

<sup>6</sup> Jafari, A. J. Analysis and comparison of used lubricants, regenerative technologies in the world. Resources, Conservation and Recycling 103. 2015. 179-191p

## **1. OBJETIVOS**

### **1.1 OBJETIVO GENERAL**

Evaluar integralmente la gestión sostenible de los residuos generados por los aceites lubricantes usados de origen automotriz

### **1.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS**

- Evaluar mediante un análisis multicriterio los cinco principales procesos y/o tecnologías utilizadas a nivel mundial para la valoración de aceites lubricantes usados del sector automotriz, a partir de la recuperación de bases lubricantes.
- Determinar la factibilidad técnica-económica a escala de laboratorio de los dos procesos y/o tecnologías para la recuperación de base de lubricantes preseleccionadas.
- Realizar un análisis del comportamiento ambiental mediante el desarrollo del análisis de ciclo de vida de los dos procesos preseleccionados aplicados a la valorización de aceites lubricantes usados, mediante la recuperación de bases lubricantes.

## 2 MARCO TEORICO

### 2.1 GENERALIDADES DE LOS ACEITES LUBRICANTES

Los aceites lubricantes son sustancias líquidas derivadas del petróleo, compuestas en su mayoría por mezclas de diversos tipos de hidrocarburos que se utilizan para reducir la fricción de partes rodantes o deslizantes, proteger contra la corrosión, enfriar los sistemas y limpiar algunas piezas. Son el resultado de una combinación de “aceites base”, que proveen las características lubricantes primarias y “aditivos” utilizados para aumentar su rendimiento, eficiencia y vida útil. Los aceites base están compuestos por hidrocarburos entre el 75% y el 85% de la composición total. Pueden ser de tipo mineral cuando se obtienen del petróleo, a partir del proceso de refinación, o sintéticos si proceden de procesos de síntesis química<sup>7</sup>

**Tabla 1.** Composición media de un aceite base

| <b>Tipo de sustancia</b> | <b>Hidrocarburo</b> | <b>Composición</b> |
|--------------------------|---------------------|--------------------|
| Parafinas                | Alcanos             | 45-76%             |
| Naftenos                 | Ciclo alcanos       | 13-45%             |
| Aromáticos               | Aromáticos          | 10-30%             |

Nota: Adaptado de Martín Pantoja, José Luis. Tesis: La gestión de los aceites usados Escuela de Negocios, España, 2008

<sup>7</sup> Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible. Manual técnico para el manejo de aceites lubricantes usados de origen automotor e industrial. Bogotá. 2014

La función principal de los lubricantes es minimizar la fricción y el desgaste; sus funciones incluyen<sup>8</sup>:

### **Reducción de ruido y vibraciones**

El ruido y la vibración resultan de la fricción entre dos superficies metálicas deslizantes en el contacto se puede minimizar mediante una película lubricante adherida a las superficies metálicas.

### **Agente de limpieza y suspensión**

El lubricante puede actuar como un agente de limpieza para evitar productos potencialmente dañinos como barniz y laca, de depositarse en la superficie de los pistones o cilindros en motores. Los lubricantes pueden proteger las máquinas y los motores de los cortes daños al actuar como un medio para suspender impurezas duras y afiladas, como metales por rotura y desgaste de las piezas móviles.

### **Protección contra la corrosión**

Aditivos formulados en lubricantes, tales como inhibidores de herrumbre y corrosión, agentes de antioxidación, agentes antidesgaste, pueden proteger motores y máquinas de herrumbre y corrosión como resultado de la oxidación.

El lubricante puede actuar como medio disipador de calor en motores o máquinas para disipar el calor generado durante la operación.

### **Transferencia de energía**

Los lubricantes se pueden utilizar para transferir energía dentro de un sistema cerrado, como sistemas de circulación, sistemas de transmisión y sistemas hidráulicos

---

<sup>8</sup> FAN, William Tsung-Chieh. Regeneration of used petroleum-based lubricants and biolubricants by a novel green and sustainable technology. Tesis Doctoral Ingeniería Ambiental. California. Universidad del Sur de California, 2010.

### 2.1.1 Aditivos<sup>9</sup>

Los aditivos son compuestos químicos, solubles en aceite, destinados a mejorar las propiedades naturales y conferirle otras que no posee. Los mismos se agregan dependiendo de las características específicas que necesite el lubricante, según su destino.

Otra manera de definir los aditivos sería como sustancias activas, que se mezclan a los aceites básicos de lubricantes para obtener propiedades de lubricación requeridas para el funcionamiento, ya sea para aumentar las propiedades positivas, dar propiedades nuevas, eliminar o minimizar las características negativas.

Los distintos tipos de aditivos utilizados son:

- ✓ Detergentes: utilizados en aceites de motores, su papel es químico (neutralizantes) y fisicoquímico (dispersante).
- ✓ Antioxidante de altas temperaturas: su finalidad consiste en disminuir la oxidación de un aceite y proteger las piezas que están en movimiento contra la corrosión.
- ✓ Aditivos de extrema presión: confieren al aceite propiedades anti-soldaduras necesarias en la lubricación de engranajes de carácter cerrado en los que se desarrollan elevadas presiones.
- ✓ Aditivos mejoradores del punto de congelación: se busca obtener un punto de congelación bajo para que los aceites fluyan a bajas temperaturas.

---

<sup>9</sup> NIELSEN CINGEL, Melanie. Análisis de rentabilidad de planta de regeneración de aceites lubricantes. Tesis Doctoral Licenciatura en Economía. Mendoza. Universidad Nacional de Cuyo. Facultad de Ciencias Económicas. 2016. 8p.

- ✓ Antiespumantes: impiden la formación de una espuma estable cuando el aceite es agitado en contacto con el aire.
- ✓ Espesantes: actúan sobre las curvas de viscosidad a diferentes temperaturas.
- ✓ Mejoradores de untuosidad: dotan al aceite de propiedades de adherencia a las superficies deslizantes.
- ✓ Dispersantes: mantiene los residuos procedentes de la combustión sin aglomerarse y sin que se depositen en el motor.
- ✓ Inhibidores de la corrosión.
- ✓ Agentes alcalinos: neutralizan los ácidos presentes en el aceite formando sales inertes que previenen la oxidación del propio aceite.
- ✓ Bactericidas: previenen y controlan el crecimiento bacteriano atacando a la membrana celular y causándole la muerte.

Estos aceites con su uso se deterioran, bien por degradación de sus aditivos o bien por contaminaciones externas; de cualquier forma, dejan de cubrir las necesidades para las que se diseñaron y resulta necesaria su sustitución por otros nuevos.

Cada aplicación del aceite genera una determinada cantidad de aceite usado que es necesario gestionar. La fracción de aceite nuevo que se genera como aceite usado en su sustitución varía entre un 10% en los aceites de proceso hasta un 90% en los aceites de transformadores eléctricos. La fracción no generada se pierde durante su uso o manejo o como resultado de salpicaduras, combustiones o deterioros.

### **2.1.2 Consumo de aceites lubricantes en Colombia<sup>10</sup>**

Cada año, aproximadamente 50 millones de galones de lubricantes son consumidos en Colombia. Una parte es producida por ECOPETROL y la otra es importada de países como Venezuela y Estados Unidos. Los aceites lubricantes que abastecen las necesidades del mercado son utilizados en el sector industrial: mediante los aceites de proceso, de turbinas, hidráulicos, de corte, de transformador, 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.

Cuando el lubricante es producido localmente, el 90% de su materia prima está compuesta por bases nafténicas o por bases parafínicas, que son producidas por ECOPETROL en un 40% o importadas de Venezuela, Estados Unidos y Europa en un 60%. Estas bases lubricantes, mezcladas con aditivos en una proporción aproximada del 10%, dan como resultado el lubricante nuevo.

### **2.1.3 Bases lubricantes<sup>11</sup>**

Los materiales que se pueden usar para fabricar aceites base lubricantes incluyen:

- a. Los aceites minerales derivados del petróleo (petróleo crudo)
- b. Las moléculas de cadena larga hechas artificialmente, tales como fluidos de hidrocarburos sintetizados, ésteres orgánicos, poliglicoles, fosfato ésteres, siliconas y ésteres de silicato
- c. Aceites extraídos de plantas o grasa animal y grasa.

---

<sup>10</sup> Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible. Manual técnico para el manejo de aceites lubricantes usados de origen automotor e industrial. Bogotá. 2014.

<sup>11</sup> FAN, William Tsung-Chieh. Regeneration of used petroleum-based lubricants and biolubricants by a novel green and sustainable technology. Tesis Doctoral Ingeniería Ambiental. California. Universidad del Sur de California, 2010.

Los aceites base derivados de las plantas (p. ej., canola, palma, ricino, girasol, uva semillas) son principalmente ésteres de triglicéridos, que se compone de tres ácidos grasos (esteárico, oleico y linoleico) y un glicerol. Los beneficios de los aceites vegetales incluyen baja volatilidad, alta solubilidad aditiva, alto VI y buen medio ambiente compatibilidad. Sin embargo, la estabilidad a la oxidación de los aceites vegetales es pobre en comparación con aceite base a. y b.

El uso de grasas o grasas animales como aceites base lubricantes ya no es práctico debido a propiedades indeseables de la mayoría de las grasas animales y la esencia de la protección animal.

#### **2.1.4 Clasificaciones de aceites base<sup>12</sup>**

La propiedad de los lubricantes varía con los aceites base. El aceite base se clasifica por el Instituto Americano del Petróleo (API) en diferentes grupos dependiendo de las fuentes y las características de los stocks base. En general, los grupos 1, 2 y 3 son diferentes grados de aceites base minerales. Los grupos 4 y 5 son de los diferentes tipos de aceites sintéticos.

##### **2.1.4.1 Grupo 1. Aceites base convencionales**

Los aceites base del Grupo 1, son aceites minerales convencionales derivados de las fracciones de la destilación del petróleo crudo. Los aceites minerales convencionales se han utilizado como aceites base lubricantes desde la década de 1930. Los aceites base del grupo 1 tienen menos del 90 % de hidrocarburos saturados y más de 300 ppm de compuestos de azufre. El índice de viscosidad (VI) de los aceites base del grupo 1 es en el rango de 80 a 119.

---

<sup>12</sup> Kramer, D.C.; Lok, B.K.; Kurg, R.R. and Rosenbaum, J.M. (2003b) Chevron Texaco Global Lubricants. The Advent of Modern Hydroprocessing: The Evolution of Base Oil Technology, Part 2. Machinery Lubrication Magazine. 2003.

#### **2.1.4.2 Grupo 2. Aceites básicos convencionales modernos**

Los aceites base del grupo 2 son aceites minerales producidos por hidroprocesamiento moderno con tecnologías como hidrotratamiento, hidrocrackeo, hidroisomerización de cera, e hidroacabado. En comparación con los aceites base minerales convencionales del grupo 1, el grupo 2 aceites base tienen un mejor rendimiento, y los compuestos de azufre y las impurezas del grupo 2 son inferiores. Además, los aceites base del grupo 2 son más estables que grupo 1 a alta temperatura. Los aceites base del grupo 2 normalmente contienen más de 90% de compuestos de hidrocarburos saturados y menos de 300 ppm de azufre compuestos. Índice de viscosidad (VI) de aceites base del grupo 2 también está en el rango de 80 a 119.

#### **2.1.4.3 Grupo 3. Aceites base no convencionales (Por sus siglas en inglés UCBOS)**

Los aceites base del grupo 3 también se conocen como aceites base de índice de viscosidad muy alto (VHVI). El índice de viscosidad (VI) de los aceites base del Grupo 3 es mucho mayor que el de los aceites base del Grupo 1 y 2. El rendimiento de los aceites base del grupo 3 es mucho mejor que el del grupo 1 y 2 a baja temperatura. Los UCBOS son actualmente el tipo más popular de aceites base minerales en Norte América. Los UCBOS contienen más del 90% de hidrocarburos saturados y menos de 300 ppm de compuestos de azufre. El índice de viscosidad (VI) de los aceites base del grupo 3 es normalmente mayor que 120.

#### **2.1.4.4 Grupo 4. Aceites base sintéticos tradicionales**

Los aceites base sintéticos del grupo 4 se denominan comúnmente alfa polimerizado olefinas (PAO). En comparación con los aceites base minerales, los PAO tienen un vertido extremadamente bajo punto de modo que sean adecuados para su uso en aplicaciones a muy baja temperatura. El rendimiento general de los aceites base sintéticos del grupo 4 es similar al UCBO. Sin embargo, los PAO todavía no son tan

populares como los UCBO hoy en día debido a su alto costo. Hoy en día, los UCBO son reconocidos tan buenos como los aceites base sintéticos por el Departamento Nacional de Publicidad del Better Business Bureau en el Norte América.

#### **2.1.4.4 Grupo 5. Aceites base sintéticos especializados**

El grupo 5 son aceites base de ingeniería que incluyen hidrocarburos sintetizados líquidos (p. ej., polialfaolefinas, polibutenos), ésteres orgánicos (p. ej., éster de poliol, éster auxiliar dibásico) y ésteres de silicato, poliglicoles (p. ej., polialquileno, polioxialquileno, poliéteres, poliglicoésteres), ésteres de fosfato (p. ej., triaril éster de fosfato, ésteres de fosfato de trialquilo), siliconas y ésteres de silicato.

Los ésteres son los aceites base sintéticos más populares utilizados hoy en día en el mercado de lubricantes porque sus puntos de ebullición son altos y sus viscosidades son relativamente estables a alta temperatura.

## **2.2 ACEITES LUBRICANTES USADOS<sup>13</sup>**

Con el uso, los aceites con base mineral, sintética o semisintética acumulan contaminantes que se degradan y hacen que los aceites pierdan sus características y cualidades originales. Ante esta situación, se hace necesaria la sustitución por aceites nuevos generándose de esa forma el residuo conocido como aceite usado, que debe ser gestionado integralmente hasta el aprovechamiento o valorización y eliminación.

Los aceites usados más conocidos generados en la actualidad provienen del uso de:

- Aceite sintético.
- Líquido para transmisión.

---

<sup>13</sup> Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible. Manual técnico para el manejo de aceites lubricantes usados de origen automotor e industrial. Bogotá. 2014. 16p

- Aceite de motor
- Aceite de refrigeración.
- Fluidos y aceites en empresas metalúrgicas.
- Aceite para compresores.
- Aceites para laminar.
- Líquidos hidráulicos industriales.
- Soluciones para el trefilado de cobre y aluminio.
- Aceite de aislamiento eléctrico.
- Aceites utilizados como medio de flotación.
- Aceites de procesos industriales.

Según información del Fondo de Aceites Usados -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 del aceite usado con base en los planes de manejo de aceite usado que desarrollan sus afiliados con los operadores.

El total de ese aceite usado recuperado es convertido en combustibles secundarios con destino a la industria ya sea con o sin mezclas con otros combustibles tradicionales. De igual forma, la totalidad de estos aceites usados son tratados en procesos de recuperación energética.

Sin embargo, en la actualidad estos aceites se pueden reciclar mediante procesos de recuperación o refinación para obtener materiales útiles que se utilizan favorablemente en la industria, la mayor parte de estos aceites se reciclan como combustibles después de eliminar las impurezas insolubles lo que nos lleva a problemas de contaminación.

**Tabla 2.** Características típicas de los aceites usados

| <b>Característica</b>         | <b>Automotriz</b> | <b>Industrial</b> |
|-------------------------------|-------------------|-------------------|
| Viscosidad a 40°C, SSU        | 97 - 120          | 143 - 330         |
| Gravedad a 15.6°C, °API       | 19 - 22           | 25,7 - 26,2       |
| Peso específico a 15.6°C      | 0,9396 - 0,8692   | 0,9002 - 0,8972   |
| Agua, %vol.                   | 0,2 – 33,8        | 0,1 – 4,6         |
| Insolubles en benceno, % peso | 0,1 - 4,2         | 0                 |
| Solubles en gasolina, % vol.  | 0,56 – 33,3       | 0                 |
| Punto de ignición, °C         | 78 - 220          | 157 – 179         |
| Potencia calorífica, MJ/kg    | 31,560 – 44,880   | 40,120– 41,840    |

**Fuente:** Transformación de los aceites usados para su utilización como energéticos en procesos de combustión. Unidad de Política Minero-Energética -UPME, octubre de 2001. Resumen ejecutivo

### **2.2.1 Degradación del aceite lubricante mineral<sup>14</sup>**

Los aceites se oxidan al ser sometidos a altas temperaturas o al estar en contacto con el aire, gracias a esto se da formación de ácidos y compuestos de oxidación que pueden acelerar la reacción de oxidación del aceite, dando lugar a problemas operacionales como: bloqueo de válvulas, sulfatación de circuitos y provocar un mal funcionamiento de los equipos. Además, se debe tener en cuenta que al aumentar la temperatura del aceite también acelera la reacción de oxidación. Adicionalmente muchos materiales actúan como catalizadores de la reacción. El cobre, precedente del desgaste de rodamientos, tuberías y refrigerantes; compuestos ferrosos formados por la reacción del agua y de algunos compuestos oxidados del aceite;

<sup>14</sup> TORRES COBOS, Pablo Andrés. Diseño de un plan de recolección y el re-refinamiento de los aceites lubricantes usados en la ciudad de Loja. Tesis de Ingeniero Mecánico Automotriz. Quito. Universidad Internacional Del Ecuador. Facultad de Ingeniería Mecánica Automotriz. 2014. 30-51p.

materias extrañas suspendidas en el aceite y otros productos de oxidación, son catalizadores muy activos del proceso de oxidación

Por otra parte, cuando el aceite lubricante entra en contacto con las piezas a lubricar puede mezclarse con residuos del aceite usado anterior, lo que genera contaminación. Además, los aditivos cumplen con su función de disolver los lodos provenientes del aceite gastado lo que aumenta el grado de deterioro.

El hollín resulta de la fricción entre piezas metálicas y el desgaste del aceite, este es el responsable de aumentar la contaminación ambiental, debido a que la combustión de los hidrocarburos es incompleta. Los tamaños de partícula varían entre 0.5 a 1.0 micras y generalmente se encuentran muy dispersas, por lo cual, la filtración es compleja. Existe una reacción de oxidación que provoca la descomposición de los aceites de motor, esta reacción en los hidrocarburos en fase líquida suele deberse a una reacción de radicales en cadena. La reacción no se inicia hasta pasado un cierto periodo de inducción, el cual corresponde al intervalo necesario para la formación de los peróxidos (que actúan como catalizadores), sin embargo, dado que las altas temperaturas aceleran esta reacción, en el motor la oxidación se produce de forma muy rápida, en particular por la elevada temperatura que alcanzan las piezas próximas a la cámara de combustión.

La degradación de los lubricantes ya sea sintéticos, minerales o semisintéticos afecta directamente a la operatividad de todo tipo de maquinaria industrial. Si no se toman las medidas adecuadas para evitar que este deterioro dañe componentes críticos o la máquina en su conjunto; esto puede llevar a elevados costos por paradas no planificadas e incluso catastróficas.

La degradación de los aceites lubricantes está ligados al entorno y al trabajo que este realiza. Algunas de las causas principales es la oxidación, debido a que es el fenómeno más habitual gracias a la presencia de oxígeno en el ambiente circundante

y la nitración o la sulfatación dependiendo del elemento químico que lo genere. La degradación no se produce de forma repentina, sino de manera gradual debido a la progresiva generación de ácidos carboxílicos producto de la degradación. Dicho de otra forma, aumenta la acidez del lubricante.

La naturaleza de las partículas extrañas que contaminan el lubricante varía de acuerdo con el tipo de trabajo del mecanismo. Los principales factores de degradación de un aceite lubricante son:

#### **2.2.1.1 Temperatura de operación<sup>15</sup>**

Los lubricantes derivados del petróleo son hidrocarburos, se descomponen cuando están sometidos a altas temperaturas, lo cual hace que el aceite se oxide o se polimerice.

Un aceite descompuesto de esta manera puede presentar productos solubles o insolubles, los productos solubles, por lo general, son ácidos que forman emulsiones estables en presencia de agua y que atacan químicamente las superficies metálicas, principalmente cuando son de plomo o de cobre-plomo, si la concentración de estos ácidos aumenta considerablemente no pueden ser inhibidos por los aditivos antioxidantes y anticorrosivos, formando lodos que dan lugar a los productos insolubles.

Si estos productos no se eliminan del aceite pueden deteriorar las superficies metálicas que lubrican o taponan las tuberías de conducción del mismo. La oxidación y la polimerización depende en mayor grado del tipo de base lubricante de que esté compuesto el aceite y del grado de refinamiento que posea, aunque es posible evitar que ocurran mediante la utilización de aditivos antioxidantes.

---

<sup>15</sup> Payri, F., & Desantes, J. [Sitio web]. Diagnóstico de Motores Diesel mediante el Análisis del Aceite Usado. [Consulta: 15 de julio 2022]. Disponible en: <https://cutt.ly/cCQjt90>

A temperatura ambiente el aceite puede mostrar algún grado de deterioro, el cual no incide apreciablemente en su duración, a temperaturas menores de 50°C la velocidad de oxidación es bastante baja como para no ser factor determinante en la vida del aceite.

Mientras más baja sea la temperatura de operación, menores serán las posibilidades de deterioro.

#### **2.2.1.2 Agua**

Esta se encuentra principalmente por la condensación del vapor presente en la atmósfera o en algunos casos se debe a fugas en los sistemas de enfriamiento del aceite. El agua presente en el aceite provoca emulsificación del aceite, o puede lavar la película lubricante que se encuentra sobre la superficie metálica provocando desgaste de dicha superficie.

#### **2.2.1.3 Combustibles**

Se encuentran en los aceites debido a su paso hacia la cámara de combustión y de esta hasta el cárter, al interactuar con el aceite ocasionan una dilución de este.

#### **2.2.1.4 Sólidos y polvo**

Se deben principalmente a empaques y sellos en mal estado, permitiendo que contaminantes del medio entren al aceite. Otros contaminantes menos frecuentes,

aunque igualmente perjudiciales son: tierra y partículas metálicas provenientes del desgaste de las piezas, hollín y subproductos de la combustión de combustibles líquidos<sup>16</sup>.

### **2.2.2 Impactos al medio ambiente<sup>17</sup>**

Los aceites lubricantes usados son potencialmente peligrosos, tóxicos para el medio ambiente ya que tienen la habilidad de esparcirse en los suelos y en los cuerpos hídricos, estos forman una película en la superficie del agua evitando el ingreso del oxígeno y la luz solar de manera que elimina el proceso fotosintético. El aceite usado debido a su persistencia promueve la rápida degradación tanto de los suelos como de los cuerpos hídricos, pero a la vez al estar en contacto directo con la luz solar y el aire emiten emisiones tóxicas, liberación de contaminantes, presentes en ellos como compuestos orgánicos volátiles VOC's y metales pesados.

En el residuo aceitoso existen hidrocarburos que se incrustan al suelo y por su persistencia estos no se movilizan. Al momento que se produzca un derrame en los suelos algunos hidrocarburos se evaporan inmediatamente, otros tomarán más tiempo contaminando siempre el aire. Es importante mencionar que en el aceite usado existen hidrocarburos que no se evaporan permaneciendo en los suelos de manera indeterminada, no se disuelven en el agua y por lo general no se degradan, algunos de estos hidrocarburos se infiltran al agua subterránea o se esparcen por las aguas lluvias contaminando los cuerpos de agua.

El aceite lubricante usado tiene alcances inimaginables tales como al ser vertidos en

---

<sup>16</sup> Payri, F., & Desantes, J. [Sitio web]. Diagnóstico de Motores Diesel mediante el Análisis del Aceite Usado. [Consulta: 15 de julio 2022b]. Disponible en: <https://cutt.ly/cCQjt90>

<sup>17</sup> TORRES COBOS, Pablo Andrés. Diseño de un plan de recolección y el re-refinamiento de los aceites lubricantes usados en la ciudad de Loja. Tesis de Ingeniero Mecánico Automotriz. Quito. Universidad Internacional Del Ecuador. Facultad de Ingeniería Mecánica Automotriz. 2014b. 36-39p.

cuerpos hídricos como por ejemplo un río, se adhieren a pequeñas partículas de agua que a medida del tiempo estas se depositan el fondo donde permanecen por muchos años contaminando las especies acuáticas y su ambiente.

Como se lo menciono anteriormente en los lubricantes usados existen metales que son solubles con el agua, al disolverse estos pueden filtrarse en los suelos llegando a aguas superficiales o hasta agua subterráneas, por lo general las aguas subterráneas fluyen bajo tierra hasta llegar a ríos, pantanos o lagos.

El aceite lubricante usado por lo general se lo re-utiliza como un combustible alternativo. Al momento de re-utilizarse y donde exista una mala combustión el impacto ambiental se incrementa ya que genera emisiones de metales pesados como cadmio Cd, cromo Cr, plomo Pb los cuales se pueden degradar mediante la fotooxidación produciendo efectos en el medio ambiente y la salud.

Acorde con la publicación técnica de la revista Daphnia (2009) sobre el medio ambiente y lo que el aceite usado puede provocar, expone los siguientes puntos sobre los efectos que este provoca a la salud y al medio ambiente.

- Irritaciones del tejido respiratorio por la presencia de gases que contienen aldehídos, cetonas, compuestos aromáticos, etc.
- La presencia de elementos químicos como Cl (Cloro), NO<sub>2</sub> (dióxido de nitrógeno), H<sub>2</sub>S (ácido sulfhídrico), Sb (antimonio), Cr (Cromo), Ni (Níquel), Cd (Cadmio), Cu (Cobre) afectan las vías respiratorias superiores y los tejidos pulmonares.
- Producción de efectos asfixiantes, impidiendo el transporte de oxígeno, por contener monóxido de carbono, disolventes halogenados, ácido sulfhídrico, etc.
- Efectos cancerígenos sobre próstata, vejiga y pulmón por presencia de metales como plomo, cadmio, manganeso, etc.

Pero, al no ser biodegradables, también sobre el medio ambiente:

- Vertidos a las aguas: Originan una película impermeable entre la atmósfera y la superficie acuática que ocasiona una disminución del oxígeno disuelto en el agua y como consecuencia final, la muerte de todos los organismos vivos que habitan allí.
- Vertidos en suelos: Recubren el suelo y provocan una disminución del oxígeno. El humus vegetal se va degradando y finalmente ocasiona una pérdida de la fertilidad.
- Emisiones a la atmósfera: La combustión de aceites usados provoca emisiones a la atmósfera de metales como el plomo, gases tóxicos (compuestos de cloro, azufre y fósforo) y otros elementos, con los correspondientes efectos.

Según la EPA (2013) “1 galón de aceite lubricante usado contamina alrededor de un millón de galones de agua, la misma que satisface las necesidades de cincuenta personas por un año<sup>18</sup>.

### **2.3 REGENERACION DEL ACEITE USADO**

El tratamiento del aceite usado es un tema importante. Estudios anteriores sugirieron que el reciclaje eficiente de productos derivados del petróleo puede reducir el impacto de la contaminación ambiental y la emisión de gases de efecto invernadero CO<sub>2</sub> y tiene grandes beneficios tanto en la protección ambiental como en la economía<sup>19</sup>. Para extraer 1 L de aceite lubricante se requieren 67 L de crudo; sin

---

<sup>18</sup> U.S. Environmental Protection Agency. [Sitio web]. Used Oil Management Program. [Consulta: 10 de julio del 2022]. Disponible en: <https://cutt.ly/aCQgANZ>

<sup>19</sup> WILLING, Andreas. Lubricants based on renewable resources—an environmentally compatible alternative to mineral oil products. *Chemosphere*, vol. 43, no 1. 2001. 89-98p.

embargo, solo se requieren 1,6 L de aceite usado para extraer 1 L de aceite lubricante del aceite usado<sup>20</sup>.

La ventaja de regenerar el aceite usado como aceite lubricante crudo es la reducción de productos derivados del petróleo importados. En la actualidad, debido a la creciente conciencia ambiental mundial, las organizaciones de protección ambiental de todos los países han exigido a los fabricantes de productos que sean responsables del reciclaje. Significa que los fabricantes de aceite lubricante necesitan reciclar el aceite lubricante usado. El reciclaje y la regeneración del aceite lubricante son una acción en la que todos ganan, conforme a los requisitos medioambientales. Los usuarios pueden ahorrar dinero al reducir la cantidad y el costo del aceite lubricante y contribuir a la protección del medio ambiente.

La principal fuente de contaminación durante el uso del aceite es la descomposición química de los aditivos y la subsiguiente interacción entre los componentes resultantes para producir ácidos corrosivos y otras sustancias no deseadas. Entre los metales, el plomo suele estar presente en concentraciones elevadas debido a la fuga del pistón en los motores que utilizan gasolina con plomo. Los solventes clorados también pueden estar presentes en cantidades significativas como resultado de la descomposición de los paquetes de aditivos y la adición de cloro y bromo que actúan como eliminadores de plomo en la gasolina con plomo. Los hidrocarburos aromáticos polinucleares (HAP) son motivo de especial preocupación debido a su conocida carcinogenicidad<sup>21</sup>.

En la actualidad, existen muchas tecnologías de regeneración de aceites usados, pero todas las tecnologías sirven con el propósito de generar aceite lubricante para su reutilización.

---

<sup>20</sup> HSU, Yu-Lung; LIU, Chun-Chu. Evaluation and selection of regeneration of waste lubricating oil technology. *Environmental monitoring and assessment*, vol. 176, no 1. 2011. 197-212p.

<sup>21</sup> EL-FADEL, M.; KHOURY, R. Strategies for vehicle waste-oil management: a case study. *Resources, conservation and recycling*, vol. 33, no 2. 2001. 75-91p.

Entre las tecnologías disponibles en la actualidad, la principal diferencia es el desasfaltado y el tratamiento de acabado. Las primeras tecnologías de regeneración incluyen el proceso de ácido-arcilla, el proceso de destilación al vacío y el proceso de extracción con solventes, que generarían lodos ácidos y causarían la llamada contaminación secundaria. Las tecnologías posteriores han prestado atención a la reducción de la contaminación secundaria. En la actualidad, la última tecnología es la de evaporación de película delgada (con sus siglas en inglés TFE), tiene tres modos de procesamiento diferentes debido a los diferentes modos de acabado, como TFE + acabado con arcilla, TFE + acabado con disolvente y TFE + hidroacabado. Una tecnología de regeneración estudiada en los últimos años es la extracción con disolventes + hidroacabado, que toma el hidrotreatmento como el acabado después del tratamiento con disolventes.

### **2.3.1 Proceso ácido-arcilla<sup>22</sup>**

- En una primera instancia el aceite usado es calentado hasta temperaturas de 170°C, para permitir la evaporación del agua y eliminación de otras materias volátiles como nafta y solventes orgánicos que puedan haberse mezclado con el aceite usado.
- Luego de que enfría hasta aproximadamente 30 o 40° C es mezclado con ácido sulfúrico concentrado (10% de la cantidad de aceite usado) dejándolo reposar durante 16h a 48h para eliminar gran parte de las impurezas. De esta mezcla se forman compuestos con azufre insoluble (asfalto de fango). El lodo ácido se extrae para ser almacenado en depósitos.

---

<sup>22</sup> TORRES COBOS, Pablo Andrés. Diseño de un plan de recolección y el re-refinamiento de los aceites lubricantes usados en la ciudad de Loja. Tesis de Ingeniero Mecánico Automotriz. Quito. Universidad Internacional Del Ecuador. Facultad de Ingeniería Mecánica Automotriz. 2014. 101p.

- A continuación, el producto se someta a neutralización: se agrega óxido de calcio o cenizas de soda y se calienta bajo agitación, nuevamente a 170° C. El proceso demora 2 a 4 horas. La cal reacciona con el ácido neutralizando el aceite a un pH 7 y formando yeso.
- Para finalizar el contenido se pasa a través de una prensa de filtración que separa el sólido (yeso) del aceite. La filtración se puede realizar con arcilla para mejorar el color y olor mediante tierra de blanqueo (por ejemplo, tierra Fuller).

La mayor desventaja de este proceso es la generación de residuos (lodo ácido y yeso endurecido del filtro remojado con aceite)

### **2.3.2 Proceso de destilación**

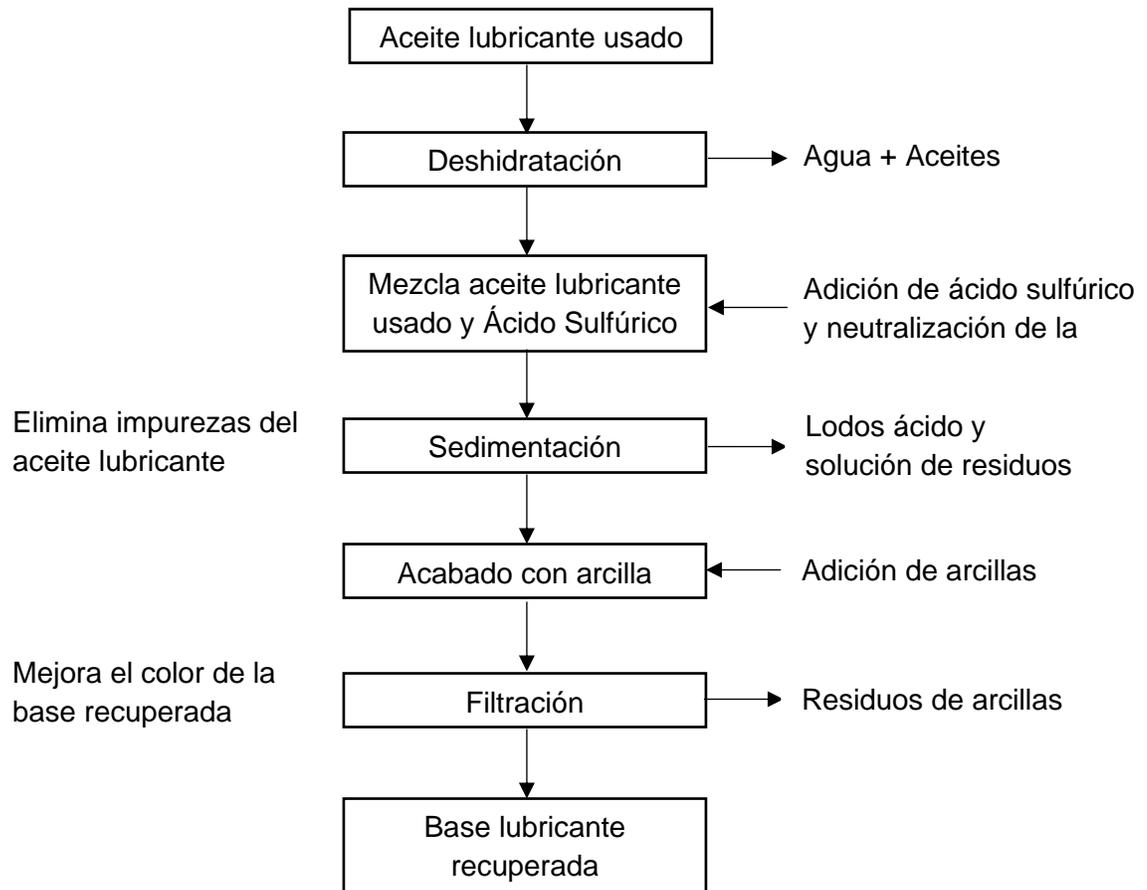
El principio de funcionamiento del proceso de destilación (Ver Fig. 2) es purificar aún más el aceite usado por destilación al vacío a temperaturas comprendidas entre 315 y 430 °C antes del proceso ácido/arcilla, disminuyendo el consumo de ácido sulfúrico y la cantidad de lodos generados<sup>23</sup>.

El producto restante en el fondo de la torre de destilación son productos que contiene metales, material asfáltico y productos de polimerización los cuales son considerados residuos peligrosos y los mismos se deben eliminar mediante un incinerador para este tipo de residuo o en un horno de cemento. Este es un proceso que comparado con el proceso ácido-arcilla permite y requiere de grandes cantidades de residuo, de aceite lubricante usado.

---

<sup>23</sup> HSU, Yu Lung; LEE, Cheng Haw; KRENG, Victor B. Analysis and comparison of regenerative technologies of waste lubricant. WSEAS Transactions on Environment and Development, vol. 5, no 3. 2009. 304p.

Figura 1. Diagrama esquemático del proceso ácido-arcilla



**Fuente:** HSU, Yu Lung; LEE, Cheng Haw; KRENG, Victor B. Analysis and comparison of regenerative technologies of waste lubricant. WSEAS Transactions on Environment and Development, vol. 5, no 3. 2009. 304p.

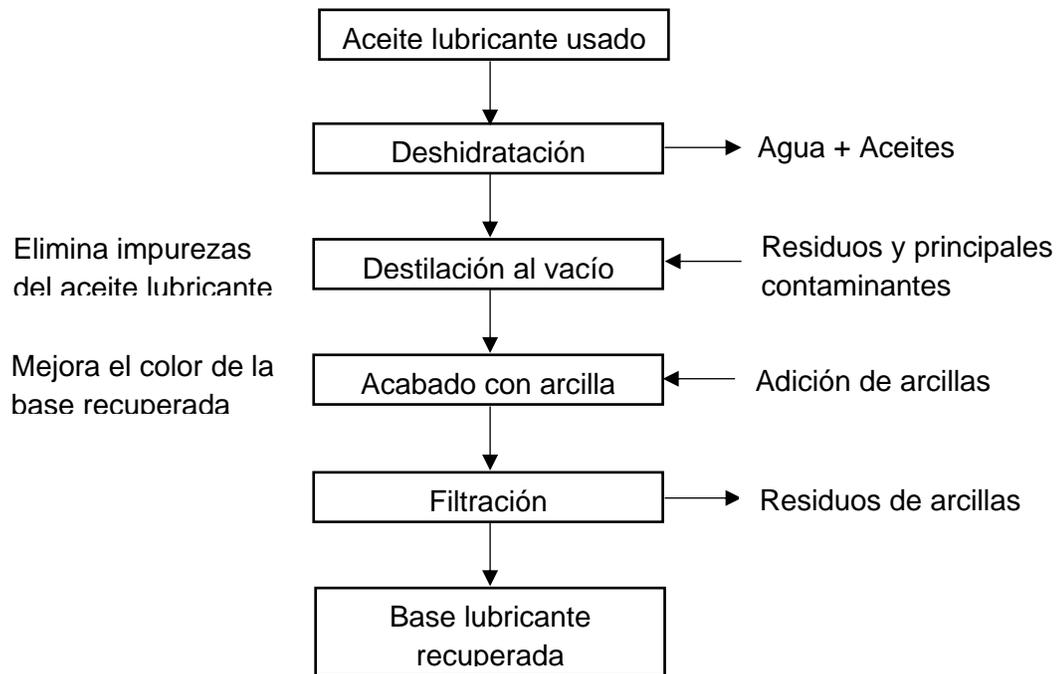
### 2.3.3 Proceso de Extracción con solventes<sup>24</sup>

Este proceso es más amigable con el ambiente que el proceso de ácido-arcilla, ya que en este se produce un lodo orgánico, mientras que en el otro proceso se produce

<sup>24</sup> Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible. Manual técnico para el manejo de aceites lubricantes usados de origen automotor e industrial. Bogotá. 2014. 64p

un lodo tóxico que es producto del ácido sulfúrico que interviene en el proceso (Ver Fig. 3). En la extracción por solvente se mezcla el aceite usado y el solvente en proporciones adecuadas asegurando así la completa miscibilidad de las bases lubricantes que contiene el aceite usado en el solvente que es agregado (generalmente se utiliza: propano, 2- propanol, metil etil cetona o 1- butanol). El solvente removerá los aditivos además de las impurezas orgánicas que contiene el aceite usado, las cuales se separan en sedimentación por la fuerza de gravedad. Finalmente se recupera el solvente en una unidad de destilación para su posterior reutilización.

**Figura 2.** Diagrama esquemático del proceso de destilación



**Fuente:** HSU, Yu Lung; LEE, Cheng Haw; KRENG, Victor B. Analysis and comparison of regenerative technologies of waste lubricant. WSEAS Transactions on Environment and Development, vol. 5, no 3. 2009. 304p.

### **2.3.4 Tecnología de evaporación de película delgada (TFE por sus siglas en inglés)) + hidroacabado<sup>25</sup>**

Este método utiliza principalmente la destilación flash o destilación de película fina para separar las materias extrañas del aceite y purifica el aceite resultante, mediante hidrogenación para evitar la contaminación secundaria (Ver Fig. 4). El proceso consiste en deshidratar y eliminar primero la humedad y el aceite ligero del aceite usado, destilar los componentes libres del aceite usado a través de la destilación al vacío y llevar a cabo la separación de la película a alta temperatura. Finalmente, el aceite se hidrogena y se da posterior paso a la eliminación de los compuestos de cloro, nitrógeno, oxígeno y azufre.

### **2.3.5 TFE + acabado de arcilla<sup>26</sup>**

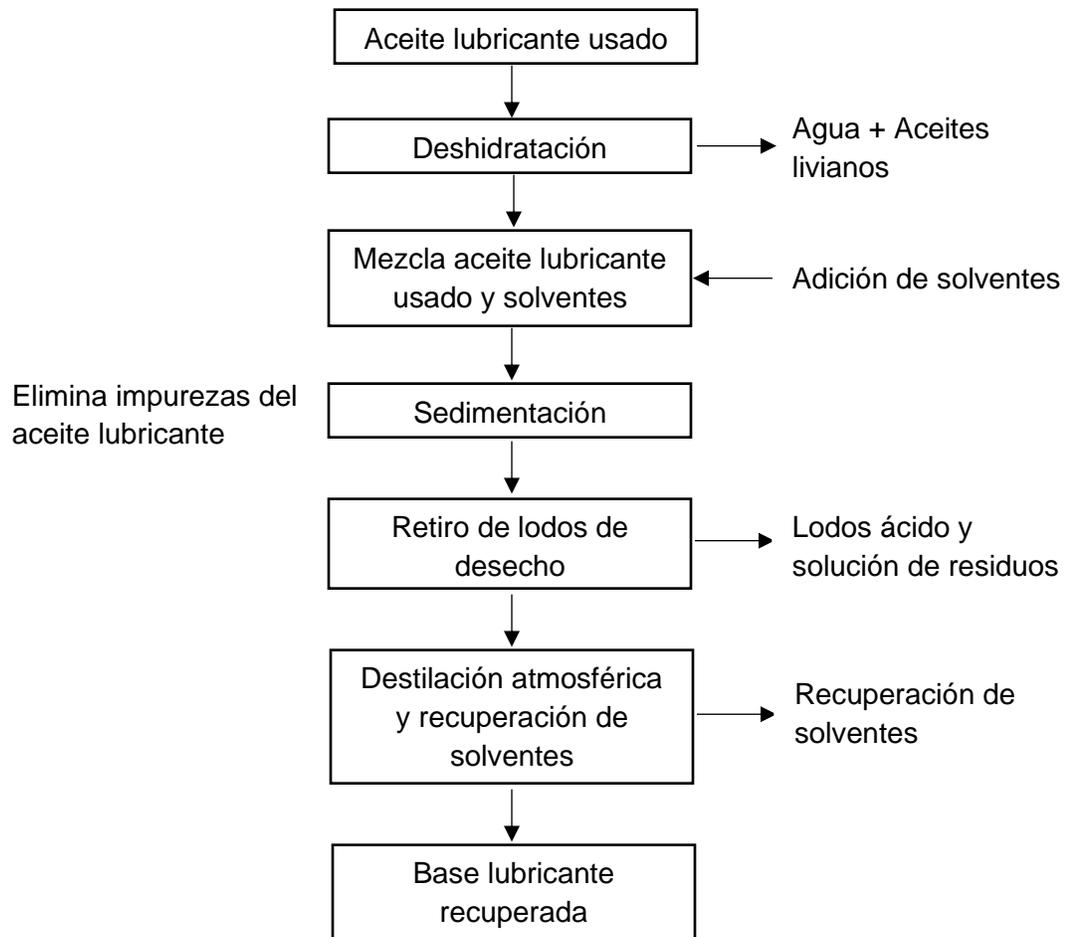
Este método se utiliza para separar el aceite y las impurezas a través de una destilación flash o destilación de película fina y purificarla con arcilla (Ver Fig. 5). En comparación con TFE + hidroacabado, la única diferencia es que la arcilla se utiliza para la absorción en lugar del hidroacabado.

---

<sup>25</sup> KALNES, T., et al. Treatment and recycling of waste lubricants. A petroleum refinery integration study. En AICHE National Meeting, San Diego, CA. 1990. 19-22p.

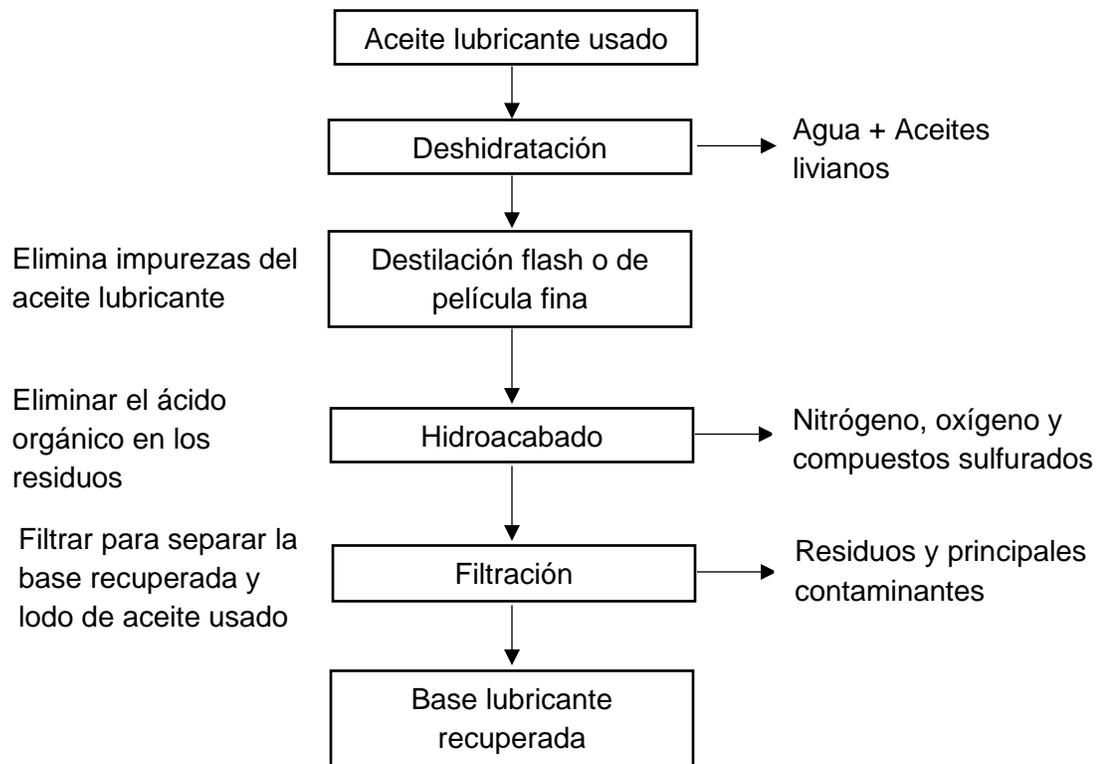
<sup>26</sup> HSU, Yu Lung; LEE, Cheng Haw; KRENG, Victor B. Analysis and comparison of regenerative technologies of waste lubricant. WSEAS Transactions on Environment and Development, vol. 5, no 3. 2009. 295-309p.

Figura 3. Diagrama esquemático del proceso de extracción con solventes



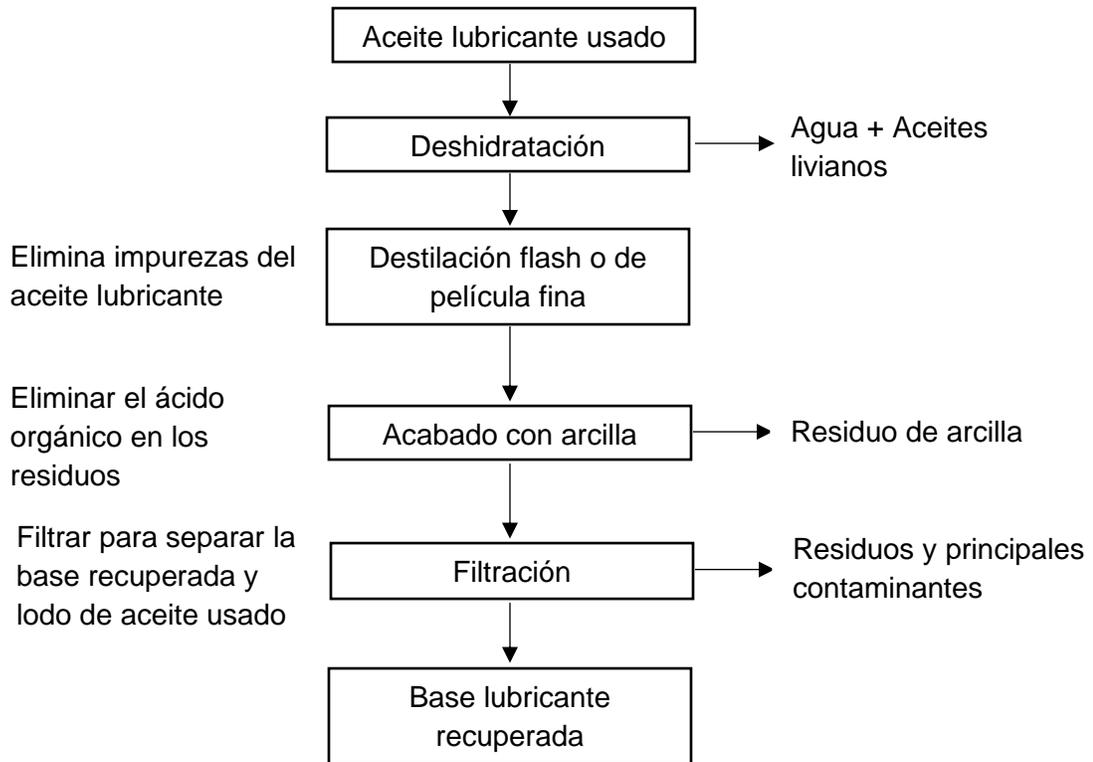
**Fuente:** HSU, Yu Lung; LEE, Cheng Haw; KRENG, Victor B. Analysis and comparison of regenerative technologies of waste lubricant. WSEAS Transactions on Environment and Development, vol. 5, no 3. 2009. 305p.

**Figura 4.** Diagrama esquemático del proceso TFE con hidroacabado



Fuente. HSU, Yu Lung; LEE, Cheng Haw; KRENG, Victor B. Analysis and comparison of regenerative technologies of waste lubricant. WSEAS Transactions on Environment and Development, vol. 5, no 3. 2009. 306p.

Figura 5. Diagrama esquemático del proceso TFE con acabado con arcilla

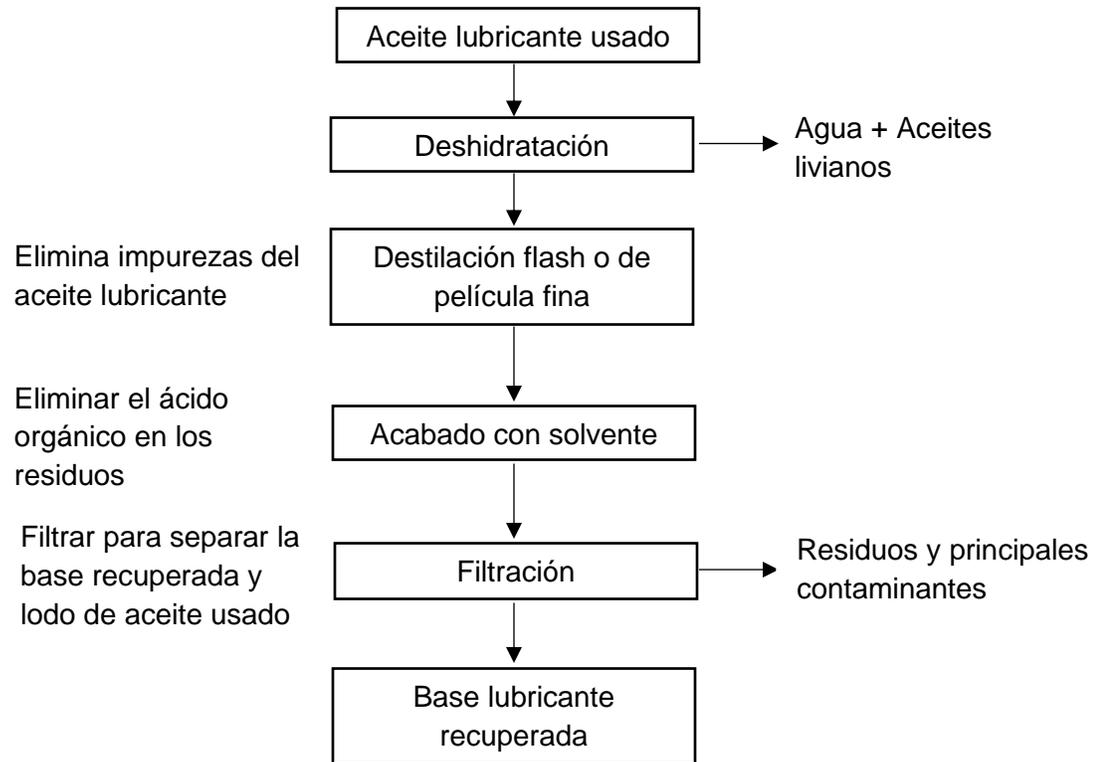


**Fuente:** HSU, Yu Lung; LEE, Cheng Haw; KRENG, Victor B. Analysis and comparison of regenerative technologies of waste lubricant. WSEAS Transactions on Environment and Development, vol. 5, no 3. 2009. 306p.

### 2.3.6 TFE + acabado solvente

Este método se utiliza para separar el aceite y las impurezas a través de una destilación flash o destilación de película fina y aplicar el solvente al acabado, con un proceso de flujo similar al TFE + hidroacabado.

**Figura 6.** Diagrama esquemático del proceso TFE con acabado con solvente

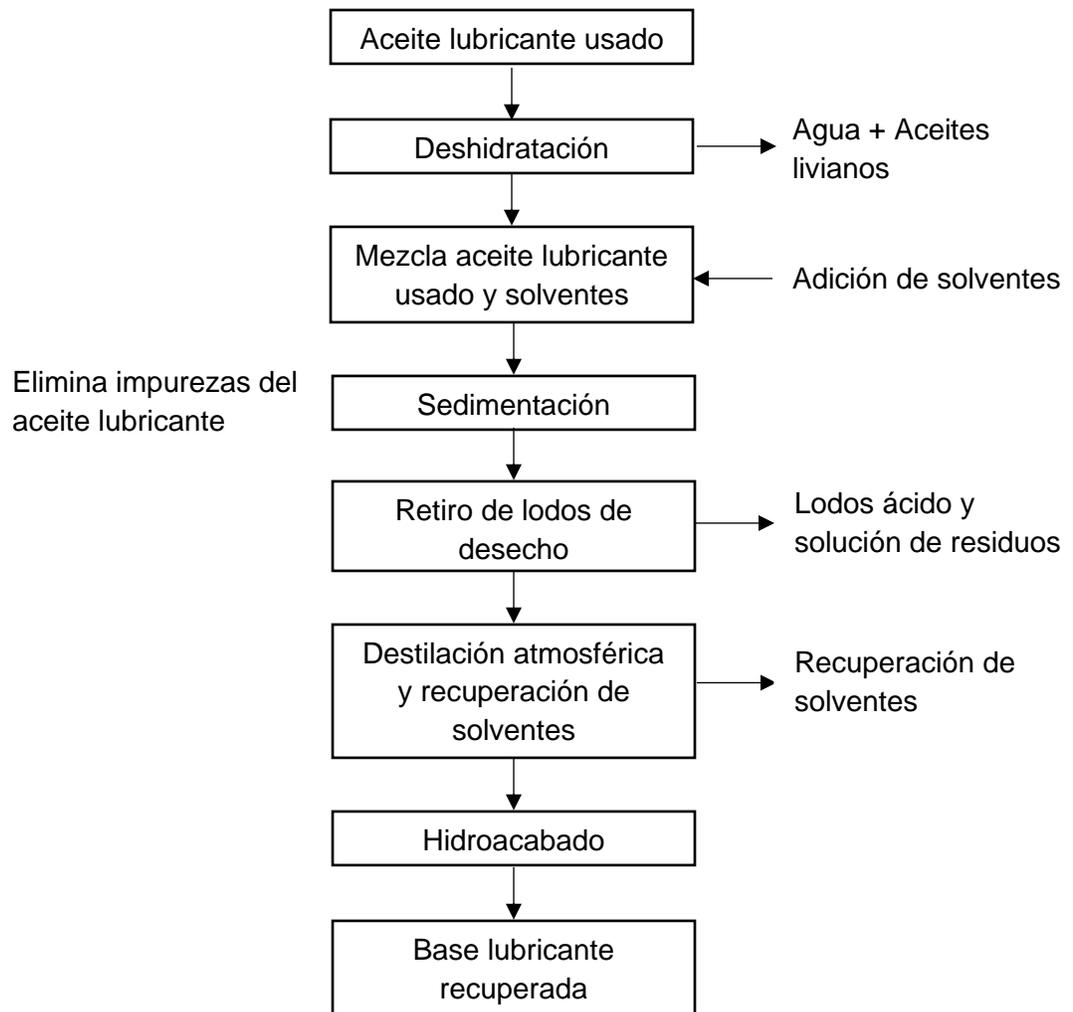


**Fuente:** HSU, Yu Lung; LEE, Cheng Haw; KRENG, Victor B. Analysis and comparison of regenerative technologies of waste lubricant. WSEAS Transactions on Environment and Development, vol. 5, no 3. 2009. 307p.

### 2.3.7 Extracción con solventes con hidroacabado

Este método combina la extracción con solventes y el hidroacabado al eliminar las impurezas con solventes y luego mejorar la calidad del aceite mediante el hidroacabado. En primer lugar, se elimina la humedad y el aceite usado se separa mediante extracción con propano. Luego, la mezcla de propano y aceite usado se somete a un hidroacabado para eliminar el azufre, el nitrógeno y el oxígeno con fines de purificación.

**Figura 7.** Diagrama esquemático del proceso de extracción con solventes con hidroacabado



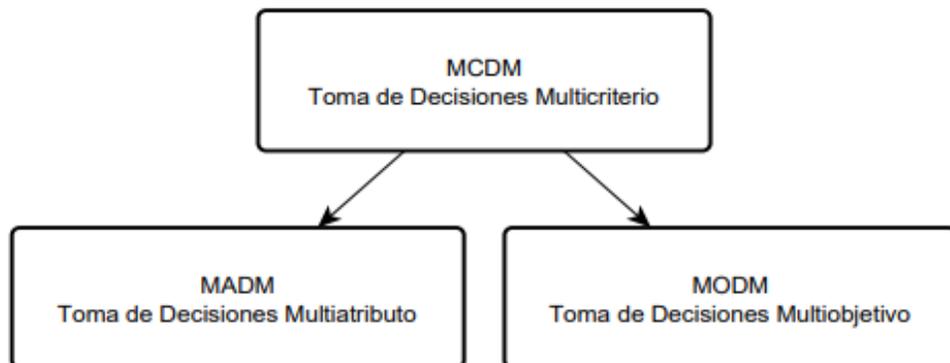
**Fuente:** HSU, Yu Lung; LEE, Cheng Haw; KRENG, Victor B. Analysis and comparison of regenerative technologies of waste lubricant. WSEAS Transactions on Environment and Development, vol. 5, no 3. 2009. 308p.

## 2.4 METODOS DE DECISIÓN MULTICRITERIO<sup>27</sup>

Los métodos de decisión multicriterio (MCDM) empezaron a experimentar un desarrollo importante desde la segunda mitad de la década de 1970, hasta convertirse en una herramienta científica que se utilizan para evaluar problemas y abordar el proceso de tomar decisiones con múltiples criterios.

Según Kahraman<sup>28</sup>, hay dos aproximaciones básicas a los problemas de MCDM: Toma de Decisiones de Múltiples Atributos (MADM) y Toma de Decisiones de Múltiples Objetivos.

Figura 8. Métodos Multicriterio



**Fuente:** C. Kahraman, Fuzzy Multi Criteria Decision Making\_Theory and Applications with Recent Developments, 2008. 12p.

Los problemas de MADM involucran el diseño de la mejor alternativa considerando las ventajas y desventajas de un conjunto de restricciones de diseño que interactúan entre sí. La MADM se aplica a la toma de decisiones en presencia de múltiples

<sup>27</sup> AFSORDEGAN, Arayeh. A contribution to multi-criteria decision making in sustainable energy management based on fuzzy and qualitative reasoning. Tesis Doctoral programa Ingeniería de sistemas y proyectos. Barcelona. Universitat Politècnica de Catalunya. 2015. 22p.

<sup>28</sup> C. Kahraman, de Fuzzy Multi Criteria Decision Making\_Theory and Applications with Recent Developments, Springer, 2008, pp. 1-588.

alternativas, por lo general en conflicto, las cuales están descritas mediante sus atributos. Se asume que los problemas de MADM tienen un número predeterminado y limitado de alternativas de decisión. Resolver un problema de MADM involucra la clasificación y la valoración.

Por otra parte, los problemas de MODM son aquellos en los que el número de alternativas es infinito, de manera que las ventajas y desventajas entre los criterios de diseño están descritas típicamente mediante funciones continuas. Contrario a la MADM, las alternativas de decisión en un problema de MODM no están dadas. En su lugar, MODM provee un marco de referencia matemático para diseñar un conjunto de alternativas de decisión. Cada alternativa, una vez identificada, es juzgada en función de que tan cerca satisface un objetivo o múltiples objetivos. En MODM el número de alternativas potenciales de decisión puede ser grande<sup>29</sup>.

Los problemas de MCDM suelen ser complejos, y se caracterizan porque diversos criterios contradictorios y las interacciones entre ellos deben modelarse explícitamente para comprender el problema o proporcionar una solución. Los MCDM como un campo multidisciplinario de investigación de operaciones, utiliza enfoques matemáticos que implican los siguientes pasos;

- Estructuración de procesos de decisión.
- Definir y seleccionar alternativas.
- Determinación de criterios y pesos.
- Aplicar juicios de valor y evaluar los resultados para tomar decisiones en el diseño o la selección de alternativas con respecto a múltiples criterios conflictivos.

---

<sup>29</sup> VALERO, Magda Liliana. Selección de tecnologías para el tratamiento de las aguas de producción de shale gas utilizando una técnica de decisión multicriterio. Trabajo de grado Magister en Ingeniería Ambiental. Bucaramanga. Universidad Industrial de Santander. Facultad de Ingenierías Físicoquímicas. Escuela de Ingeniería Química. 2013. 84p

En los MCDM, se distinguen tres tipos de problemas: elección, clasificación y ordenación. El objetivo del tomador de decisiones (DM) en cada tipo de problema es diferente:

- En los problemas de elección, el objetivo es ayudar al tomador de decisiones mediante la elección del subconjunto la "mejor" solución o alternativa. El resultado final es un procedimiento de elección o selección.
- El objetivo de clasificar los problemas es ayudar al tomador de decisiones a simplificar las acciones "más atractivas" en clases equivalentes. La clasificación consiste en ordenar un conjunto de soluciones
- En los problemas de ordenación se desea saber qué alternativas pertenecen a cada clase de un conjunto predefinido de clases ordenadas. Los responsables de la toma de decisiones asignan cada acción a una categoría.

El proceso de decisión multicriterio se muestra en la figura 9, el cual incluye definir el problema como un objetivo, definir alternativas, desarrollar criterios, seleccionar indicadores y asignar pesos, construir una matriz de evaluación, aplicando el método apropiado para evaluar alternativas, y finalmente, seleccionar alternativas de acuerdo con los tipos de problemas. Después las alternativas seleccionadas pueden ser implementadas y evaluadas en una aplicación particular

Para comprender como se lleva a cabo un proceso de este tipo, se deben definir algunos conceptos básicos en la literatura de los métodos de decisión multicriterio. A continuación, se describen los más importantes relacionados en este trabajo de grado.

- **Alternativas:** También conocidas como acciones, opciones, estrategias o planes, son las posibles soluciones o un conjunto de posibles acciones para el

problema de decisión. Se representan como  $A = \{a_1, a_2, \dots, a_m\}$ ,  $A$  es el conjunto finito de alternativas y  $m$  el número de alternativas en  $A$ . A menudo ninguna de las alternativas se ajusta perfectamente a los objetivos. La alternativa que mejor se adapta a los objetivos se puede seleccionar evaluando las diferentes alternativas en función de un conjunto de criterios.

- **Criterios:** También llamados atributos o factores claves, que se medirán para cada alternativa a fin de encontrar la solución. Los criterios son las herramientas para definir el atractivo de una alternativa. Por ejemplo, permiten comparar alternativas en términos de idoneidad en función de las necesidades de los decisores. Cada criterio corresponde a un punto de vista considerado en el proceso de decisión. Los criterios se presentan como:  $C = \{c_1, c_2, \dots, c_n\}$ ,  $C$  es el conjunto finito de criterios y  $n$  es el número de criterios en  $C$ . Cada  $c_j(a)$  representa el valor de rendimiento de la alternativa  $a \in A$  en criterio  $c_j \in C$ , en donde  $j \in \{1, 2, 3, n\}$ . Este valor de rendimiento puede ser en una escala ordinal que se representa en una escala numérica o verbal (lingüística) o en una escala cuantitativa. El orden de los valores no solo se da, sino que también hay una cantidad claramente definida de manera que da una medida de la brecha entre dos actuaciones.
- **Pesos:** Determinan la importancia relativa de cada uno de los criterios con respecto al total y, de esta manera, realizar una ponderación de acuerdo al método empleado. Si bien algunas de las metodologías podrían no requerir ponderación de criterios (de hecho, algunas no requieren selección de criterios), en la mayoría de los casos es necesario hacerlo y se convierte en un proceso de gran importancia, pues independientemente del método de selección, la ponderación de los criterios indiscutiblemente puede llegar a cambiar la escogencia, por su influencia directa sobre el resultado final. Los pesos son representados como  $W = \{w_1, w_2, \dots, w_n\}$  donde  $W$  es el conjunto finito de pesos.

El rendimiento de la matriz M es construida por A x C, donde  $c_j(a)$  es el rendimiento en la fila a y columna j

$$M = \left( \begin{array}{c|cccc} & c_1 & c_2 & c_3 & \dots & c_n \\ & w_1 & w_2 & w_3 & \dots & w_n \\ \hline a_1 & a_{11} & a_{12} & a_{13} & \dots & a_{1n} \\ a_2 & a_{21} & a_{22} & a_{23} & \dots & a_{2n} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ a_m & a_{m1} & a_{m2} & a_{m3} & \dots & a_{mn} \end{array} \right)$$

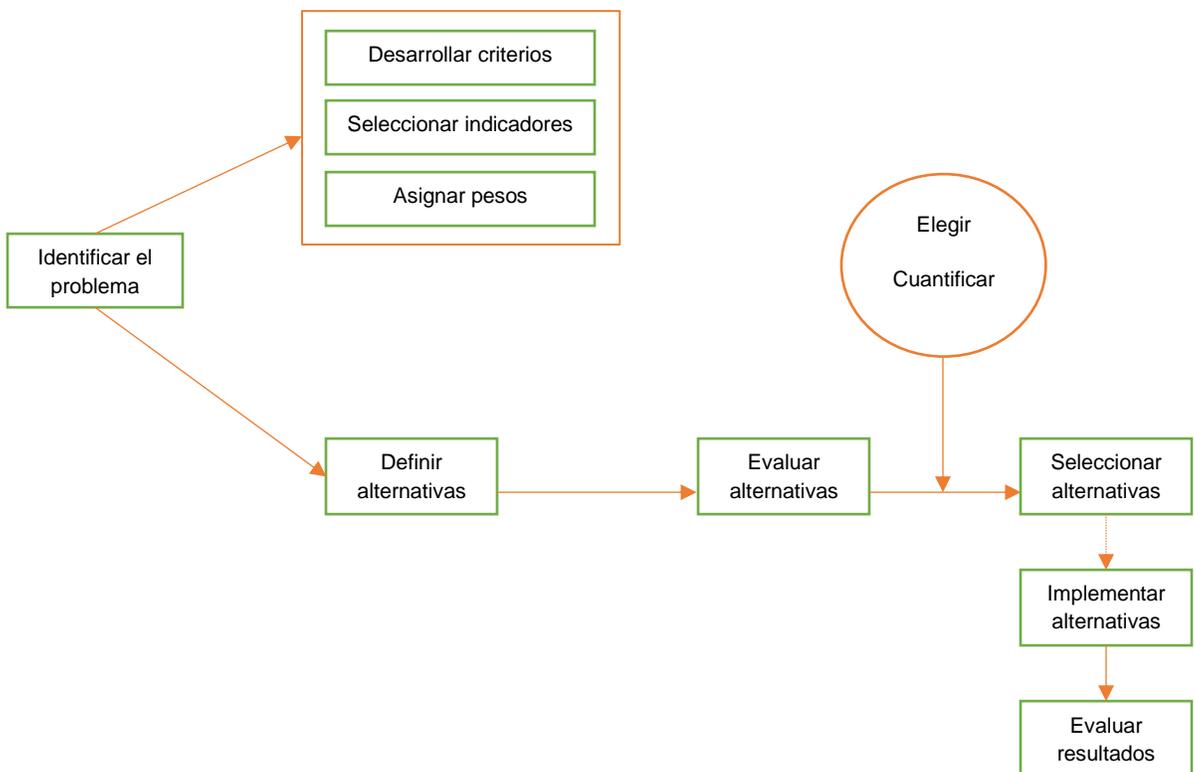
- **Decisor:** Es la persona o grupo de personas encargados de tomar una decisión, según sus propias preferencias expresadas con respecto a los objetivos a alcanzar y sopesando la importancia relativa de cada criterio.
- **Incertidumbre:** Los problemas de decisión a menudo implican un elemento de incertidumbre. Esto podría afectar una situación problemática de MCDM. Se puede referir al hecho de que los criterios, las preferencias o la compensación no se pueden medir ni cuantificar con exactitud. Por lo tanto, este tipo de incertidumbre tiene un impacto en términos de las mediciones utilizadas.

Dado que los criterios que miden las alternativas a menudo entran en conflicto entre sí, es necesario determinar una compensación entre ellos. Es importante que estas compensaciones se cuantifiquen correctamente para corresponder a las preferencias del responsable de la toma de decisiones.

- **Métodos compensatorios:** estos métodos permiten la compensación entre los criterios, de modo que una mejora en un criterio puede contrarrestarse con una disminución del rendimiento en otro criterio.

- **Métodos no compensatorios:** en estos métodos no se permite ninguna compensación entre los criterios, por ejemplo, cuando el responsable de la toma de decisiones indica que los criterios son tan importantes que no puede considerarse el equilibrio entre ellos.
- **Métodos parcialmente compensatorios:** se puede aceptar alguna forma de compensación entre los criterios, y el principal problema es evaluar el grado de compensación entre los criterios.

**Figura 9.** Proceso de decisión multicriterio



Fuente: AFSORDEGAN, Arayeh. Contribution to multicriteria decision making in sustainable energy management based on Fuzzy and qualitative reasoning. Tesis Doctoral, Barcelona. Universitat Politècnica de Catalunya, 2015. p. 27

### 2.4.1 Clasificación métodos de decisión multicriterio.

Los MDMC se pueden clasificar en dos categorías principales: toma de decisiones de múltiples atributos (Por sus siglas en ingles MADM) y toma de decisiones multiobjetivo (Por sus siglas en ingles MODM). La principal distinción entre los dos grupos de métodos se basa en la determinación de alternativas. En la toma de decisiones multiobjetivo, las alternativas no están predeterminadas, sino que se optimiza un conjunto de funciones objetivas sujetas a un conjunto de restricciones. Se busca la solución más satisfactoria y eficiente. En la toma de decisiones de atributos múltiples, se debe evaluar un número de alternativas frente a un conjunto de atributos que a menudo son difíciles de cuantificar. La mejor alternativa generalmente se selecciona haciendo comparaciones entre alternativas con respecto a cada atributo<sup>30</sup>. A continuación, la tabla muestra la comparación entre lo MADM y MOD

**Tabla 3.** Comparación MADM y MODM

| <b>Descripción</b>        | <b>MADM</b>    | <b>MODM</b>         |
|---------------------------|----------------|---------------------|
| Criterio                  | Atributos      | Objetivos           |
| Objetivo                  | Claro          | No claro            |
| Atributo                  | Claro          | Implícito           |
| Limitaciones              | No claras      | Claras              |
| Opciones                  | Finitas/Claras | Infinita/ No claras |
| Interacción con decisores | Baja           | Alta                |

**Fuente:** MELO CARLOS, Zulma Lizeth. Contribución de un modelo de decisión multicriterio para la selección del método de levantamiento artificial óptimo para un campo de estudio. Trabajo de grado

<sup>30</sup> POHEKAR, Sanjay D.; RAMACHANDRAN, Muthu. Application of multi-criteria decision making to sustainable energy planning—A review. Renewable and sustainable energy reviews, vol. 8, no 4. 2004. 365-381p.

Magister en Ingenierías de Petróleos y Gas. Bucaramanga. Universidad Industrial de Santander. Facultad de ingenierías Físicoquímicas. Escuela de Ingeniería de Petróleos. 2020. 37p.

Con el objetivo de evaluar los procesos utilizados actualmente a nivel industrial en el tratamiento de aceites lubricantes usados, los cuales son descritos según una serie de criterios o atributos y de esta manera, seleccionar el proceso más óptimo, utilizaremos el método de toma de decisiones de múltiples atributos (MADM).

En los problemas de clasificación, los decisores desean encontrar una estructura de orden de alternativas que depende de la importancia de cada criterio y la realización de alternativas en criterios particulares.

En muchos casos, estos procesos de decisión se basan en datos e información, que no están libres de subjetividad e imprecisión y deben gestionar la incertidumbre. La selección de las alternativas más adecuadas a partir de las obtenidas o consideradas, se pueden enfrentar como un problema de MCDM, en el que cada alternativa se evalúa de acuerdo con un conjunto de criterios<sup>31</sup>.

En general, existen dos entidades principales de investigación en donde los MDMC fueron inicialmente desarrollados, la escuela americana, la cual es más descriptiva a los métodos MAUT, AHP, y TOPSIS y la escuela francesa, que ha desarrollado métodos más constructivistas como ELECTRE y PROMETHEE.

Los modelos MCDM (Multi Criteria Decision Making) permiten la toma de decisiones en presencia de múltiples criterios, normalmente opuestos. Las complicaciones de los MCDM se pueden clasificar en general en dos clases: toma de decisiones de atributos múltiples (MADM) y toma de decisiones objetivas múltiples (MODM), dependiendo de si el problema es de selección o diseño<sup>32</sup>.

---

<sup>31</sup> MELO CARLOS, Zulma Lizeth. Contribución de un modelo de decisión multicriterio para la selección del método de levantamiento artificial óptimo para un campo de estudio. Trabajo de grado Magister en Ingenierías de Petróleos y Gas. Bucaramanga. Universidad Industrial de Santander. Facultad de ingenierías Físicoquímicas. Escuela de Ingeniería de Petróleos. 2020. 38p

<sup>32</sup> FATAHI, Ehsan. Selection of the Best Artificial Lift Method in One of the Iranian Oil Field by the Employment of ELECTRE Model. En: British Journal of Applied Science and Technology, enero-marzo, vol. 1 no.4. 2011.172–180p.

Algunos métodos son; SAW (Simple Additive Weighting), TOPSIS (Technique for Order Preference by Similarity to Ideal Solution), ELECTRE (Elimination Et Choix Traduisant la Réalité), WPM (Weighted Product Model), AHP (Analytic Hierarchy Process).

## **2.5 ANALISIS DEL CICLO DE VIDA**

La creciente conciencia con respecto a la importancia de la protección ambiental, y los posibles impactos asociados con los productos, tanto manufacturados como consumidos, han aumentado el interés por el desarrollo de métodos para comprender mejor y tratar esos impactos. Una de las técnicas desarrolladas en este sentido es el análisis del ciclo de vida (ACV)<sup>33</sup>.

El análisis del ciclo de vida, ACV (LCA por sus siglas en inglés), estudia los aspectos ambientales y los impactos potenciales a lo largo del ciclo de vida de un producto o de una actividad.

El ciclo de vida de un producto considera toda la "historia" del producto, desde su origen como materia prima hasta su final como residuo. Se tienen en cuenta todas las fases intermedias, tales como, transporte y preparación de materias primas, manufactura, transporte a mercados, distribución, uso, etc.

Un ACV es un proceso objetivo, que permite evaluar las cargas ambientales asociadas a un producto, proceso o actividad. Trata los aspectos e impactos ambientales potenciales (por ejemplo, la utilización de recursos y las consecuencias ambientales de las emisiones y vertidos) a lo largo de todo el ciclo de vida de un

---

<sup>33</sup> INSTITUTO COLOMBIANO DE NORMAS TÉCNICAS Y CERTIFICACIÓN. Gestión ambiental. análisis de ciclo de vida. principios y marco de referencia, NTC-ISO 14040. Bogotá D.C.: El Instituto. 2007. 9 p

producto, desde la adquisición de la materia prima, pasando por la producción, utilización, tratamiento final, reciclado, hasta su disposición final (es decir, de la cuna a la tumba).

Por tanto, el análisis del ciclo de vida (ACV) de un producto, es una metodología que incluye el estudio y la cuantificación de los impactos ambientales asociados a la vida de un producto, proceso o actividad desde “la cuna a la tumba”, esto es, el conjunto de las siguientes etapas: adquisición de materias primas, fabricación, distribución, uso y fin de vida útil

El ACV puede ayudar a:

- La identificación de oportunidades para mejorar el desempeño ambiental de productos en las distintas etapas de su ciclo de vida.
- La aportación de información a quienes toman decisiones en la industria, organizaciones gubernamentales o no gubernamentales (por ejemplo, para la planificación estratégica, el establecimiento de prioridades, el diseño y rediseño de productos o procesos).
- La selección de los indicadores de desempeño ambiental pertinentes, incluyendo técnicas de medición.
- El marketing (por ejemplo, implementando un esquema de etiquetado ambiental, elaborando una reivindicación ambiental, o de una declaración ambiental de producto)<sup>34</sup>.

El enfoque principal de esta herramienta es rediseñar todos los procesos que conlleva el producto, teniendo en cuenta que los recursos energéticos naturales y las materias primas no son limitadas, ya que generalmente se consumen más rápido de

---

<sup>34</sup> INSTITUTO COLOMBIANO DE NORMAS TÉCNICAS Y CERTIFICACIÓN. Gestión ambiental. Análisis de ciclo de vida. principios y marco de referencia, NTC-ISO 14040. Bogotá D.C.: El Instituto. 2007. 9p

cómo se reemplazan o se buscan alternativas. Por otra parte, se plantea también el manejo de recursos de una forma sustentable para conllevar a la reducción de su uso y minimizar sus impactos generados.

El (ACV) permite comparar entre procesos de un mismo producto o entre productos de diferentes materiales, por lo que dicha información tiene aplicación directa en el diseño y desarrollo de los productos, la mejora continua de los procesos, la planificación estratégica, el marketing verde, así como en el desarrollo de políticas públicas.<sup>35</sup>.

El análisis de ciclo de vida se estandariza mediante la norma ISO 14040 en la misma se especifican los usos y aplicaciones del ACV:

- Identificación de oportunidades de mejora de los aspectos medioambientales de los productos en todas las etapas de su ciclo de vida.
- Toma de decisiones relacionadas con la planificación estratégica, establecimiento de prioridades, diseño o rediseño de productos o de procesos.
- Selección e indicadores de comportamiento ambiental relevantes, incluyendo técnicas de medición.
- Eco marketing de los bienes y servicios ofertados.

Si bien todos los ACV deben cubrir las mismas etapas, el nivel de detalle no es el mismo en todos ellos, ya que depende del objetivo a cubrir. Ello da lugar a la diferenciación de tres tipos de ACV<sup>36</sup>:

---

<sup>35</sup> Geo Innova [Sitio web]. Navarra: Geo Innova, Análisis del Ciclo de Vida: ISO 14040 [Consulta: 10 de junio de 2022]. Disponible en: <https://cutt.ly/tKtDyKtM>

<sup>36</sup> Haya, E. Análisis de Ciclo de Vida Madrid. Master en Ingeniería y Gestión Medioambiental. Madrid. Escuela de Organización Industrial. 2016. 4p.

- **ACV conceptual:** Es el ACV más sencillo. Se trata de un estudio básicamente cualitativo, cuya finalidad principal es la identificación de los potenciales impactos que son más significativos. Los datos que se utilizan son cualitativos y muy generales.
- **ACV simplificado:** Es el segundo en escala de complejidad. Consiste en aplicar la metodología del ACV para llevar a cabo un análisis selectivo (tomando sólo en consideración datos genéricos y abarcando el Ciclo de Vida de forma superficial), seguido de una simplificación (centrándose en las etapas más importantes) y un análisis de la fiabilidad de los resultados.
- **ACV completo:** Es el nivel más complejo. Consiste en realizar un análisis en detalle, tanto del inventario como de los impactos, de forma cualitativa y cuantitativa.

### 2.5.1 Ciclo de vida de un producto<sup>37</sup>

Para lograr identificar el alcance que tiene la herramienta del ACV es necesario identificar cuáles son los aspectos que involucra un producto.

La vida de un producto empieza en el diseño, desarrollo del producto y finaliza en las actividades reutilización y reciclaje a través de las siguientes etapas:

- **Adquisición de materias primas:** Todas las actividades necesarias para la extracción de las materias primas y las aportaciones de energía del medio ambiente, incluyendo el transporte previo a la producción.

---

<sup>37</sup>CARRILLO, Mary Itzel. Análisis del Ciclo de Vida: Herramienta de Gestión Ambiental. Tesis Maestría en Ingeniería Administrativa. Orizaba. Instituto Tecnológico de Orizaba. 2018. 6p.

- **Proceso y fabricación:** Actividades necesarias para convertir las materias primas y energía en el producto deseado. En la práctica esta etapa se compone de una serie de subetapas con productos intermedios que se forman a lo largo de la cadena del proceso.
- **Distribución y transporte:** Traslado del producto final al cliente.
- **Uso, reutilización y mantenimiento:** Utilización del producto acabado a lo largo de su vida en servicio.
- **Reciclaje:** Comienza una vez que el producto ha servido para su función inicial y consecuentemente se recicla a través del mismo sistema de producto (ciclo cerrado de reciclaje) o entra en un nuevo sistema de producto (ciclo de reciclaje abierto).
- **Gestión de los residuos:** Comienza una vez que el producto ha servido a su función y se devuelve al medio ambiente como residuo

Dentro del concepto de ACV podemos distinguir diferentes tipos, que en general, pueden clasificarse en tres<sup>38</sup>:

#### a. De la cuna a la tumba (Cradle to Grave)

Este tipo de ACV considera todas las entradas y salidas del producto a lo largo de su ciclo de vida completo:

- **Materias primas:** Incluye la extracción, manufactura y transporte de estas.
- **Fabricación:** Actividades necesarias para convertir la materia prima en el producto de análisis.

---

<sup>38</sup> TWENERGY. [Sitio web]. Ciclo de vida de producto. Bogotá: DANE. [Consulta: 30 de Julio 2022] Disponible en: <https://cutt.ly/yCQFZAD>

- **Distribución:** Engloba el transporte del producto hasta que llega al cliente final.
- **Uso del consumidor:** Utilización del producto acabado.
- **Deposición:** El producto se “devuelve” al medio ambiente como residuo.

#### **b. De la cuna a la puerta (Cradle to Gate)**

Este tipo de ACV es un análisis intermedio del ciclo de vida del producto, ya que solo considera las entradas y salidas desde materias primas hasta distribución (básicamente el proceso de producción). Es decir, no considera los impactos del uso y deposición.

#### **c. De la cuna a la cuna (Cradle to Cradle)**

Este tipo de ACV incluye el concepto de que el final de vida de un producto no está en la deposición, sino que del “residuo” se pueden obtener nuevas materias primas que permiten volver a iniciar el ciclo de vida de producto.

Este tipo de análisis permiten identificar los principales impactos ambientales asociados al producto y aplicar acciones sobre ellos de manera que el producto tenga menor efecto sobre el medio natural.

**Figura 10.** Ciclo de vida del producto



Fuente. Geo Innova [Sitio web]. Navarra: Geo Innova, Análisis del Ciclo de Vida: ISO 14040 [Consulta: 10 de junio de 2022]. Disponible en: <https://cutt.ly/tKtDyKM>

## 2.5.2 Metodología del Análisis del Ciclo de Vida<sup>39</sup>

La metodología consta de una serie de fases interrelacionadas, que siguen una secuencia. De acuerdo con el ISO 14040 el ACV consta de cuatro fases:

<sup>39</sup>CARRILLO, Mary Itzel. Análisis del Ciclo de Vida: Herramienta de Gestión Ambiental. Tesis Maestría en Ingeniería Administrativa. Orizaba. Instituto Tecnológico de Orizaba. 2018. 6p

### **2.5.2.1 Definición de objetivos y alcances:**

En esta primera fase se define el tema de estudio y se incluyen los motivos por los cuales se va a implementar, además se establecerá la unidad funcional la cual describe la función principal del sistema analizado. Un ACV no sirve para comparar productos en sí, sino servicios y/o cantidades de producto que lleven a cabo la misma función.

#### **2.5.2.1.1 Definición del objetivo:**

Esta parte del análisis debe ser clara y coherente con la aplicación que se va a dar al estudio, la cual debe incluir:

- Identificación del receptor y del realizador del estudio
- Razones para realizar el estudio y el tipo de información que se espera obtener de él.
- Aplicación prevista del estudio y uso que va a hacerse con los resultados  
Destinatario previsto del estudio (es decir, si será un informe interno, si se hará público y a quién)
- Si procede, el uso del ACV en aseveraciones comparativas

#### **2.5.2.1.2 Definición del alcance del ACV**

En los alcances se debe reflejar claramente la extensión del estudio lo cual implica, de acuerdo con la norma ISO 14040, la consideración y descripción de los siguientes puntos:

- Sistema del producto a estudiar.
- Funciones del sistema del producto.
- Selección de la unidad funcional.
- Establecimiento de los límites del sistema.

- Establecimiento de las reglas de asignación de cargas ambientales, tipos de impacto a evaluar, metodología de evaluación e interpretación.
- Tipos y fuentes de datos: requisitos que deben cumplir los datos del inventario.
- Requisitos de calidad de los datos.

### **2.5.2.1.3 Límites del sistema en ACV**

Debido a la complejidad de este sistema puede resultar demasiado extenso, por lo cual se deben establecer límites que deberán de ser perfectamente identificados, estos determinan qué procesos unitarios deberán incluirse dentro del ACV, en los límites del sistema generalmente se incluyen:

- La secuencia de producción principal, es decir, desde la extracción de materias primas hasta la eliminación final del producto.
- Operaciones de transporte.
- Producción y uso de combustibles.
- Generación de energía, es decir, electricidad y calor (incluyendo producción de combustible).
- Eliminación de todos los residuos del proceso.
- Fabricación del embalaje de transporte.

En los límites del sistema generalmente se excluyen:

- Fabricación y mantenimiento de equipos de producción.
- Mantenimiento de plantas de fabricación, es decir, calefacción e iluminación.
- Factores comunes a cada uno de los productos o procesos en estudio.

### **2.5.2.2** Inventario del Ciclo de Vida (ICV):

El segundo paso a seguir para la elaboración del ACV es la cuantificación de las entradas y salidas de materia y energía correspondiente al sistema producto durante su ciclo de vida.

Esta fase comprende la obtención de datos y los procedimientos de cálculo para identificar y cuantificar todos los efectos ambientales adversos asociados a la unidad funcional.

De una forma genérica se denomina estos efectos ambientales como carga ambiental. Ésta se define como la salida o entrada de materia o energía de un sistema causando 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, entre otros. 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.

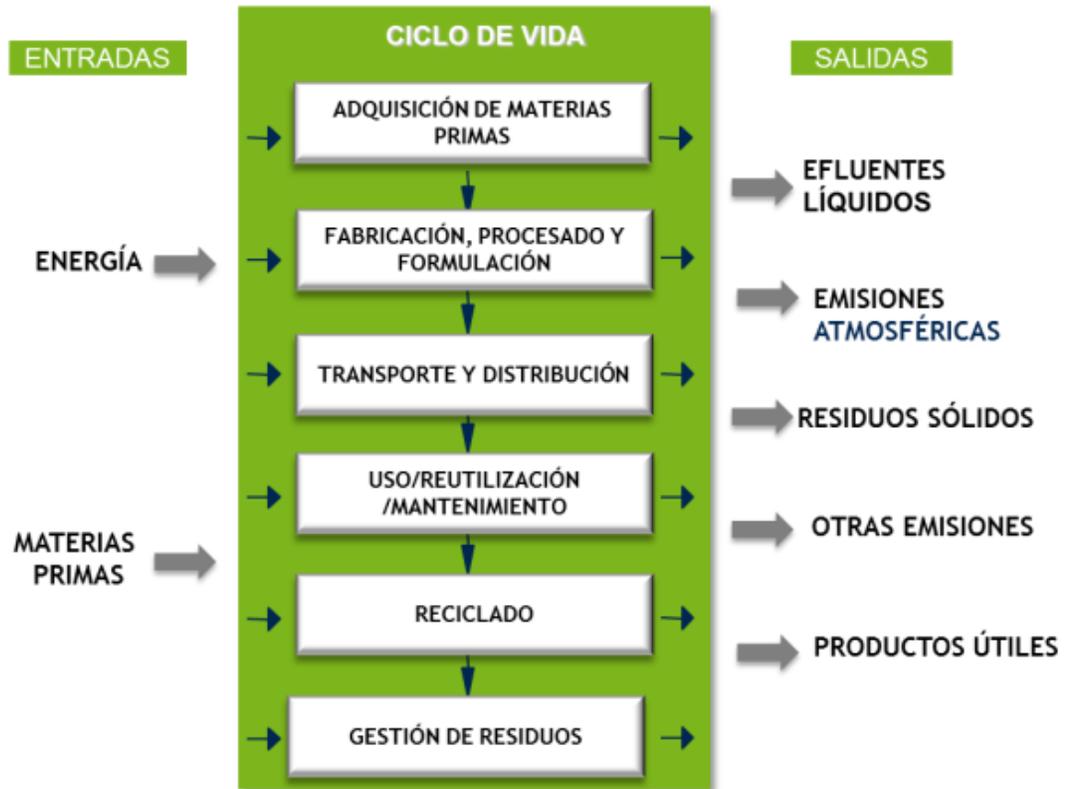
Durante esta etapa se identifican y cuantifican todas las entradas (consumo de recursos y materiales) y salidas (emisiones al aire, suelo, aguas y generación de residuos) que pueden causar un impacto durante el ciclo de vida de un producto. Los datos obtenidos en esta fase son el punto de partida para la evaluación de impactos del ciclo de vida.

Para complementar el estudio de esta fase se debe considerar también que el inventario debe dar una visión global del producto/proceso al que corresponde, además de datos cuantificados debe de constar de:

- Diagramas de flujo que dejen claro el sistema en estudio, así como las relaciones que tienen lugar dentro del mismo.
- Descripción detallada de cada unidad de proceso, listando la categoría de los datos asociados con cada una de ellas.
- Desarrollo de una lista donde se especifiquen las unidades de medida de cada parámetro.
- Descripción de los métodos empleados para recoger los datos y de las técnicas de cálculo empleadas para cada categoría de datos.
- Instrucciones informando claramente de fuentes documentales para casos especiales, irregularidades, o cualquier otra circunstancia asociada con la recogida de datos.
- Se deben documentar todos los procedimientos de cálculo, que deben ser coherentes a lo largo de todo el estudio, y explicar las suposiciones realizadas.

Es necesario validar los datos recopilados. La validación puede implicar, por ejemplo, realizar balances de materia, balances de energía y/o análisis comparativos de los factores de emisión y vertido

**Figura 11.** Ejemplo de entradas y salidas en el ciclo de vida



**Fuente:** Haya, E. Análisis de Ciclo de Vida Madrid. Master en Ingeniería y Gestión Medioambiental. Madrid. Escuela de Organización Industrial. 2016. 22p.

### 2.5.2.2.1 Asignación de cargas ambientales, tipo de impacto a evaluar y metodología de evaluación e interpretación<sup>40</sup>

Se deben indicar qué categorías de impacto se incluyen en el estudio de ACV, cómo se asignan los datos del inventario a cada impacto, cuáles son los indicadores de categoría y modelos de caracterización que se incluyen en el estudio de ACV.

<sup>40</sup> Haya, E. Análisis de Ciclo de Vida Madrid. Master en Ingeniería y Gestión Medioambiental. Madrid. Escuela de Organización Industrial. 2016. 23p.

Existen diferentes metodologías para la evaluación del impacto del ciclo de vida y para su interpretación. Cabe mencionar entre otras:

- **CML2016**, desarrollada por el Centro de Ciencias Ambientales de la Universidad de Leiden, Holanda. Han publicado una guía de aplicación de los estándares ISO en la que se establecen categorías de impacto y la correspondiente metodología de caracterización, diferenciando un enfoque orientado al problema y un enfoque orientado al daño (este último utilizando Eco-Indicator 99 y EPS-2000).
- **Análisis de Requerimiento de Energía Acumulativa (CERA)**, desarrollado por la Asociación de Ingenieros Alemanes (VDI), está destinado a analizar el uso de energía a lo largo del ciclo de vida de un bien o servicio.
- **Eco-Indicator 99**, desarrollado por la consultora PRé para el Ministerio de Vivienda, Planeamiento Urbanístico y Medio Ambiente de Holanda. Este método introduce el concepto de categoría de daño no incluido en la norma ISO, así como factores de daño. Como categorías de daño se pueden considerar los daños a la salud humana, a la calidad de los ecosistemas o el agotamiento de recursos.
- **Método de la escasez ecológica (Umweltbelastungspunkte, UBP 2013)**, desarrollado por la Oficina Federal de Medio Ambiente del gobierno suizo. Propone factores de caracterización para diferentes emisiones al aire, agua y suelo/aguas subterráneas, así como para el uso de recursos energéticos y algunas tipologías de residuos.
- **Diseño Ambiental de Productos Industriales (EDIP'03)**, elaborado por el Instituto para el Desarrollo de Productos (IPU) de la Universidad Técnica de Dinamarca, en colaboración con la Agencia danesa de Protección Ambiental, la Confederación de Industrias Danesas y cinco grandes empresas del sector de la

electromecánica. Se establecen categorías de impacto organizadas por escala (global, regional o local), los aspectos que contribuyen en cada una y los daños sobre la salud humana en el entorno de trabajo. Está concebido para su uso en el proceso productivo, por lo que no incluye aspectos relacionados con revisión crítica.

- **Estrategia de Prioridad Ambiental en el Diseño de Producto (EPS 2000)**, elaborado por el Centro para el Análisis Ambiental de Sistemas de Producto y Materiales, de la Universidad Tecnológica de Chalmers, con el apoyo del Panel Sueco para el Desarrollo Técnico e Industrial, con el propósito de que las empresas pudieran valorar la magnitud de los impactos ambientales del diseño de sus productos. Las categorías de impacto se agrupan en afección a la salud humana, capacidad de producción del ecosistema y biodiversidad.
- **Impact 2002+**, desarrollado por el Instituto Federal de Tecnología de Lausana (Suiza). Presenta un enfoque que relaciona categorías de impacto y categorías de daño.
- **IPCC 2014 (Cambio Climático)**, elaborado por el Grupo Intergubernamental de Expertos sobre el Cambio Climático. Aplica el enfoque ACV a la elaboración de los inventarios de emisiones de gases de efecto invernadero.

### 2.5.2.3 Evaluación de los Impactos del Ciclo de Vida (EICV):

La estructura de esta fase viene determinada por la normativa ISO 14042, distinguiendo entre elementos obligatorios y elementos opcionales (ver figura 14).

Los elementos considerados obligatorios son:

- Selección de las categorías de impacto, indicadores de categoría y modelos.

- **Clasificación:** En esta fase se asignan los datos procedentes del inventario a cada categoría de impacto según el tipo de efecto ambiental esperado. Una categoría de impacto es una clase que representa las consecuencias ambientales generadas por los procesos o sistemas de productos.
- **Caracterización:** Consiste en la modelización, mediante los factores de caracterización, de los datos del inventario para cada una de dichas categorías de impacto.

Cada categoría de impacto (por ejemplo, acidificación) precisa de una representación cuantitativa denominada indicador de la categoría, (por ejemplo, emisión de ácido equivalente). La suma de diferentes intervenciones ambientales para una misma categoría se hará en la unidad del indicador de la categoría.

Mediante los factores de caracterización, también llamados factores equivalentes, las diferentes intervenciones ambientales, emisiones de gases, por ejemplo, se convierten a unidades del indicador. Es necesario el uso de modelos para obtener estos factores de caracterización. La aplicabilidad de los factores de caracterización dependerá de la precisión, validez y características de los modelos utilizados.

También existen una serie de elementos opcionales que pueden ser utilizados dependiendo del objetivo y alcance del estudio de ACV:

- **Normalización:** Se entiende por normalización la relación de la magnitud cuantificada para una categoría de impacto respecto un valor de referencia ya sea a escala geográfica y/o temporal.
- **Agrupación:** Clasificación y posible catalogación de los indicadores.
- **Ponderación:** Consiste en establecer unos factores que otorgan una importancia relativa a las distintas categorías de impacto para después sumarlas y obtener un resultado ponderado en forma de un único índice ambiental global del sistema.

- **Análisis de calidad de los datos:** Ayudará a entender la fiabilidad de los resultados del AICV. Se considerará obligatorio en análisis comparativos.

#### **2.5.2.4** Interpretación de resultados:

En esta última fase, es la parte 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 en qué fase del ciclo de vida del producto se generan las principales cargas ambientales y por tanto qué puntos del sistema evaluado pueden o deben mejorarse. En los casos de comparación de distintos productos se podrá determinar cual representa un mejor comportamiento ambiental.

Este último análisis puede decantarse en incluir medidas cualitativas y cuantitativas de mejoras, como cambios en el producto, en el proceso, en el diseño, sustitución de materias primas, gestión de residuos, entre otros. De igual forma, puede ir asociada con las herramientas de prevención de la contaminación industrial, tales como minimización de residuos, o rediseño de productos.

### 3 MARCO LEGAL

**Cuadro 1.** Normativa aplicable a la gestión de aceites usados en Colombia

| NORMA                    | DESCRIPCION   |
|--------------------------|---|
| Constitución Política    | Reglamenta en el Art. 81: Queda prohibida la fabricación, importación, posesión y uso de armas químicas, biológicas y nucleares, así como la introducción al territorio nacional de residuos nucleares y desechos tóxicos.  |
| Ley 1252 de 2008         | En el Art. 2. Dicta las normas prohibitivas en materia ambiental, referentes a los residuos y desechos peligrosos y se dictan otras disposiciones   |
| Decreto 4741 de 2005     | Por el cual se reglamenta parcialmente la prevención y el manejo de los residuos o desechos peligrosos. El receptor debe tramitar y obtener las licencias, permisos y autorizaciones de carácter ambiental a que haya lugar; brindar un manejo seguro y ambientalmente adecuado de los residuos o desechos recibidos; expedir al generador una certificación; indicar en su publicidad el tipo de actividad y tipo de residuos o desechos peligrosos que está autorizado a manejar; contar con un plan de contingencia actualizado; tomar todas las medidas de carácter preventivo o de control previas al cese, cierre, clausura o desmantelamiento de su actividad. |
| 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 de aceites de desecho o usados y las condiciones técnicas para realizar la misma   |
| Decreto 1609 de 2002     | Por el cual se reglamenta el manejo y transporte terrestre automotor de mercancías peligrosas por carretera.  |
| Resolución 1402 de 2006. | Ninguna persona natural o jurídica podrá introducir al territorio nacional residuos o desechos peligrosos si no cumple con lo consagrado en el Convenio de Basilea, Ley 253 de 1996, Ley 430 de 1998, Ley 99 de 1993 y sus disposiciones reglamentarias. En consecuencia, cualquier movimiento transfronterizo de residuos o desechos peligrosos, deberá dar cumplimiento a lo establecido en las mencionadas disposiciones.  |

**Fuente:** Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible. Manual técnico para el manejo de aceites lubricantes usados de origen automotor e industrial. Bogotá. 2014. 72p

## 4 METODOLOGIA EXPERIMENTAL

El propósito de esta sección consiste en describir las etapas experimentales desarrolladas para la ejecución de este proyecto, las cuales se esquematizan en la Figura 12. Se realiza un análisis del estado del arte de los principales procesos y/o tecnologías utilizadas a nivel mundial para la valorización de aceites lubricantes usados del sector automotriz, mediante la recuperación de bases lubricantes, en los últimos 10 años; de éste se seleccionan los 7 más importantes y que tengan un nivel de desarrollo a escala industrial; y se seleccionaron los principales atributos a tener en cuenta en la evaluación de dichas tecnologías. Posteriormente mediante el método de decisión multicriterio – MDMC el cual se describió en el numeral 2.4, se utilizó un método de toma de decisiones de múltiples atributos (MADM), como lo es el método AHP; teniendo en cuenta que, para el presente trabajo, la preselección de la mejor alternativa se hará considerando las ventajas y desventajas de un conjunto de restricciones y/o atributos que interactúan entre sí.

Luego se pretende del estado del arte de los procesos y/o tecnologías de valorización de aceites lubricantes usados mediante la recuperación de bases lubricantes, a nivel mundial, en los últimos 10 años, tomar un proceso que se encuentre en un nivel de desarrollo a escala laboratorio, para optimizarlo, a continuación será evaluado técnicamente mediante los análisis de RMN, IR y contenidos de metales, comparándolo con la muestra de aceite lubricante usado y una muestra de base lubricante parafínica media de Ecopetrol.

Una vez se tengan los dos procesos preseleccionados, uno producto de la metodología de decisión multicriterio y el proceso experimental resultante, posterior a la evaluación técnica; se realizará una evaluación financiera mediante la proyección de los escenarios de producción a una escala industrial, realizando un flujo de caja proyectado de los dos proceso, dejando como resultado los indicadores

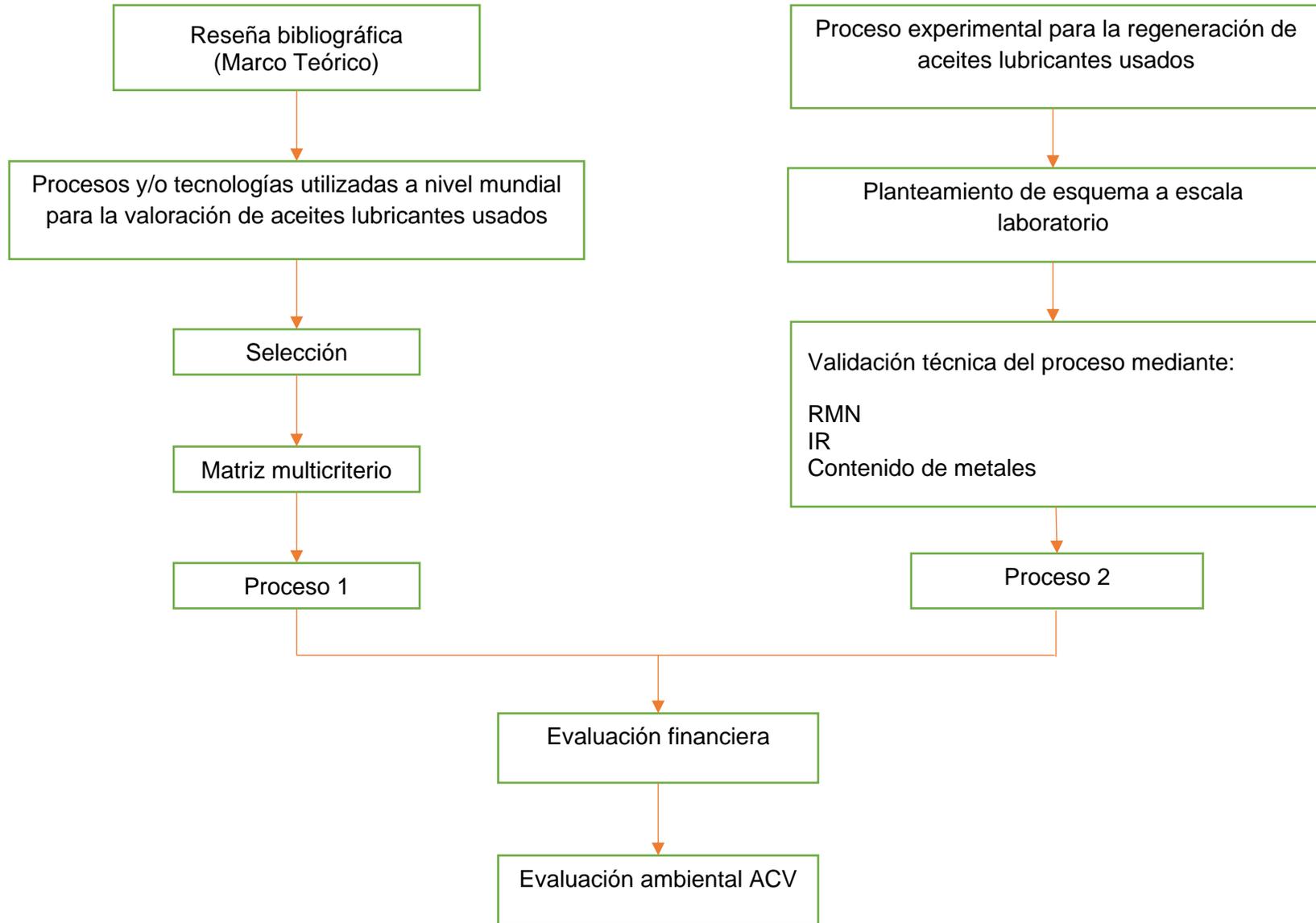
financieros de TIR, VPN y Payback, con el fin de determinar la viabilidad financiera del proceso experimental en un escenario de producción industrial.

Después, se realizará una evaluación ambiental de los dos procesos preseleccionados, mediante la metodología del Análisis de Ciclo de Vida de tipo de la cuna a la puerta (Cradle to Gate), con el fin de comparar ambientalmente los dos procesos preseleccionados con el proceso de valoración comúnmente utilizado en Colombia, como lo es el aprovechamiento energético mediante el uso como combustible de los aceites lubricantes usados.

#### **4.1 EVALUACIÓN DE LAS PRINCIPALES TECNOLOGÍAS DE VALORIZACIÓN DE ACEITES LUBRICANTES UTILIZADAS A NIVEL MUNDIAL**

Para realizar la evaluación de los principales procesos y/o tecnologías existentes para la valoración de residuos generados procedentes de aceites lubricantes en el sector automotriz, mediante la recuperación de bases lubricantes comúnmente utilizados a nivel mundial en los últimos 10 años; se tomó el método de decisión multicriterio – MDMC, el cual se describió en el numeral 2.4, se utilizó un método de toma de decisiones de múltiples atributos (MADM), como lo es el método AHP; teniendo en cuenta que, para el presente trabajo, la preselección de la mejor alternativa se hará considerando las ventajas y desventajas de un conjunto de restricciones y/o atributos que interactúan entre sí.

Figura 12. Diagrama de bloques de la metodología experimental



El primer paso para aplicar un método de decisión multicriterio es identificar los criterios de evaluación o atributos a evaluar. Para tal fin, se toma como base el estudio realizado en (HSU & LIU, 2011)<sup>41</sup>, donde se tomaron los criterios y/o atributos a considerar entre las distintas tecnologías, adicionalmente a los criterios mencionados, se consideraron unos criterios desde el punto de vista ambiental, de la inversión inicial y los costos operativos, los cuales se pueden observar en la tabla 4.

**Tabla 4.** Listado de criterios o atributo a evaluar.

| <b>Listados de criterios</b> |                                |
|------------------------------|--------------------------------|
| 1                            | Tasa de reciclaje              |
| 2                            | Materiales químicos peligrosos |
| 3                            | Requerimientos de espacio      |
| 4                            | Maduración de la tecnología    |
| 5                            | Capacidad de producción        |
| 6                            | Calidad del producto terminado |
| 7                            | Consumo energético             |
| 8                            | Impacto ambiental              |
| 9                            | Capex                          |
| 10                           | Opex                           |

**Fuente:** Elaborado por el autor

<sup>41</sup> HSU, Yu-Lung; LIU, Chun-Chu. Evaluation and selection of regeneration of waste lubricating oil technology. Environmental monitoring and assessment, vol. 176, no 1. 2011b. 203p.

Las tecnologías a evaluar producto del análisis del estado del arte, de los principales procesos y/o tecnologías utilizadas a nivel mundial para la valorización de aceites lubricantes usados del sector automotriz, mediante la recuperación de bases lubricantes, en los últimos 10 años; fueron descritas en el ítem 2, a saber:

1. Proceso ácido-arcilla
2. Proceso de destilación
3. Extracción con solventes con hidroacabado
4. Evaporación de película delgada (por sus siglas en inglés TFE) + hidroacabado
5. TFE + acabado de arcilla
6. TFE + acabado solvente
7. Proceso de Extracción con solventes

Para realizar las evaluaciones entre los distintos atributos y/o criterios de las tecnologías descritas en la sección 2.3, se tuvo en cuenta el estudio realizado en (HSU & LIU, 2011), donde se plantearon los aspectos económicos, operativos y ambientales de las tecnologías anteriormente enunciadas, estos valores los podemos observar en las tablas 5 y 6.

Para la realización del Proceso analítico jerárquico AHP, se seguirán los siguientes pasos:

- Cálculo del vector de pesos de criterio
- Cálculo de la matriz de puntuación de las alternativas
- Clasificación de las alternativas

**Tabla 5.** Tabla comparativa de varias tecnologías de regeneración (aspecto económico)

| <b>Tecnología de regeneración</b>         | <b>Madurez de la tecnología</b> | <b>Energía requerida</b> | <b>Tasa de reciclaje</b> | <b>Calidad de la base recuperada</b> | <b>Demanda de equipos</b> | <b>Costos operativos</b> | <b>Escala (Kton/año)</b> |
|---|---------------------------------|--------------------------|--------------------------|--------------------------------------|---------------------------|--------------------------|--------------------------|
| Proceso ácido-arcilla                     | Nivel industrial                | Bajo                     | 63%                      | Mala                                 | Baja                      | Bajos                    | Pequeña (2-10)           |
| Proceso de destilación                    | Nivel industrial                | Alto                     | 50%                      | Mala                                 | Medio                     | Bajos                    | Medio (25)               |
| Extracción con Solvente                   | Nivel industrial                | Alto                     | 65% - 70%                | API Grupo I                          | Alto                      | Altos                    | Medio (25)               |
| TFE + hidroacabado                        | Nivel industrial                | Alto                     | 72%                      | API Grupo II                         | Alto                      | Altos                    | Grande (50 - 80)         |
| TFE + acabado de arcilla                  | Nivel industrial                | Alto                     | 72%                      | API Grupo II                         | Alto                      | Altos                    | Grande (100)             |
| TFE + acabado solvente                    | Nivel industrial                | Alto                     | 72%                      | API Grupo II                         | Alto                      | Altos                    | Grande (100)             |
| Extracción con solventes con hidroacabado | Nivel industrial                | Alto                     | 74%                      | API Grupo II                         | Alto                      | Altos                    | Medio (60)               |

Fuente. HSU, Yu-Lung; LIU, Chun-Chu. Evaluation and selection of regeneration of waste lubricating oil technology. Environmental monitoring and assessment, vol. 176, no 1. 2011. 202p.

**Tabla 6.** Tabla comparativa de varias tecnologías de regeneración (aspecto de protección ambiental)

| <b>Tecnología de regeneración</b>           | <b>Cantidad de lodo ácido generado</b> | <b>Cantidad de aceite residual generado</b> | <b>Sustancias químicas peligrosas aplicadas en el proceso</b> | <b>Produce contaminación secundaria o no</b> |
|---|--|---|---|--|
| Proceso ácido-arcilla                       | Mucho                                  | Mucho                                       | Ácido sulfúrico   | Si   |
| Proceso de destilación                      | Poco                                   | Mucho                                       | Ácido sulfúrico   | Si   |
| Extracción con Solvente                     | Poco                                   | Mucho                                       | Ácido sulfúrico y solventes orgánicos                         | Si   |
| TFE + hidroacabado                          | Ninguna                                | Poco  | Ninguna   | Poco o ninguno                               |
| TFE + acabado de arcilla                    | Ninguna                                | Poco  | Ninguna   | Poco o ninguno                               |
| TFE + acabado solvente                      | Ninguna                                | Poco  | Solventes orgánicos   | Poco o ninguno                               |
| Extracción con disolventes con hidroacabado | Ninguna                                | Poco  | Solventes orgánicos   | Poco o ninguno                               |

**Fuente:** HSU, Yu-Lung; LIU, Chun-Chu. Evaluation and selection of regeneration of waste lubricating oil technology. Environmental monitoring and assessment, vol. 176, no 1. 2011. 203p.

## 4.2 NORMALIZACIÓN DE LOS DATOS CUANTITATIVOS

En el Anexo A ítem 3 se observa como la comparación por parejas es realizada tomando como referencia la escala, la cual podemos observar en la tabla 4 donde 1 representa que dos criterios son igualmente importantes, mientras que el valor de 9 indica que uno de los criterios es absolutamente más importante. Los valores intermedios son condiciones que pueden usarse dependiendo del criterio del evaluador.

De esta forma, al usar la escala de importancia, se define la priorización por parejas, a diferentes niveles de jerarquía y se establece una matriz de comparación por parejas la cual es desarrollada definiendo los pesos de cada par denotado como  $w_i$  para el primer par  $i$  y un vector  $A$ .

Los datos cuantitativos mediante los cuales se realiza el cálculo del vector de pesos de criterio, el cálculo de la matriz de puntuación de las alternativas y la evaluación de las alternativas, se encuentran tabulados en el (Anexo B).

**Tabla 7.** Datos normalizados del vector de pesos de criterio

|    | <b>Listados de criterios</b>   | Tasa de reciclaje | Materiales químicos peligrosos | Requerimientos de espacio | Maduración de la tecnología | Capacidad de producción | Calidad del producto terminado | Consumo energético | Impacto ambiental | Capex | Opex |
|----|--------------------------------|-------------------|--------------------------------|---------------------------|-----------------------------|-------------------------|--------------------------------|--------------------|-------------------|-------|------|
| 1  | Tasa de reciclaje              | 0,08              | 0,12                           | 0,13                      | 0,15                        | 0,04                    | 0,08                           | 0,10               | 0,05              | 0,11  | 0,05 |
| 2  | Materiales químicos peligrosos | 0,02              | 0,02                           | 0,01                      | 0,03                        | 0,01                    | 0,01                           | 0,02               | 0,02              | 0,04  | 0,02 |
| 3  | Requerimientos de espacio      | 0,02              | 0,05                           | 0,03                      | 0,02                        | 0,02                    | 0,06                           | 0,02               | 0,02              | 0,04  | 0,02 |
| 4  | Maduración de la tecnología    | 0,03              | 0,05                           | 0,08                      | 0,05                        | 0,03                    | 0,06                           | 0,15               | 0,03              | 0,07  | 0,05 |
| 5  | Capacidad de producción        | 0,16              | 0,16                           | 0,13                      | 0,15                        | 0,08                    | 0,08                           | 0,10               | 0,03              | 0,11  | 0,05 |
| 6  | Calidad del producto terminado | 0,03              | 0,07                           | 0,01                      | 0,03                        | 0,03                    | 0,03                           | 0,02               | 0,02              | 0,04  | 0,02 |
| 7  | Consumo energético             | 0,04              | 0,07                           | 0,05                      | 0,02                        | 0,04                    | 0,08                           | 0,05               | 0,03              | 0,07  | 0,05 |
| 8  | Impacto ambiental              | 0,16              | 0,09                           | 0,13                      | 0,15                        | 0,25                    | 0,14                           | 0,15               | 0,09              | 0,07  | 0,05 |
| 9  | Capex                          | 0,24              | 0,21                           | 0,24                      | 0,25                        | 0,25                    | 0,25                           | 0,25               | 0,45              | 0,34  | 0,49 |
| 10 | Opex                           | 0,24              | 0,16                           | 0,18                      | 0,15                        | 0,25                    | 0,20                           | 0,15               | 0,27              | 0,11  | 0,16 |

**Fuente:** Elaborado por el autor

**Tabla 8.** Datos normalizados de la matriz de alternativas

| Listados de Alternativas |                                      | Proceso ácido-arcilla | Proceso de destilación | Extracción solvente con hidroacabado | TFE + acabado solvente | TFE + acabado de arcilla | TFE + hidroacabado | Proceso de extracción con solventes |
|--------------------------|--------------------------------------|-----------------------|------------------------|--------------------------------------|------------------------|--------------------------|--------------------|-------------------------------------|
| 1                        | Proceso ácido-arcilla                | 0,04                  | 0,05                   | 0,05                                 | 0,04                   | 0,05                     | 0,02               | 0,03                                |
| 2                        | Proceso de destilación               | 0,30                  | 0,35                   | 0,49                                 | 0,24                   | 0,29                     | 0,29               | 0,28                                |
| 3                        | Extracción solvente con hidroacabado | 0,13                  | 0,12                   | 0,16                                 | 0,24                   | 0,29                     | 0,20               | 0,21                                |
| 4                        | TFE + acabado solvente               | 0,13                  | 0,17                   | 0,08                                 | 0,12                   | 0,19                     | 0,05               | 0,14                                |
| 5                        | TFE + acabado de arcilla             | 0,09                  | 0,12                   | 0,05                                 | 0,06                   | 0,10                     | 0,29               | 0,14                                |
| 6                        | TFE + hidroacabado                   | 0,22                  | 0,12                   | 0,08                                 | 0,24                   | 0,03                     | 0,10               | 0,14                                |
| 7                        | Proceso de extracción con solventes  | 0,09                  | 0,09                   | 0,08                                 | 0,04                   | 0,05                     | 0,05               | 0,07                                |

**Fuente:** Elaborado por el autor

**Tabla 9.** Datos normalizados de la matriz de puntuación de las alternativas

|   | <b>Listados de Alternativas</b>      | Tasa de reciclaje | Materiales químicos peligrosos | Requerimientos de espacio | Maduración de la tecnología | Capacidad de producción | Calidad del producto terminado | Consumo energético | Impacto ambiental | Capex | Opex |
|---|--------------------------------------|-------------------|--------------------------------|---------------------------|-----------------------------|-------------------------|--------------------------------|--------------------|-------------------|-------|------|
| 1 | Proceso ácido-arcilla                | 0,07              | 0,04                           | 0,22                      | 0,36                        | 0,04                    | 0,03                           | 0,44               | 0,03              | 0,34  | 0,39 |
| 2 | Proceso de destilación               | 0,04              | 0,32                           | 0,35                      | 0,24                        | 0,34                    | 0,06                           | 0,16               | 0,06              | 0,18  | 0,24 |
| 3 | Extracción solvente con hidroacabado | 0,11              | 0,19                           | 0,10                      | 0,13                        | 0,09                    | 0,06                           | 0,09               | 0,35              | 0,10  | 0,15 |
| 4 | TFE + acabado solvente               | 0,22              | 0,13                           | 0,06                      | 0,04                        | 0,16                    | 0,30                           | 0,05               | 0,25              | 0,05  | 0,04 |
| 5 | TFE + acabado de arcilla             | 0,22              | 0,12                           | 0,07                      | 0,09                        | 0,19                    | 0,30                           | 0,05               | 0,16              | 0,07  | 0,06 |
| 6 | TFE + hidroacabado                   | 0,22              | 0,13                           | 0,04                      | 0,03                        | 0,12                    | 0,15                           | 0,02               | 0,10              | 0,03  | 0,03 |
| 7 | Proceso de extracción con solventes  | 0,12              | 0,07                           | 0,16                      | 0,11                        | 0,06                    | 0,09                           | 0,19               | 0,04              | 0,23  | 0,10 |

**Fuente:** Elaborado por el autor

**Tabla 10.** Resultados de la Evaluación de tecnologías de regeneración de aceites lubricantes usados

|          | <b>Listados de Alternativas</b>      | <b>Ponderación final</b> |
|----------|--------------------------------------|--------------------------|
| 1        | Proceso ácido-arcilla                | 0,250                    |
| <b>2</b> | <b>Proceso de destilación</b>        | <b>0,261</b>             |
| 3        | Extracción solvente con hidroacabado | 0,186                    |
| 4        | TFE + acabado solvente               | 0,138                    |
| 5        | TFE + acabado de arcilla             | 0,139                    |
| 6        | TFE + hidroacabado                   | 0,101                    |
| 7        | Proceso de extracción con solventes  | 0,149                    |

**Fuente:** Elaborado por el autor

#### **4.3 PROCESO EXPERIMENTAL PARA LA REGENERACIÓN DE ACEITES LUBRICANTES USADOS**

Con el objetivo de plantear una tecnología sostenible, que permita la valoración de los residuos generados por el uso automotriz de los aceites lubricantes, mediante la recuperación de base lubricantes; en un proceso respetuoso con el medio ambiente y rentable. Se realizó un estudio del arte, haciendo una revisión a los procesos o tecnologías propuestas a escala laboratorio, a nivel mundial en los últimos 10 años, producto de éste, se determinó utilizar como base, el proceso descrito por FAN<sup>42</sup>,

---

<sup>42</sup> FAN, William Tsung-Chieh. Regeneration of used petroleum-based lubricants and biolubricants by a novel green and sustainable technology. PhD Environmental Engineering. University of Southern California, 2010.

cuya metodología es el proceso de extracción con solventes, en donde se consideraron la solubilidad y polaridad de los solventes; siendo fundamental tanto las interacciones moleculares como las interacciones intermoleculares; la cual fue descrita en el numeral 2.3.3 y el diagrama del proceso se observa en la Fig. 3.

### **Interacciones moleculares en lubricantes usados**

El aceite lubricante usado es un sistema coloidal único que consiste en una variedad de impurezas y varias cantidades de hidrocarburo compuestos. Las impurezas deben eliminarse antes de que los lubricantes usados puedan ser regenerados en otros materiales, tales como bases lubricantes. Dado que el lubricante usado es un sistema coloidal, la desestabilización de las impurezas suspendidas es el primer paso a llevar a cabo, para realizar la purificación. Sin embargo, las experiencias han indicado que las partículas coloidales de los aceites lubricantes usados son diferentes a los de la fase acuosa. Así, los coagulantes utilizados para el tratamiento del agua no funcionan para los aceites lubricantes usados.

Dado que las partículas de hollín inorgánico y molécula de hidrocarburo orgánico son dos materiales incompatibles; por tanto, deben estar en función de sus diferencias. Las experiencias y los resultados experimentales indican que utilizar las diferencias en la solubilidad de los solventes orgánicos es un enfoque exitoso para separarlos entre sí.

### **Interacción intermolecular y solubilidad**

La solubilidad del soluto en el solvente está determinada por la interacción intermolecular entre solvente y soluto. Los compuestos polares normalmente tienen diferente fuerza intermolecular de los compuestos no polares. La solubilidad del soluto en el solvente se ve muy afectado por la polaridad de los solventes y solutos como se muestra en la Tabla 15. Solubilidad y polaridad de solvente y soluto.

**Tabla 11.** Solubilidad y polaridad de solvente y soluto

| Soluto   | Solvente | Interacción     |                     |                   | Solubilidad del soluto en solvente |
|----------|----------|-----------------|---------------------|-------------------|------------------------------------|
|          |          | Soluto / Soluto | Solvente / Solvente | Soluto / Solvente |                                    |
| No Polar | No Polar | Débil           | Débil               | Débil             | Alta                               |
| No Polar | Polar    | Débil           | Fuerte              | Débil             | Baja                               |
| Polar    | No Polar | Fuerte          | Débil               | Débil             | Baja                               |
| Polar    | Polar    | Fuerte          | Fuerte              | Fuerte            | Alta                               |

**Fuente:** WELTON, Thomas; REICHARDT, Christian. Solvents and solvent effects in organic chemistry. John Wiley & Sons, 2011. 89p

El solvente más efectivamente utilizado para la recuperación de los hidrocarburos es el hexano, puesto que:

- Es inerte a la condición de disolución.
- Es relativamente económico.
- Punto de ebullición relativamente bajo 69°C, comparado con otros solventes polares, lo cual permite su reciclaje a bajas temperaturas.

De acuerdo con la teoría de solubilidad y polaridad como se indica en la Tabla 12, no polar es menos probable que los solutos se disuelvan en disolventes polares. Por lo tanto, el uso de solventes polares para controlar las redes de gel de hollín en suspensión es un enfoque lógico basado en su incompatibilidad.

Los resultados experimentales han confirmado que la dimetilcetona (DMK) es el solvente polar más efectivo, capaz de flocular y sedimentar las impurezas en lubricantes usados.

DMK es un solvente polar, el cual tiene muchas ventajas sobre otros disolventes orgánicos polares, tales como:

- Es relativamente económico.
- Es miscible con hexano.
- Es inerte a la condición de disolución.
- Su punto de ebullición es relativamente bajo 56°C.
- El agua es soluble en DMK, por lo que el agua de los lubricantes usados se eliminado durante el proceso de purificación.

Con el fin de crear un proceso capaz de purificar los aceites lubricantes usados y recuperar las bases lubricantes a presión atmosférica y temperatura ambiente; realizaron una mezcla de hexano con DMK, como un sistema químico para ambas tareas, en un proceso de solvente binario. DMK y hexano son perfectamente compatibles para mezclar entre sí en cualquier proporción sin tener cualquier efecto negativo. Sin embargo, las interacciones dipolo-dipolo cambian inversamente con la cantidad de hexano en la mezcla. Los disolventes orgánicos usados permiten su reciclaje y reuso.

Tal como lo indica FAN, los resultados óptimos en depuración y recuperación de base lubricante, se logró, utilizando una relación de mezcla (% en peso) de hexano y DMK es de 1 a 3; la relación de mezcla de aceite lubricante usado y solvente optima fue de 1 a 9.

Con base en el proceso planteado por FAN y descrito anteriormente, se tomó un aceite lubricante mineral usado, suministrado por una estación de cambio de aceite, ubicado en Piedecuesta – Santander, y se aplicó dicho proceso.

Con el objetivo de plantear una tecnología sostenible y realizar una evaluación técnica, como se explicó anteriormente, se tomará como base el proceso descrito por FAN, realizando unas modificaciones, en búsqueda de la optimización del

proceso, tanto en lo referente a los tiempos de producción como en la calidad final del producto terminado (Ver Fig. 13) y se plantea conseguir los siguientes objetivos:

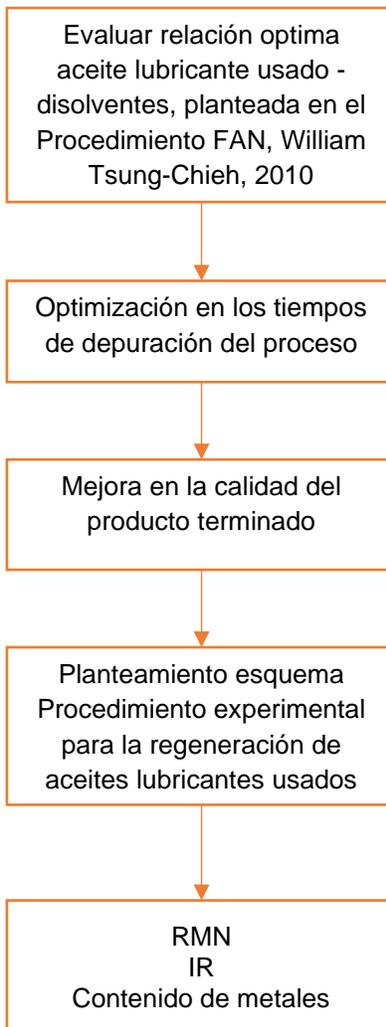
- Evaluar la relación óptima en la mezcla tanto Hexano – DMK, como en la mezcla aceite lubricante usado – solvente; utilizada por FAN en su Proceso de Regeneración de aceite lubricantes usados y biolubricantes mediante una nueva tecnología verde y sostenible
- Optimizar los tiempos de depuración mediante agitación mecánica en la mezcla aceite lubricante usado - solvente.
- Mejorar la calidad del producto terminado, mediante el uso de arenas naturales absorbentes, tales como, zeolitas, dolomitas y sepiolitas

**4.3.1 Evaluar relación óptima planteada por FAN en su Proceso de Regeneración de aceite lubricantes usados y biolubricantes mediante una nueva tecnología verde y sostenible; en la mezcla tanto Hexano – DMK, como en la mezcla aceite lubricante usado – solvente.**

**4.3.1.1** Se realizan diferentes dosificaciones en tubos de ensayo de la mezcla aceite lubricante usado – solvente, tomando como base de cálculo, 10 g de mezcla.

**4.3.1.2** Se escala a una mezcla de 1000 g.

**Figura 13.** Metodología desarrollada para el planteamiento y validación técnica del procedimiento experimental para la regeneración de aceites lubricantes usados

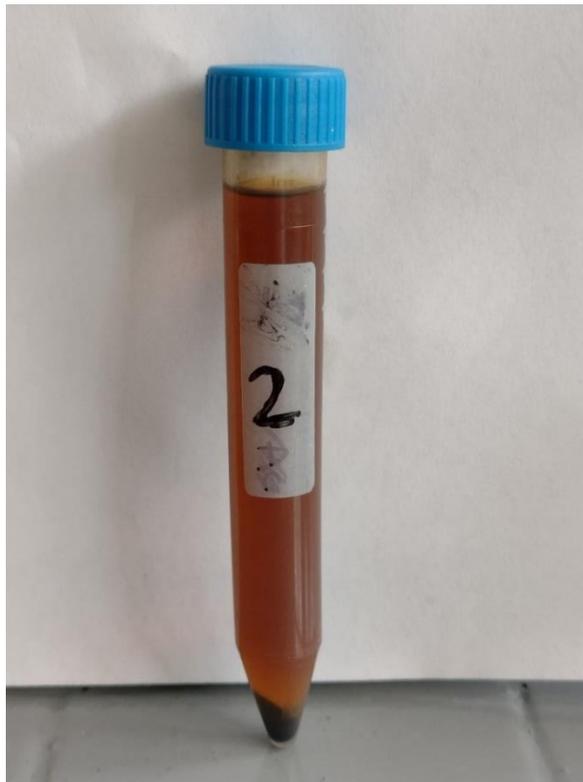


**Fuente:** Elaborado por el autor

**4.3.1.3** Se realizan diferentes dosificaciones en tubos de ensayo de la mezcla aceite lubricante usado – solvente, tomando como base de cálculo, 10 g de mezcla.

En este proceso se realizaron distintas dosificaciones probando las mezclas binarias de solventes: hexano - DMK; Gasolina - DMK; Nafta - DMK y Apiasol - DMK. Los mejores resultados fueron los obtenidos utilizando una relación de mezcla (% en peso) de hexano y DMK de 1 a 3; una relación de mezcla de aceite lubricante usado y solvente de 1 a 9. Se tomo una base de cálculo de 10g de mezcla de aceite lubricante usado y solvente, teniendo 1g de aceite lubricante usado, 6,75 g de DMK y 2,25 g de hexano. Pudiendo comprobar los resultados obtenidos por FAN.

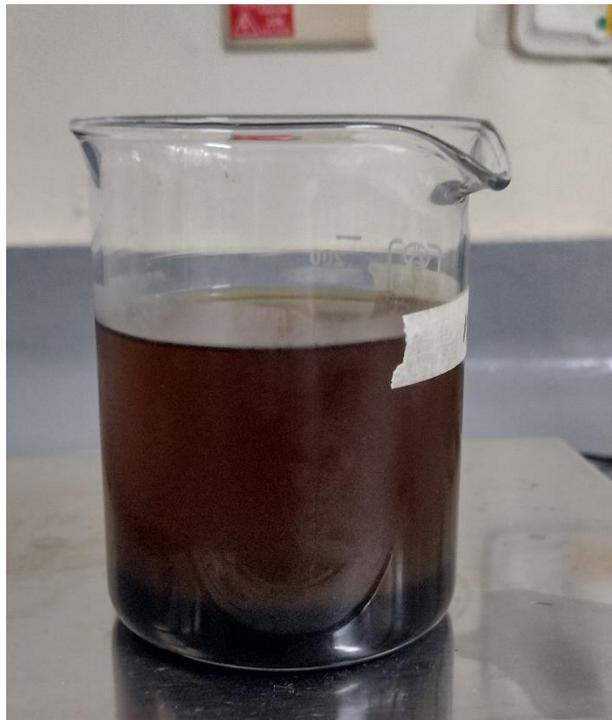
Figura 14. Tubo de ensayo con relación de mezcla optima



**Fuente:** Elaborado por el autor

- a. Se realizó un escalamiento del proceso con la relación de mezcla solvente - aceite obtenida anteriormente; tomando una base de cálculo de 100 g de la mezcla de aceite lubricante usado y solvente, teniendo 100 g de aceite lubricante usado, 67,5 g de DMK y 22,5 g de hexano. El proceso se realizó a temperatura ambiente y presión atmosférica.

**Figura 15.** Mezcla de aceite lubricante usado y solvente



**Fuente:** Elaborado por el autor

#### **4.3.2 Optimización en los tiempos de depuración del proceso**

Con el fin de optimizar los tiempos de depuración del aceite lubricante usado y tener mejores rendimientos, se realizó una agitación mecánica a 300 rpm durante 1 hora.

Figura 16. Agitación mecánica mezcla de aceite lubricante usado y solvente



**Fuente:** Elaborado por el autor

### **Proceso de precipitación de hollín e impurezas del aceite lubricante usado**

Posterior al proceso de agitación mecánica, se deja precipitar la mezcla durante 30 minutos, permitiendo el barrido y decantación de hollín y metales pesados

Figura 17. Proceso de precipitación de hollín e impurezas del aceite lubricante usado



**Fuente:** Elaborado por el autor

Después se realiza la recuperación de solventes, mediante el uso de un proceso de destilación atmosférica en donde se recupera y separan el hexano, el DMK y la base lubricante, según sus puntos de ebullición.

Figura 18. Equipo de destilación atmosférica



**Fuente:** Elaborado por el autor

Figura 19. Base lubricante recuperada

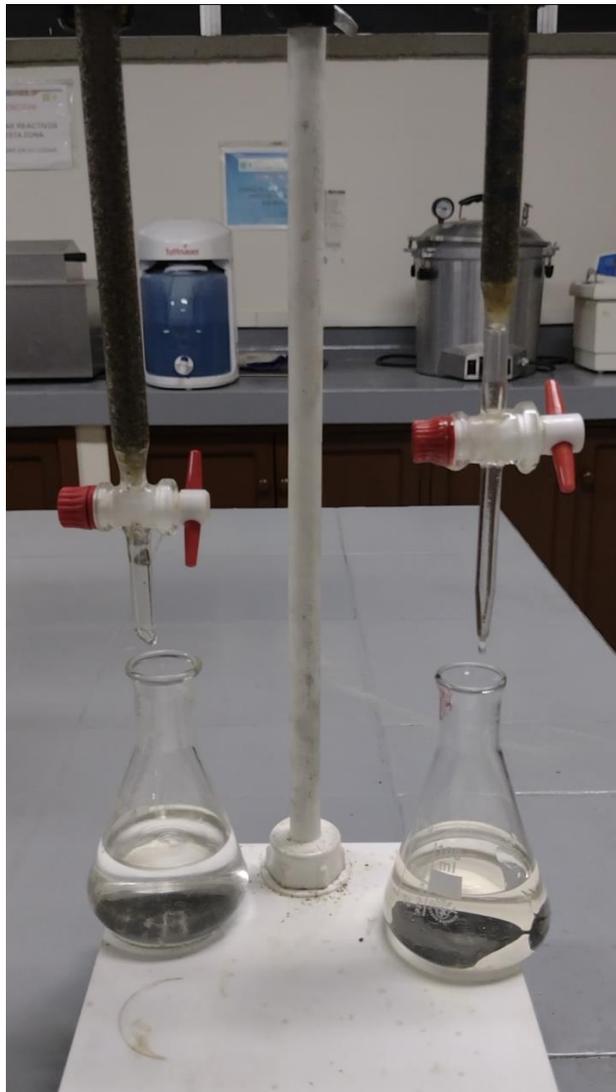


**Fuente:** Elaborado por el autor

### 4.3.3 Mejora en la calidad del producto terminado (Base lubricante recuperada).

Buscando tener una mejor calidad en el producto terminado, se realiza un proceso de absorción por medio de arenas naturales absorbentes, tales como: Zeolitas, dolomitas y sepiolitas.

**Figura 20.** Proceso de absorción con arenas naturales



**Fuente:** Elaborado por el autor

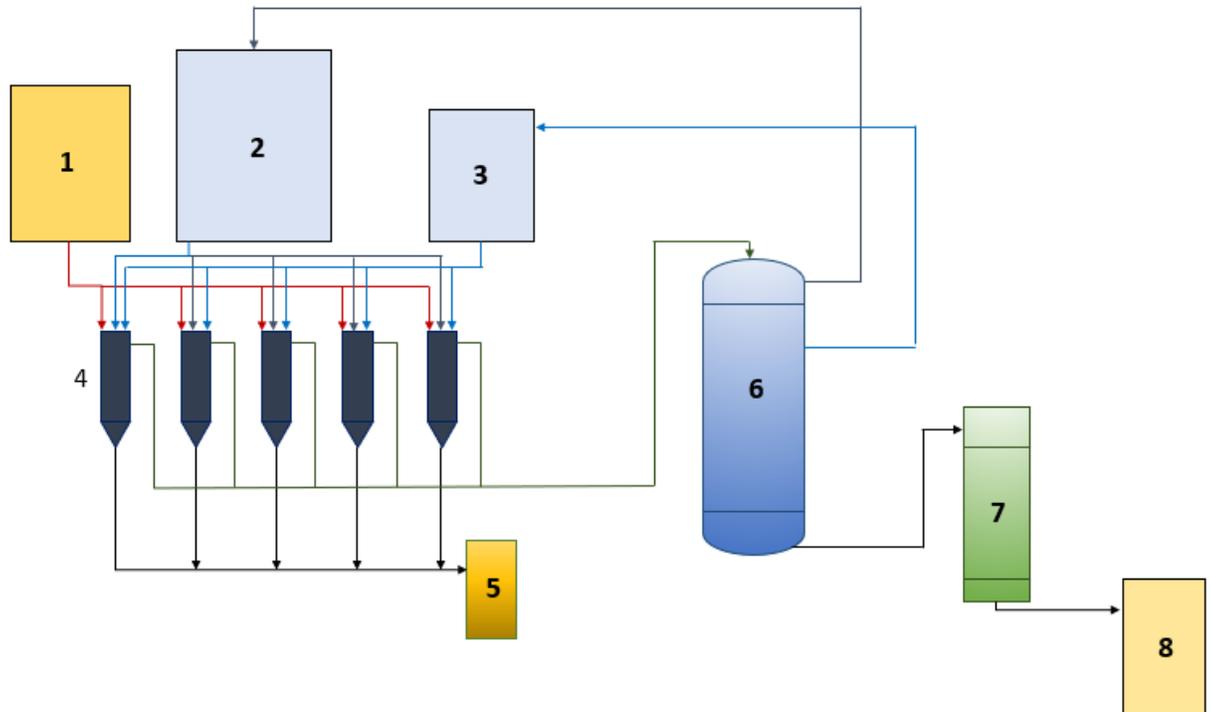
Figura 21. Producto terminado (Base lubricante recuperada)



**Fuente:** Elaborado por el autor

Una vez realizada la evaluación de la relación óptima planteada por FAN en su Proceso de Regeneración de aceite lubricantes usados y biolubricantes mediante una nueva tecnología verde y sostenible; en la mezcla tanto Hexano – DMK, como en la mezcla aceite lubricante usado – solvente; la optimización en los tiempos de depuración del proceso y la mejora en la calidad del producto terminado, en la figura 22 se plantea el Proceso experimental para la regeneración de los aceites lubricantes usados.

**Figura 22.** Diagrama Proceso experimental para la regeneración de aceite lubricantes usados



1. Tanque de almacenamiento de aceite lubricante usado, 2. Tanque de almacenamiento de acetona (DMK), 3. Tanque de almacenamiento de hexano, 4. Reactor cónico con agitador, 5. Tanque de almacenamiento de residuos (hollín e impurezas), 6. Torre de destilación atmosférica, 7. Torre de absorción de arenas naturales y 8. Tanque de almacenamiento de base parafínica recuperada

**Fuente:** Elaborado por el autor

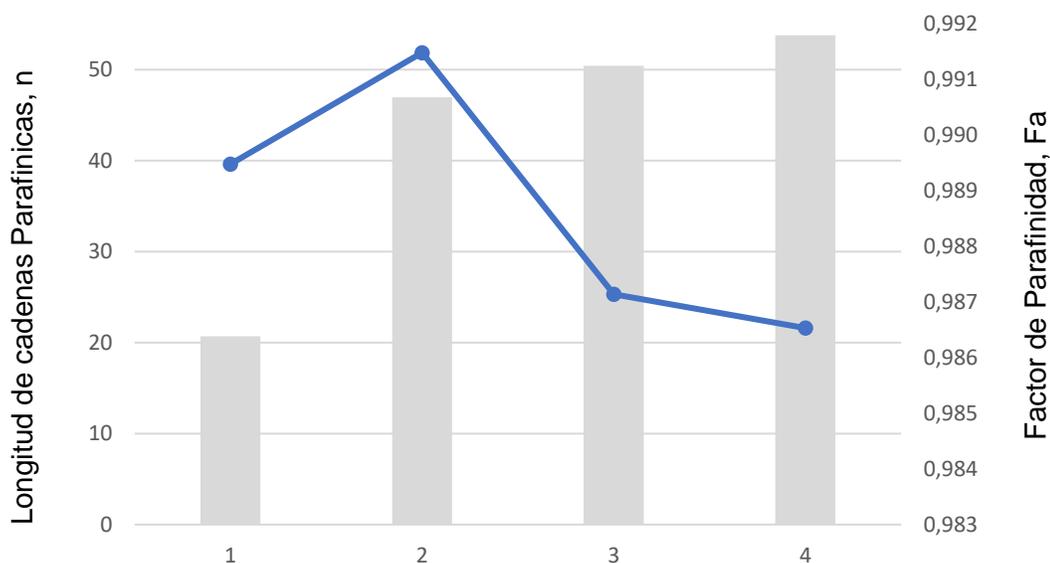
### **Análisis $^1\text{H}$ -RMN**

Con el fin de evaluar el proceso experimental para la regeneración de aceite lubricante usados, desde el punto de vista técnico y poder comparar la calidad de la base parafínica recuperada con la base parafínica virgen importada por Ecopetrol, a partir de parámetros moleculares promedio se estimó realizar un análisis de espectroscopía de  $^1\text{H}$ -RMN para comparar el factor de parafinidad tanto de la base parafínica recuperada por medio del proceso experimental, como el de la base

parafínica de Ecopetrol proveniente del crudo. En donde se analizan las muestras tomadas del proceso de acabado por medio de torres de absorción, en donde, se usan arenas naturales como medios absorbentes, tales como: Dolomitas, sepiolitas y zeolitas. El comportamiento del factor de parafinidad, lo podemos observar en la figura 23.

Los parámetros se estimaron mediante el análisis de espectroscopía de  $^1\text{H-RMN}$  y la aplicación de correlación disponible en la literatura. Los espectros de  $^1\text{H-RMN}$  se midieron y analizaron en un espectrómetro Bruker Avance III a una frecuencia de resonancia de 400,16 Hz con un campo magnético de 9,4 T. Los espectros obtenidos se normalizaron utilizando el software MestReNova V3.0 y los parámetros moleculares medios se calcularon utilizando la metodología propuesta por varios autores (Silva et al. 2004; Poveda and Molina 2012; Mondal et al. 2015)

Figura 23. Comportamiento del factor de parafinidad vs n



Fuente: Elaborado por el autor

## Índice de refracción

La absorción óptica es uno de varios fenómenos que ocurren como consecuencia de la interacción de una onda electromagnética y un medio material; en donde la energía de un fotón es tomada por otra partícula, en este caso por un electrón, para efectuar una transición desde un estado de baja energía a otro de mayor energía. De esta forma, la luz que es absorbida puede ser disipada en calor o ser reemitida con otra frecuencia (fotoluminiscencia).

Así mismo, una forma de caracterizar este fenómeno es mediante el coeficiente de absorción  $\alpha$ , el cual es un parámetro que en general, depende de la frecuencia de la OEM, y que caracteriza qué tan fácil puede un material ser atravesado por un haz de luz, de una cierta frecuencia, e indica qué tan lejos puede llegar este haz antes de ser absorbido; de tal forma que, en un material donde el coeficiente de absorción es bajo, la luz se absorbe poco; y si el material es lo suficientemente delgado, parecerá transparente a esa longitud de onda. El coeficiente de absorción puede ser determinado experimentalmente a partir de la disminución de intensidad de un haz de luz que atraviesa un material de grosor  $x$ , usando la ley de Lambert-Beer.

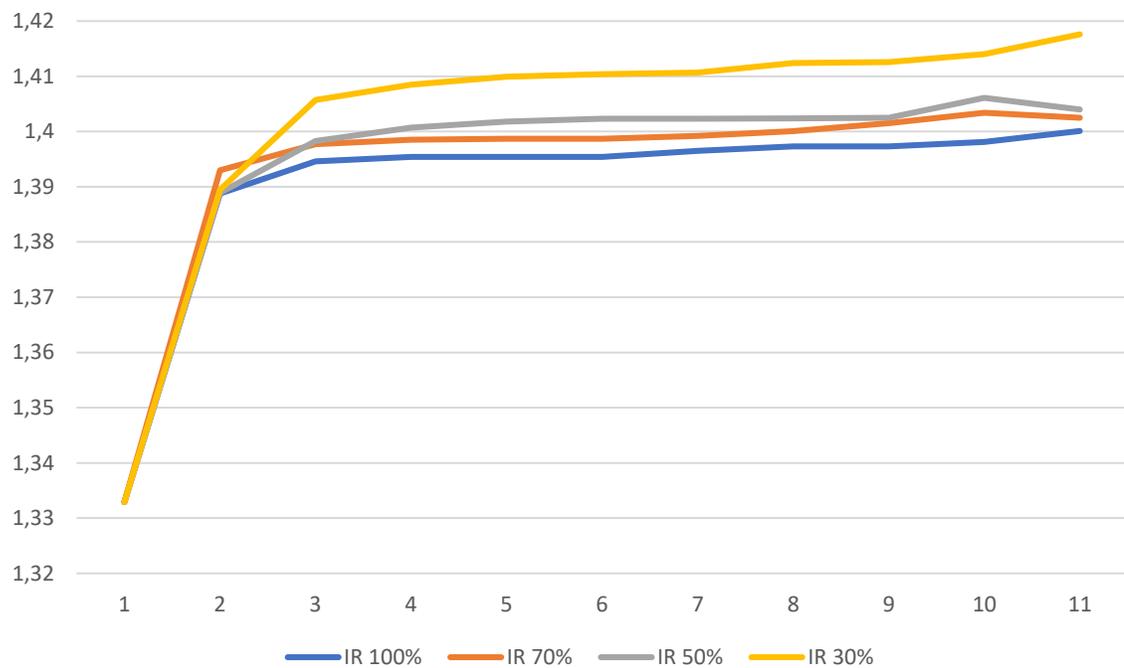
El índice de refracción de un medio es una cantidad que proporciona información sobre cuánto se reduce la velocidad de la onda electromagnética dentro este. Así, este depende de la frecuencia de radiación y además puede cambiar dependiendo de diferentes factores, como por ejemplo la densidad, tal que a mayor densidad mayor es el valor del índice de refracción. Así mismo, como se muestra en los anexos A y B, se tiene que el cambio en el índice de refracción se relaciona con la parte real de la función dieléctrica o permitividad, y proporciona información sobre la propagación de la OEM dentro del material<sup>43</sup>.

---

<sup>43</sup> FORERO PINTO, Ana Milena. Determinación de la absorción óptica y el cambio en el índice de refracción de una nanoestructura de CdSe por el método de elementos finitos bajo la acción de campos eléctricos y magnéticos uniformes. Tesis de Maestría en Física. Universidad Industria de Santander. 2020. 45-70p

Para determinar la cantidad de arenas naturales a utilizar en función de la base lubricante recuperada a tratar, se realizaron cuatro procesos con diferente cantidad de arenas naturales, utilizando como base las dolomitas naturales en % p/p 100, 70, 50, 30. Se hizo pasar la base lubricante recuperada por las torres de absorción a un caudal de  $0,673 \frac{cm^3}{min}$ , tomando alicotas de 5 gr cada una y por medio del equipo Refractómetro RFM960 marca Bellingham + Stanley se pudo medir el cambio en los índices de refracción.

Figura 24. Cambio en el índice de refracción de las dolomitas



**Fuente:** Elaborado por el autor

## **Contenido de Metales de desgaste**

Para evaluar el proceso desde el punto de vista técnico, se analizó la remoción de metales en el proceso, según la norma ASTM D6595-00, la cual es el referente y método de prueba estándar para la determinación de metales de desgaste y contaminantes en los aceites lubricantes usados, mediante espectrometría de emisión atómica con electrodo de disco rotatorio<sup>44</sup>

Los análisis de espectrometría de emisión atómica fueron realizados por el LABORATORIO DE SERVICIOS QUÍMICOS MINERO METALÚRGICOS Y AMBIENTALES de la UIS. Los resultados obtenidos se pueden observar en la sección de análisis de resultados, en la tabla 18.

---

<sup>44</sup> HERNANDEZ PEDRAZA, Juan David; MALDONADO RODRIGUEZ, Andres Felipe. Evaluación de un proceso para la recuperación de Bases lubricantes contenidas en los aceites lubricantes usados. Tesis de Licenciatura. Fundación Universidad de América. 2020. 54p.

#### 4.4 EVALUACIÓN FINANCIERA PROCESO EXPERIMENTAL PARA LA REGENERACIÓN DE ACEITES LUBRICANTES USADOS

**Tabla 12.** Listado de equipos Proceso experimental para la regeneración de aceites lubricantes usados

| ítem | Descripción                                | Unidad | Cantidad |
|------|--|--------|----------|
| 1    | Líneas de flujo 4"                         | mL     | 800      |
| 2    | Motorreductores                            | UND    | 5        |
| 3    | Tanque cónico 250 bbls                     | UND    | 5        |
| 4    | Tanque 300 bbls                            | UND    | 1        |
| 5    | Tanque 700 bbls                            | UND    | 1        |
| 6    | Tanque 200 bbls                            | UND    | 2        |
| 7    | Tanque 100 bbls                            | UND    | 1        |
| 8    | Torre de absorción                         | UND    | 1        |
| 9    | Torre de destilación atmosférica 1000 bbls | UND    | 1        |

**Fuente:** Elaborado por el autor

**Cuadro 2.** Variables consideradas proceso planteado

|   |               |
|---|---------------|
| Días de operación/compra por Año                                    | 365           |
| CAPEX (COP)   | 4.077.710.040 |
| Depreciación línea recta  | 5 años        |
| Horizonte del proyecto  | 5 años        |
| Precio de compra del aceite lubricante usado (Gal) <sup>45</sup>    | 2.300         |
| Precio de venta base lubricante (Gal) <sup>46</sup>                 | 14.880        |
| Tasa de Impuesto de Renta   | 33,00%        |
| Tasa de Oportunidad (Tasa de Dcto.) del inversionista <sup>47</sup> | 33,00%        |

**Fuente:** Elaborado por el autor

<sup>45</sup> Lubryesp SAS

<sup>46</sup> Lubryesp SAS

<sup>47</sup> Tasa de usura bancaria en Colombia 2022

**Tabla 13.** Listado de personal operativo para el proceso experimental para la regeneración de aceites lubricantes usados

| <b>Cargo</b>              | <b>Cantidad</b> | <b>Tarifa / Hora<br/>COL\$</b> |
|---------------------------|-----------------|--------------------------------|
| HSE                       | 1               | 236.065,00                     |
| Control de calidad        | 1               | 157.376,67                     |
| Operarios                 | 4               | 157.376,67                     |
| Técnicos de mantenimiento | 2               | 183.606,11                     |
| Celador                   | 2               | 78.688,33                      |
| Oficios varios            | 1               | 52.458,89                      |
| Conductor                 | 1               | 78.688,33                      |

**Fuente:** Elaborado por el autor

**Tabla 14.** Listado de personal administrativo para el proceso experimental para la regeneración de aceites lubricantes usados

| <b>Cargo</b>   | <b>Cantidad</b> | <b>Tarifa / Hora<br/>COL\$</b> |
|----------------|-----------------|--------------------------------|
| Vendedores     | 2               | 131.147,22                     |
| Secretaria     | 1               | 78.688,33                      |
| Contador       | 1               | 183.606,11                     |
| Administrador  | 1               | 183.606,11                     |
| Jefe de planta | 1               | 236.065,00                     |
| Gerente        | 1               | 314.753,33                     |

**Fuente:** Elaborado por el autor

## Estructura del costo

### **COSTOS OPERACIONALES**

|   |               |
|---|---------------|
| Compra del aceite lubricante usado (Gal)          | 2.300         |
| Arenas absorbentes                                | 4.022.703.000 |
| Costos diluyentes                                 | 2.240.523.180 |
| Arriendo bodega                                   | 96.000.000    |
| Operación planta                                  | 487.130.000   |
| Gastos administrativos                            | 358.818.800   |
| Mantenimiento                                     | 122.331.301   |
| Costo de servicios industriales (agua, luz y gas) | 19.476.936    |

**TOTAL COSTOS OPERACIONALES** 10.824.583.217

### **OTROS COSTOS**

|                           |                    |
|---------------------------|--------------------|
| Impuesto (4X1000)         | 76.495.104         |
| ICA                       | 184.735.676        |
| <b>TOTAL OTROS COSTOS</b> | <b>261.230.780</b> |

**TOTAL COSTOS** 11.085.813.997

## Flujo de ingresos

|                                       |           |
|---------------------------------------|-----------|
| Volumen ingresa a la planta (Gal)     | 1.512.000 |
| Volumen de venta (Gal)                | 1.285.200 |
| Precio de venta base lubricante (Gal) | 14.880    |

### INGRESOS

|                          |                |
|--------------------------|----------------|
| Venta de base lubricante | 19.123.776.000 |
|--------------------------|----------------|

### UTILIDAD OPERACIONAL (EBITDA)

8.037.962.003

|                 |             |
|-----------------|-------------|
| Depreciación(-) | 815.542.008 |
|-----------------|-------------|

### UTILIDAD ANTES DE IMPUESTOS

7.222.419.995

|                         |               |
|-------------------------|---------------|
| Impuesto de renta (33%) | 2.383.398.598 |
|-------------------------|---------------|

### UTILIDAD NETA

4.839.021.396

|  |             |
|--|-------------|
| <sup>48</sup> Costo Financiero del Crédito Bancario (21,28%) | 867.736.697 |
|--|-------------|

### INDICADORES FINANCIEROS

|     |      |
|-----|------|
| TIR | 118% |
|-----|------|

|         |          |
|---------|----------|
| PAYBACK | 10 meses |
|---------|----------|

|                             |     |
|-----------------------------|-----|
| TASA INTERNA DE OPORTUNIDAD | 33% |
|-----------------------------|-----|

|     |               |
|-----|---------------|
| VPN | 7.589.893.631 |
|-----|---------------|

---

<sup>48</sup> Interés Bancario Corriente efectivo anual para la modalidad de crédito de consumo y ordinario. Resolución 0801 del 30 de junio de 2022, la Superintendencia Financiera de Colombia

**ANALISIS DE SENSIBILIDAD DEL VPN DEL PROCESO EXPERIMENTAL PARA LA REGENERACIÓN DE ACEITES LUBRICANTES USADOS**

**VARIABLES SENSIBILIZADAS**

---

Precio de compra del aceite lubricante usado (Gal)  
 Operación planta  
 Gastos administrativos  
 Mantenimiento  
 Precio de venta base lubricante (Gal)  
 Arenas absorbentes  
 Costos diluyentes

---

| <b>Cambios en las variables</b> | <b>Precio de compra del aceite lubricante usado (Gal)</b> |                |
|---------------------------------|---|----------------|
|                                 |   | 7.589.893.631  |
| 50%                             | 1.150   | 10.271.879.027 |
| 60%                             | 1.380   | 9.735.481.947  |
| 70%                             | 1.610   | 9.199.084.868  |
| 80%                             | 1.840   | 8.662.687.789  |
| 90%                             | 2.070   | 8.126.290.710  |
| 100%                            | 2.300   | 7.589.893.631  |
| 110%                            | 2.530   | 7.053.496.551  |
| 120%                            | 2.760   | 6.517.099.472  |
| 130%                            | 2.990   | 5.980.702.393  |
| 140%                            | 3.220   | 5.444.305.314  |
| 150%                            | 3.450   | 4.907.908.235  |

**Operación planta**

|             |               |
|-------------|---------------|
|             | 7.589.893.631 |
| 243.565.000 | 7.988.099.785 |
| 292.278.000 | 7.908.458.555 |
| 340.991.000 | 7.828.817.324 |
| 389.704.000 | 7.749.176.093 |
| 438.417.000 | 7.669.534.862 |
| 487.130.000 | 7.589.893.631 |
| 535.843.000 | 7.510.252.400 |
| 584.556.000 | 7.430.611.169 |
| 633.269.000 | 7.350.969.938 |
| 681.982.000 | 7.271.328.707 |
| 730.695.000 | 7.191.687.476 |

**Gastos administrativos**

|             |               |
|-------------|---------------|
|             | 7.589.893.631 |
| 179.409.400 | 7.883.211.338 |
| 215.291.280 | 8.000.538.421 |
| 251.173.160 | 8.053.335.608 |
| 287.055.040 | 8.077.974.295 |
| 322.936.920 | 8.087.829.770 |
| 358.818.800 | 8.087.829.770 |
| 394.700.680 | 8.078.959.843 |
| 430.582.560 | 8.059.446.002 |
| 466.464.440 | 8.024.321.090 |
| 502.346.320 | 7.963.437.907 |
| 538.228.200 | 7.856.892.339 |

**Mantenimiento**

|             |               |
|-------------|---------------|
|             | 7.589.893.631 |
| 61.165.651  | 7.689.893.789 |
| 73.398.781  | 7.729.893.852 |
| 85.631.911  | 7.747.893.881 |
| 97.865.041  | 7.756.293.894 |
| 110.098.171 | 7.759.653.899 |
| 122.331.301 | 7.759.653.899 |
| 134.564.431 | 7.756.629.894 |
| 146.797.561 | 7.749.977.084 |
| 159.030.692 | 7.738.002.025 |
| 171.263.822 | 7.717.245.256 |
| 183.496.952 | 7.680.920.911 |

**Precio de venta base  
lubricante (Gal)**

|        |                |
|--------|----------------|
|        | 7.589.893.631  |
| 7.440  | -7.829.361.195 |
| 8.928  | -4.745.510.230 |
| 10.416 | -1.661.659.265 |
| 11.904 | 1.422.191.700  |
| 13.392 | 4.506.042.665  |
| 14.880 | 7.589.893.631  |
| 16.368 | 10.673.744.596 |
| 17.856 | 13.757.595.561 |
| 19.344 | 16.841.446.526 |
| 20.832 | 19.925.297.491 |
| 22.320 | 23.009.148.457 |

**Arenas absorbentes**

|             |                |
|-------------|----------------|
|             | 7.589.893.631  |
| 167.612.625 | 10.878.266.537 |
| 201.135.150 | 10.220.591.956 |
| 234.657.675 | 9.562.917.374  |
| 268.180.200 | 8.905.242.793  |
| 301.702.725 | 8.247.568.212  |
| 335.225.250 | 7.589.893.631  |
| 368.747.775 | 6.932.219.049  |
| 402.270.300 | 6.274.544.468  |
| 435.792.825 | 5.616.869.887  |
| 469.315.350 | 4.959.195.305  |
| 502.837.875 | 4.301.520.724  |

**Costos diluyentes**

|             |               |
|-------------|---------------|
|             | 7.589.893.631 |
| 93.355.133  | 9.421.417.291 |
| 112.026.159 | 9.055.112.559 |
| 130.697.186 | 8.688.807.827 |
| 149.368.212 | 8.322.503.095 |
| 168.039.239 | 7.956.198.363 |
| 186.710.265 | 7.589.893.631 |
| 205.381.292 | 7.223.588.899 |
| 224.052.318 | 6.857.284.167 |
| 242.723.345 | 6.490.979.435 |
| 261.394.371 | 6.124.674.703 |
| 280.065.398 | 5.758.369.971 |

**Volumen de venta base  
lubricante (Gal)**

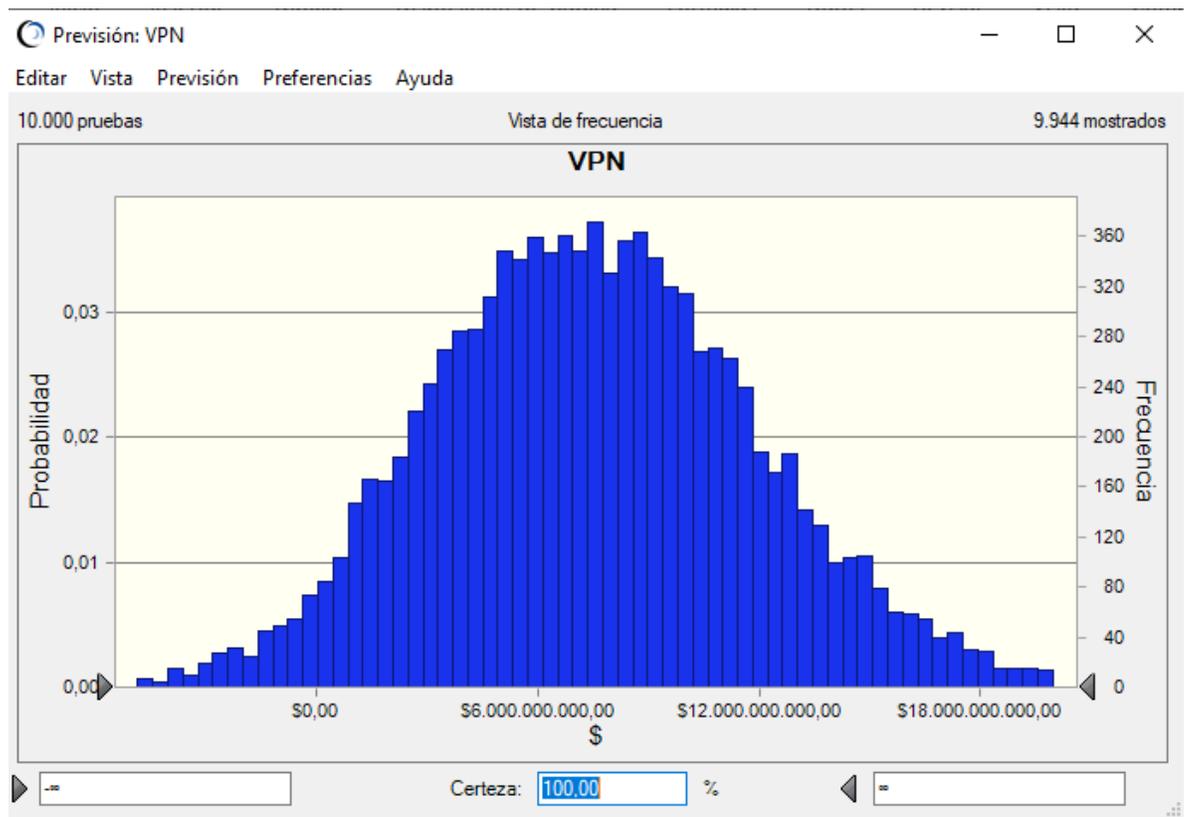
|           |                |
|-----------|----------------|
|           | 7.589.893.631  |
| 642.600   | -7.829.361.195 |
| 771.120   | -4.745.510.230 |
| 899.640   | -1.661.659.265 |
| 1.028.160 | 1.422.191.700  |
| 1.156.680 | 4.506.042.665  |
| 1.285.200 | 7.589.893.631  |
| 1.413.720 | 10.673.744.596 |
| 1.542.240 | 13.757.595.561 |
| 1.670.760 | 16.841.446.526 |
| 1.799.280 | 19.925.297.491 |
| 1.927.800 | 23.009.148.457 |

El punto de equilibrio financiero se encuentra en 968.890 Galones por año.

## ANÁLISIS DE SENSIBILIDAD DEL VPN MEDIANTE SIMULACIÓN, DEL PROCESO EXPERIMENTAL PARA LA REGENERACIÓN DE ACEITES LUBRICANTES USADOS

Para realizar el análisis de sensibilidad del VPN mediante simulación, se utiliza el software Crystal Ball, en donde se definieron las variables: Volumen de venta (Gal), Precio de venta de la base lubricante (Gal) y se escoge una distribución normal para cada una de ellas; adicionalmente, se define el VPN como variable a pronosticar y se indica en 10.000 el número de simulaciones.

Figura 25. Resultados análisis de sensibilidad del VPN en Crystal Ball del proceso experimental para la regeneración de aceites lubricantes usados



Fuente: Elaborado por el autor

## 4.5 EVALUACIÓN FINANCIERA PROCESO DE DESTILACIÓN AL VACÍO

**Tabla 15.** Listado de equipos proceso de destilación al vacío

| ítem | Descripción                             | Unidad | Cantidad |
|------|---|--------|----------|
| 1    | Líneas de flujo 4"                      | mL     | 900      |
| 2    | Tanque 2000 bbls                        | UND    | 1        |
| 3    | Tanque 1500 bbls                        | UND    | 1        |
| 4    | Tanque 1000 bbls                        | UND    | 1        |
| 5    | Torre de destilación al vacío 2000 bbls | UND    | 1        |

**Fuente:** Elaborado por el autor

**Cuadro 3.** Variables consideradas proceso de destilación al vacío

|   |               |
|---|---------------|
| Días de operación/compra por Año                                    | 365           |
| CAPEX (COP)   | 4.981.440.000 |
| Depreciación línea recta  | 5 años        |
| Horizonte del proyecto  | 5 años        |
| Precio de compra del aceite lubricante usado (Gal) <sup>49</sup>    | 2.300         |
| Precio de venta base lubricante (Gal) <sup>50</sup>                 | 10.800        |
| Tasa de Impuesto de Renta   | 33,00%        |
| Tasa de Oportunidad (Tasa de Dcto.) del inversionista <sup>51</sup> | 33,00%        |

**Fuente:** Elaborado por el autor

<sup>49</sup> Lubryesp SAS

<sup>50</sup> Lubryesp SAS

<sup>51</sup> Tasa de usura en Colombia 2022

**Tabla 16.** Listado de personal operativo proceso de destilación al vacío

| <b>Cargo</b>              | <b>Cantidad</b> | <b>Tarifa / Hora<br/>COL\$</b> |
|---------------------------|-----------------|--------------------------------|
| HSE                       | 1               | 236.065,00                     |
| Control de calidad        | 1               | 157.376,67                     |
| Operarios                 | 4               | 157.376,67                     |
| Técnicos de mantenimiento | 2               | 183.606,11                     |
| Celador                   | 2               | 78.688,33                      |
| Oficios varios            | 1               | 52.458,89                      |
| Conductor                 | 1               | 78.688,33                      |

**Fuente:** Elaborado por el autor

**Tabla 17.** Listado de personal administrativo proceso de destilación al vacío

| <b>Cargo</b>   | <b>Cantidad</b> | <b>Tarifa / Hora<br/>COL\$</b> |
|----------------|-----------------|--------------------------------|
| Vendedores     | 2               | 131.147,22                     |
| Secretaria     | 1               | 78.688,33                      |
| Contador       | 1               | 183.606,11                     |
| Administrador  | 1               | 183.606,11                     |
| Jefe de planta | 1               | 236.065,00                     |
| Gerente        | 1               | 314.753,33                     |

**Fuente:** Elaborado por el autor

## Estructura del costo

### **COSTOS OPERACIONALES**

|   |               |
|---|---------------|
| Compra de aceite lubricante usado                 | 6.342.480.000 |
| Arriendo bodega                                   | 96.000.000    |
| Operación planta                                  | 619.326.400   |
| Gastos administrativos                            | 453.244.800   |
| Mantenimiento                                     | 149.443.200   |
| Costo de servicios industriales (agua, luz y gas) | 33.793.920    |

**TOTAL COSTOS OPERACIONALES** 7.694.288.320

### **OTROS COSTOS**

|                   |             |
|-------------------|-------------|
| Impuesto (4X1000) | 65.520.576  |
| ICA               | 158.232.191 |

**TOTAL OTROS COSTOS** 223.752.767

**TOTAL COSTOS** 7.918.041.087

## Flujo de ingresos

|                                       |           |
|---------------------------------------|-----------|
| Volumen ingresa a la planta (Gal)     | 2.757.600 |
| Volumen de venta (Gal)                | 1.516.680 |
| Precio de venta base lubricante (Gal) | 10.800    |

### INGRESOS

|                          |                |
|--------------------------|----------------|
| Venta de base lubricante | 16.380.144.000 |
|--------------------------|----------------|

### UTILIDAD OPERACIONAL (EBITDA)

8.462.102.913

|                 |             |
|-----------------|-------------|
| Depreciación(-) | 996.288.000 |
|-----------------|-------------|

### UTILIDAD ANTES DE IMPUESTOS

7.465.814.913

|                         |             |
|-------------------------|-------------|
| Impuesto de renta (33%) | 996.288.000 |
|-------------------------|-------------|

### UTILIDAD NETA

5.002.095.992

|  |               |
|--|---------------|
| <sup>52</sup> Costo Financiero del Crédito Bancario (21,28%) | 1.060.050.432 |
|--|---------------|

### INDICADORES FINANCIEROS

|     |     |
|-----|-----|
| TIR | 96% |
|-----|-----|

|         |          |
|---------|----------|
| PAYBACK | 12 meses |
|---------|----------|

|                             |     |
|-----------------------------|-----|
| TASA INTERNA DE OPORTUNIDAD | 33% |
|-----------------------------|-----|

|     |               |
|-----|---------------|
| VPN | 6.660.125.787 |
|-----|---------------|

---

<sup>52</sup> Interés Bancario Corriente efectivo anual para la modalidad de crédito de consumo y ordinario. Resolución 0801 del 30 de junio de 2022, la Superintendencia Financiera de Colombia.

**ANALISIS DE SENSIBILIDAD DEL VPN DEL PROCESO DE DESTILACION AL VACIO**

**Variables a sensibilizar**

---

Precio de compra del aceite lubricante usado (Gal)  
 Operación planta  
 Gastos administrativos  
 Mantenimiento  
 Precio de venta base lubricante (Gal)

---

| <b>Cambios en las variables</b> | <b>Precio de compra del aceite lubricante usado (Gal)</b> |                |
|---------------------------------|---|----------------|
|                                 |   | 6.660.125.787  |
| 50%                             | 1.150   | 11.844.808.671 |
| 60%                             | 1.380   | 10.807.872.094 |
| 70%                             | 1.610   | 9.770.935.517  |
| 80%                             | 1.840   | 8.733.998.941  |
| 90%                             | 2.070   | 7.697.062.364  |
| 100%                            | 2.300   | 6.660.125.787  |
| 110%                            | 2.530   | 5.623.189.210  |
| 120%                            | 2.760   | 4.586.252.633  |
| 130%                            | 2.990   | 3.549.316.057  |
| 140%                            | 3.220   | 2.512.379.480  |
| 150%                            | 3.450   | 1.475.442.903  |

**Operación planta**

---

|             |               |
|-------------|---------------|
|             | 6.660.125.787 |
| 309.663.200 | 7.166.396.360 |
| 371.595.840 | 7.065.142.246 |
| 433.528.480 | 6.963.888.131 |
| 495.461.120 | 6.862.634.016 |
| 557.393.760 | 6.761.379.902 |
| 619.326.400 | 6.660.125.787 |
| 681.259.040 | 6.558.871.672 |
| 743.191.680 | 6.457.617.558 |
| 805.124.320 | 6.356.363.443 |
| 867.056.960 | 6.255.109.328 |
| 928.989.600 | 6.153.855.214 |

---

**Gastos administrativos**

---

|             |               |
|-------------|---------------|
|             | 6.660.125.787 |
| 226.622.400 | 7.030.632.364 |
| 271.946.880 | 6.956.531.049 |
| 317.271.360 | 6.882.429.733 |
| 362.595.840 | 6.808.328.418 |
| 407.920.320 | 6.734.227.102 |
| 453.244.800 | 6.660.125.787 |
| 498.569.280 | 6.586.024.471 |
| 543.893.760 | 6.511.923.156 |
| 589.218.240 | 6.437.821.841 |
| 634.542.720 | 6.363.720.525 |
| 679.867.200 | 6.289.619.210 |

---

**Mantenimiento**

---

|             |               |
|-------------|---------------|
|             | 6.660.125.787 |
| 74.721.600  | 6.782.288.663 |
| 89.665.920  | 6.831.153.814 |
| 104.610.240 | 6.853.143.132 |
| 119.554.560 | 6.863.404.814 |
| 134.498.880 | 6.867.509.486 |
| 149.443.200 | 6.867.509.486 |
| 164.387.520 | 6.863.815.281 |
| 179.331.840 | 6.855.688.029 |
| 194.276.160 | 6.841.058.976 |
| 209.220.480 | 6.815.701.950 |
| 224.164.800 | 6.771.327.155 |

---

**Precio de venta base  
lubricante (Gal)**

---

|        |                |
|--------|----------------|
|        | 6.660.125.787  |
| 5.400  | -6.546.973.816 |
| 6.480  | -3.905.553.896 |
| 7.560  | -1.264.133.975 |
| 8.640  | 1.377.285.946  |
| 9.720  | 4.018.705.866  |
| 10.800 | 6.660.125.787  |
| 11.880 | 9.301.545.708  |
| 12.960 | 11.942.965.628 |
| 14.040 | 14.584.385.549 |
| 15.120 | 17.225.805.470 |
| 16.200 | 19.867.225.390 |

---

**Volumen de venta base  
lubricante (Gal)**

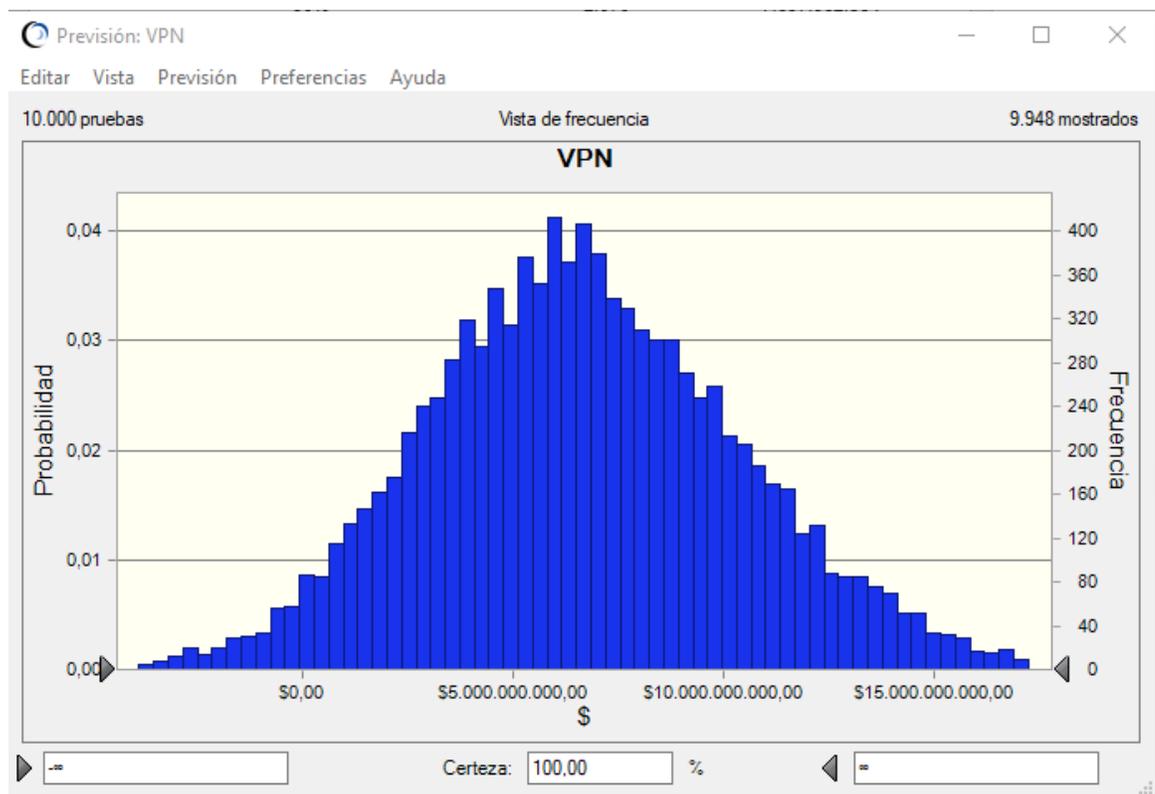
|           |                |
|-----------|----------------|
|           | 6.660.125.787  |
| 758.340   | -6.546.973.816 |
| 910.008   | -3.905.553.896 |
| 1.061.676 | -1.264.133.975 |
| 1.213.344 | 1.377.285.946  |
| 1.365.012 | 4.018.705.866  |
| 1.516.680 | 6.660.125.787  |
| 1.668.348 | 9.301.545.708  |
| 1.820.016 | 11.942.965.628 |
| 1.971.684 | 14.584.385.549 |
| 2.123.352 | 17.225.805.470 |
| 2.275.020 | 19.867.225.390 |

El punto de equilibrio financiero se encuentra en 1.134.261 Galones por año

## ANALISIS DE SENSIBILIDAD DEL VPN MEDIANTE SIMULACION, DEL PROCESO DE DESTILACION AL VACIO

Para realizar el análisis de sensibilidad del VPN mediante simulación, se utiliza el software Crystal Ball, en donde se definieron las variables: Volumen de venta (Gal), Precio de venta de la base lubricante (Gal) y se escoge una distribución normal para cada una de ellas; adicionalmente, se define el VPN como variable a pronosticar y se indica en 10.000 el número de simulaciones.

Figura 26. Resultados análisis de sensibilidad del VPN en Crystal Ball del proceso de destilación al vacío



Fuente: Elaborado por el autor

## **4.6 EVALUACIÓN AMBIENTAL MEDIANTE LA METODOLOGÍA DEL ANÁLISIS DEL CICLO DE VIDA**

### **ANÁLISIS DEL CICLO DE VIDA**

Como se describió en el numeral 2.5.2. El (ACV) permite comparar entre procesos de un mismo producto o entre productos de diferentes materiales, por lo que dicha información tiene aplicación directa en el diseño y desarrollo de los productos, la mejora continua de los procesos, la planificación estratégica, el marketing verde, así como en el desarrollo de políticas públicas.

Con el fin de realizar una evaluación ambiental del proceso para la valoración de aceites lubricantes usados mediante la recuperación de base parafínicas y compararlo con el proceso de destilación al vacío y con la valoración energética de los aceites lubricante usados mediante el uso como combustible. Se utilizará la metodología del Análisis de ciclo de vida (ACV).

### **Evaluación del ciclo de vida**

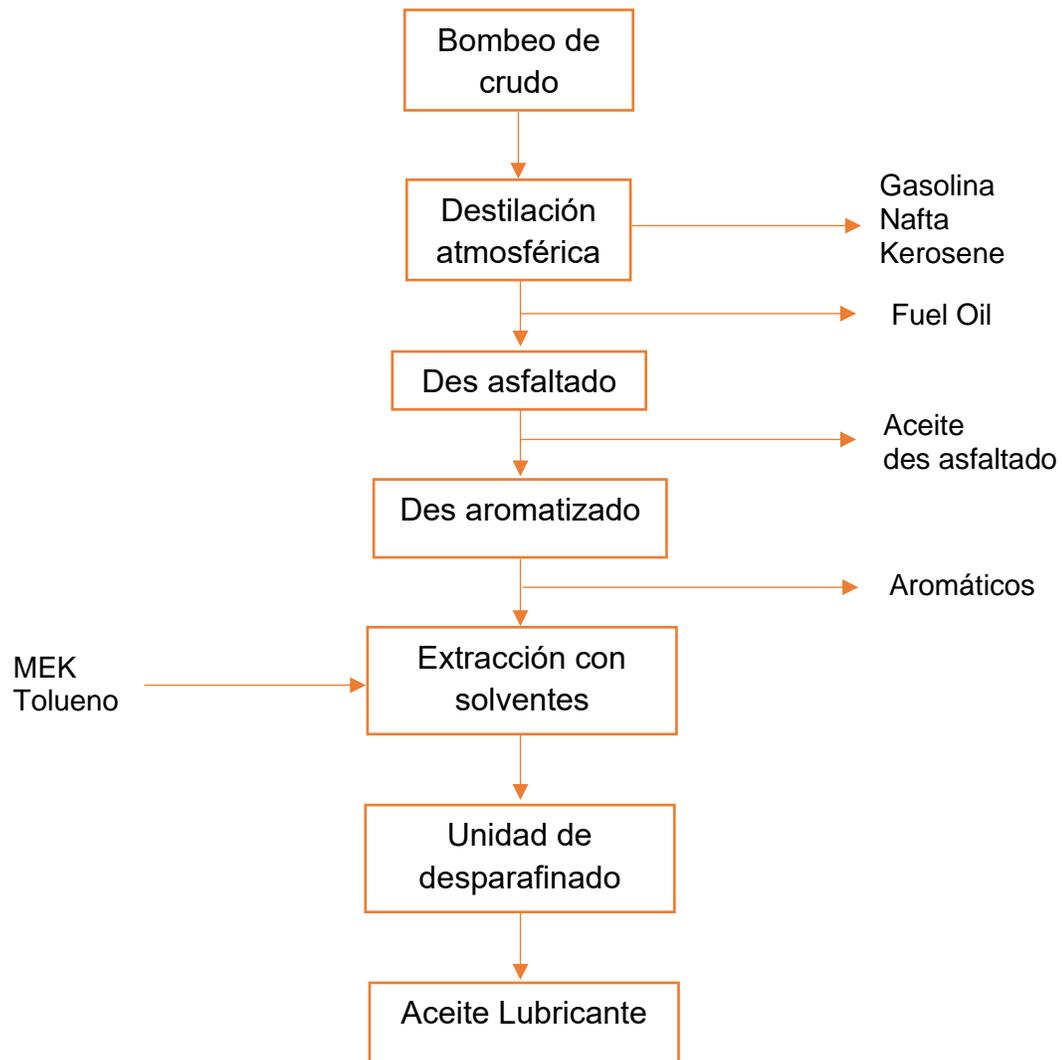
En Hassanain, E. M., Yacout, D. M., Metwally, M. A., & Hassouna, M. S. (2017)<sup>53</sup> realizan una evaluación de los impactos de la regeneración de aceites lubricantes usados (ALU) mediante la recuperación de bases lubricantes por medio de un proceso de destilación al vacío; en el país consumidor aceite más grande en África, Egipto. La principal pregunta fue: ¿Cuáles son los impactos de las diferentes estrategias de gestión de residuos para la recuperación de aceite lubricante usado y qué estrategia de gestión de residuos es más ecológica? Se empleó la evaluación

---

<sup>53</sup> HASSANAIN, Eslam M., et al. Life cycle assessment of waste strategies for used lubricating oil. The International Journal of Life Cycle Assessment, vol. 22, no 8. 2017

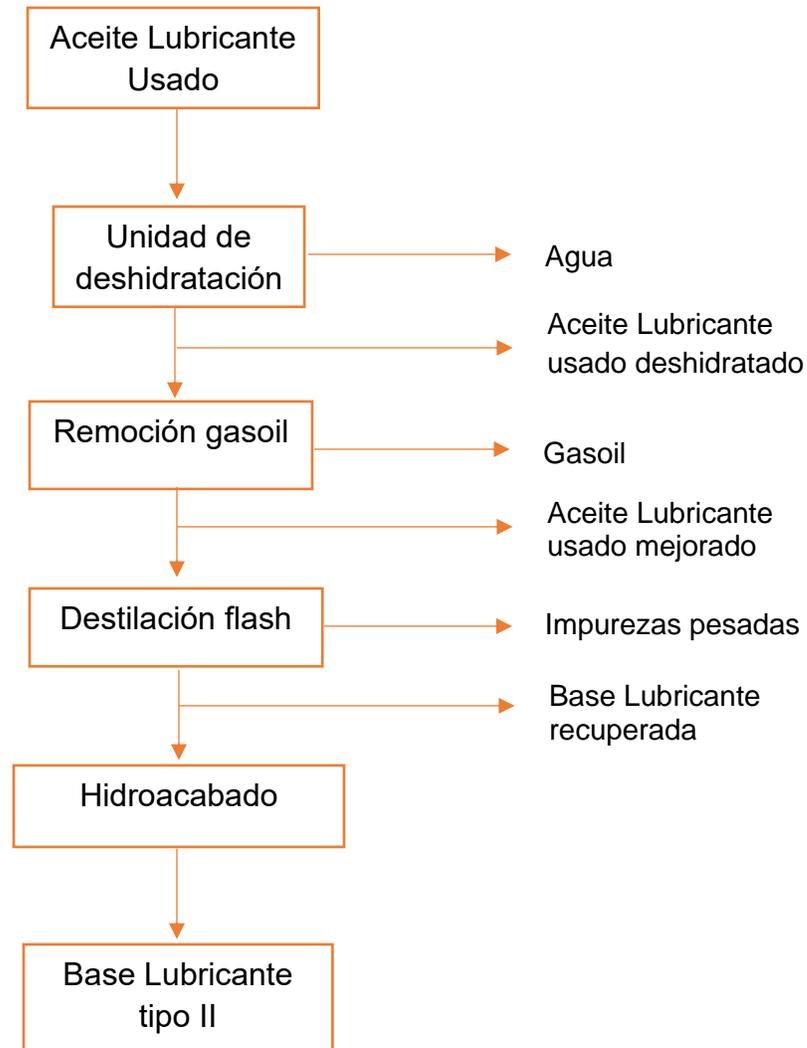
del ciclo de vida (LCA) para modelar los impactos ambientales de la gestión de dos residuos enfoques para la recuperación de aceite lubricante usado en Egipto.

Figura 27. Ciclo de vida de la Cuna a la Puerta (Cradle to Gate) Aceite Lubricante para uso automotriz



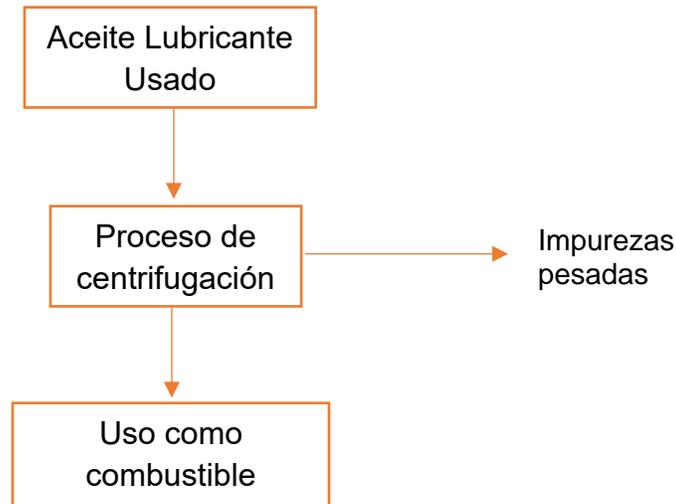
**Fuente:** HASSANAIN, Eslam M., et al. Life cycle assessment of waste strategies for used lubricating oil. *The International Journal of Life Cycle Assessment*, vol. 22, no 8. 2017p. 1234.

**Figura 28.** Ciclo de vida de la Cuna a la Puerta (Cradle to Gate) Aceite Lubricante Usado con valoración de aceites lubricantes usados mediante la recuperación de base lubricantes tipo II



**Fuente:** HASSANAIN, Eslam M., et al. Life cycle assessment of waste strategies for used lubricating oil. *The International Journal of Life Cycle Assessment*, vol. 22, no 8. 2017p. 1234.

Figura 29. Ciclo de vida de la Cuna a la Puerta (Cradle to Gate) Aceite Lubricante Usado con valoración energética en el uso como combustible



**Fuente:** HASSANAIN, Eslam M., et al. Life cycle assessment of waste strategies for used lubricating oil. *The International Journal of Life Cycle Assessment*, vol. 22, no 8. 2017p. 1234.

### Definición del objetivo y alcance del sistema

El objetivo del presente estudio fue evaluar los impactos ambientales de dos estrategias de gestión de residuos para la recuperación de Aceite Lubricante Usado (ALU) con el fin de recomendar la estrategia más respetuosa con el medio ambiente. Las dos estrategias de gestión de residuos fueron el reciclaje por re-refinado y uso como combustible.

La evaluación comparativa del ciclo de vida se basó en tres fases:

1. La evaluación ambiental de la primera estrategia para el re-refinamiento del ALU
2. La evaluación ambiental de la segunda estrategia para la co-combustión del ALU
3. La comparación entre las dos estrategias.

Se aplica el proceso de cuantificación de energía, requerimientos de materias primas, transporte, emisiones a la atmósfera, emisiones al agua y residuos sólidos para todo el ciclo de vida de los aceites lubricantes desde el transporte del crudo hasta el proceso de recuperación.

El ACV se evalúa con base en la metodología de evaluación de impacto Eco-Indicator 99. Se consideraron las siguientes categorías de impacto: potencial de calentamiento global (GWP), potencial de acidificación (AP), potencial de eutrofización (EP), potencial carcinógeno (CP), potencial de ecotoxicidad (ETP), potencial de formación inorgánica respiratoria (RIFP), potencial de formación orgánica respiratoria (ROFP), potencial de radiación (RP), agotamiento de la capa de ozono (OLD), agotamiento de minerales (MD), uso de la tierra (LU) y agotamiento de combustibles fósiles (FFD). Las entradas del proceso de recuperación de ALU se evaluaron en un análisis de puntaje único para asignar los impactos de cada entrada a la categoría de impacto correspondiente. La evaluación de las categorías de impacto se expresó en mega puntos (mPt) para evaluar el impacto de un producto o proceso, más puntos significa peor carga ambiental. De acuerdo con la norma ISO 14044: 2006, se utilizó un criterio de corte del 1%.

Se aplica ACV para la producción de 1000 kg de aceite lubricante a partir de crudo Balyiem. Se supuso que el bombeo de crudo desde las unidades de extracción hasta las unidades de refinería era de 350 km. Los procesos de producción (ver Fig. 25) incluyeron los siguientes:

- a. Destilación atmosférica de crudo para la producción de fuel oil como producto principal.
- b. Destilación al vacío para la producción de residuos de vacío.
- c. Unidad de desasfaltado de propano para la producción de desasfaltado aceite.
- d. Unidad de extracción con solventes para eliminar compuestos aromáticos para la producción de aceite refinado
- e. Unidad de desparafinado para la producción de material terminado (aceite desparafinado). Este material terminado (aceite desparafinado) se mezcla con

aditivos como antioxidantes, depresores del punto de fluidez, viscosidad mejoradores de índice, detergentes y dispersantes para producir el producto final.

Se asumió que el transporte es insignificante al estar distribuido a lo largo de la vida útil de dicha planta.

El ACV realizado, fue un Análisis de Ciclo de Vida puerta a puerta y los límites del sistema los podemos observar en las figuras 25, 26 y 27.

### **Recopilación de datos, incertidumbre e inventario del ciclo de vida**

El análisis del inventario del ciclo de vida (AICV) se realizó con SimaPro 7.1. Los datos de primer plano para el análisis se obtuvieron de la revisión de la literatura, incluidos los estándares de la EPA de EE. UU. para Aceites Lubricantes Usados, mediciones en el sitio y datos recopilados durante el período de 2012 a 2015. Los datos de fondo se crearon utilizando perfiles ecológicos de la base de datos Eco-Invent para todos los materiales y procesos de entrada necesarios. El resumen del inventario para la recuperación de 1000 kg de aceite lubricante usado se presenta en la Tabla 14.

Este estudio comenzó modelando los impactos del proceso de re-refinación del ALU egipcio. Luego, estos impactos se compararon con los impactos de la combustión conjunta en calentadores de espacio como sustituto de las fuentes de energía primaria de fuel oil o gas natural. La co-combustión del ALU en el calentador de espacio (quemador atomizador) genera diferentes cantidades de componentes de contaminación del aire ambiental, p. CO, CO<sub>2</sub>, SO<sub>x</sub>, NO<sub>x</sub>, PM < 10 µg y metales pesados. Se señaló que los datos presentados en este estudio de caso están sujetos a varias incertidumbres. Es posible que los datos disponibles en la base de datos de ACV no representen exactamente la cantidad que se está estudiando debido a la ubicación geográfica/regional del área de estudio de caso en Egipto. Los datos de los materiales básicos utilizados en el estudio se consideran para la región

de Europa (base de datos Ecoinvent v2), que representará el caso de estudio solo si todas las materias primas utilizadas se importan de Europa. Los datos de energía para la generación de electricidad y vapor también pueden variar según la base de datos utilizada. Los datos eléctricos utilizados en este estudio de caso fueron la electricidad generada en África (base de datos IDEMAT 2001). Estos datos representan el uso promedio de combustible y las emisiones para la generación total de energía para todo el continente. En cuanto al vapor, se utilizó el promedio de la fuente de vapor en el sitio (Industry Data 2.0 Database). Esta fuente de vapor es adecuada para el caso de estudio actual, ya que representa el vapor producido en el sitio.

### **Resultados del análisis del ciclo de vida**

Los resultados del ACV se presentan en la Tabla 15. Se puede notar que la valoración por re-refinado de los aceites lubricantes usados es la estrategia más ecológica. El consumo de combustibles fue el principal contribuyente a los impactos ambientales generales de ambas estrategias. El segundo mayor impacto fue en el efecto respiratorio humano debido a sustancias inorgánicas. Los procesos de desasfaltado, desaromatización y desparafinado son los principales contribuyentes a las categorías anteriores debido al consumo de combustibles en estos procesos y al uso de materiales peligrosos y solventes tóxicos como metiletilcetona (MEK), tolueno y furfural. Estos disolventes tienen un potencial de toxicidad muy alto tanto para la salud humana como para el medio ambiente. Por otro lado, los procesos de destilación atmosférica y al vacío no parecen ejercer un efecto significativo en el ciclo de vida. Casi no se detectaron impactos en las siguientes categorías: potencial de radiación, agotamiento de la capa de ozono, agotamiento de minerales o efecto respiratorio humano debido a sustancias orgánicas. La razón de no detectar impactos en las categorías anteriores es que ambas estrategias de residuos no generan ninguna sustancia que pueda afectar la capa de ozono o causar radiación. Ni las sustancias orgánicas ni los minerales se utilizan en ambos enfoques de manejo de desechos.

**Tabla 18.** Resumen del inventario para la recuperación de 1000 kg de aceite lubricante usado

|   | Unidad         | Unidad de Procesos      |                      |                                   |                                     |                         |                     |
|---|----------------|-------------------------|----------------------|-----------------------------------|-------------------------------------|-------------------------|---------------------|
|   |                | Destilación atmosférica | Destilación al vacío | Unidad de desasfaltado de propano | Proceso de extracción con solventes | Unidad de desparafinado | Unidad de reciclaje |
| <b>Entradas</b>                                 |                |                         |                      |                                   |                                     |                         |                     |
| <b>Recursos</b>                                 |                |                         |                      |                                   |                                     |                         |                     |
| Petróleo crudo balyiem                          | Kg             | 11.250                  |                      |                                   |                                     |                         |                     |
| Agua de refrigeración (agua de mar)             | m <sup>3</sup> | 2,25                    | 2,63                 | 7,47                              | 8,00                                | 2,56                    | 25,00               |
| Bombas agua de refrigeración (agua superficial) | m <sup>3</sup> | 0,53                    | 0,39                 | 1,21                              | 0,92                                | 0,59                    | 2,40                |
| <b>Material/combustible</b>                     |                |                         |                      |                                   |                                     |                         |                     |
| Agua desionizada                                | m <sup>3</sup> | 0,20                    |                      |                                   |                                     |                         |                     |
| Petróleo ligero                                 | Kg             | 85                      |                      |                                   |                                     |                         |                     |
| Gas natural                                     | m <sup>3</sup> | 0,05                    | 0,30                 | 0,28                              | 0,28                                | 0,23                    | 0,17                |
| Amoníaco  | Kg             | 0,41                    | 0,92                 |                                   |                                     |                         |                     |
| Hidróxido de sodio                              | Kg             | 0,82                    |                      |                                   |                                     |                         | 0,02                |
| dimetilamina                                    | Kg             | 0,82                    | 0,34                 |                                   |                                     |                         | 9,33                |
| Gasolina  | Kg             |                         | 7550                 |                                   |                                     |                         |                     |
| Residuos de vacío                               | Kg             |                         |                      | 4120                              |                                     |                         |                     |
| Sulfato de dimetilo                             | Kg             |                         |                      | 0,23                              |                                     |                         |                     |

|   |      |         |       |       |       |       |       |       |
|---|------|---------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
| Propano                                 | Kg   |         |       | 6     |       |       | 1,20  |       |
| Aceite desasfaltado                     | Kg   |         |       |       | 1570  |       |       |       |
| Bicarbonato de amonio                   | Kg   |         |       |       | 5,00  |       |       |       |
| N-metil-2-pirrolidona                   | Kg   |         |       |       | 1,90  |       |       |       |
| Aceite refinado                         | Kg   |         |       |       |       |       | 11,90 |       |
| Metiletilcetona                         | Kg   |         |       |       |       |       | 3,80  |       |
| Tolueno                                 | Kg   |         |       |       |       |       | 3,40  |       |
| <b>Aceite lubricante usado</b>          | Kg   |         |       |       |       |       |       | 10,00 |
| Agua suave                              | Kg   |         |       |       |       |       |       | 30,66 |
| Hidrógeno                               | Kg   |         |       |       |       |       |       | 3,47  |
| <b>Electricidad/calor</b>               |      |         |       |       |       |       |       |       |
| Bombeo de crudo a unidades de refinería | t-Km | 3937,50 |       |       |       |       |       |       |
| Vapor                                   | Kg   | 270     | 625   | 730   | 785   | 760   | 4000  |       |
| Electricidad                            | MWh  | 103     | 23,43 | 68,66 | 10,47 | 91,95 | 16,13 |       |
| Combustoleo (fuente de calor)           | MJ   |         |       |       |       |       |       | 98,92 |
| <b>Salidas</b>                          |      |         |       |       |       |       |       |       |
| <b>Productos y coproductos</b>          |      |         |       |       |       |       |       |       |
| Gasolina                                | Kg   | 7550    |       |       |       |       |       |       |
| Gasóleo                                 | Kg   | 1350    |       |       |       |       |       | 93    |
| Queroseno                               | Kg   | 840     |       |       |       |       |       |       |
| Nafta                                   | Kg   | 1350    |       |       |       |       |       |       |
| Gases + gasolina                        | Kg   | 160     |       |       |       |       |       |       |
| Residuos de vacío                       | Kg   |         | 4120  |       |       |       |       |       |
| Aceite negro                            | Kg   |         | 100   |       |       |       |       |       |

|   |                |      |      |      |      |      |       |     |
|---|----------------|------|------|------|------|------|-------|-----|
| Parafinas                                     | Kg             |      |      | 1700 |      |      |       |     |
| Aceite de husillo                             | Kg             |      |      | 130  |      |      |       |     |
| Gasóleo de vacío                              | Kg             |      |      | 1500 |      |      |       |     |
| Aceite desasfaltado                           | Kg             |      |      |      | 1570 |      |       |     |
| Alquitrán PD                                  | Kg             |      |      |      | 2630 |      |       |     |
| Aceite refinado                               | Kg             |      |      |      |      | 1190 |       |     |
| Solventes recuperados                         | Kg             |      |      |      |      | 380  |       |     |
| Parafinas                                     | Kg             |      |      |      |      |      | 800   |     |
| Cera  | Kg             |      |      |      |      |      | 390   |     |
| Aceite lubricante                             | Kg             |      |      |      |      |      |       | 762 |
| <b>Emisiones al aire</b>                      |                |      |      |      |      |      |       |     |
| Dióxido de carbono                            | Kg             | 13   | 30   | 176  | 105  | 164  | 590   |     |
| Dióxido de azufre                             | Kg             | 0,02 |      |      |      |      | 0,01  |     |
| Dióxido de nitrógeno                          | Kg             | 2,00 | 0,05 | 0,23 | 0,32 | 0,27 | 2,16  |     |
| Partículas <10 µm                             | Kg             | 6,13 | 2,36 | 1,90 | 1,10 | 2,06 | 9,50  |     |
| <b>Descarga de líquidos</b>                   |                |      |      |      |      |      |       |     |
| Tratamiento de aguas residuales a efluentes   | m <sup>3</sup> | 2,00 | 1,90 | 5,91 | 4,45 | 2,88 | 10,27 |     |
| Aguas residuales para remoción e incineración | m <sup>3</sup> |      |      |      |      |      | 0,09  |     |
| <b>Residuos sólidos</b>                       |                |      |      |      |      |      |       |     |
| Lodos de aceite (reciclados)                  | Kg             |      |      |      |      |      | 92,27 |     |

**Fuente:** HASSANAIN, Eslam M., et al. Life cycle assessment of waste strategies for used lubricating oil. *The International Journal of Life Cycle Assessment*, vol. 22, no 8. 2017. 1235-1236p.

Para realizar la Evaluación ambiental mediante el Análisis del Ciclo de Vida del Proceso para la regeneración de aceites lubricantes usados, se llevará a cabo el procedimiento empleado anteriormente para la Evaluación ambiental mediante el Análisis del Ciclo de Vida de las dos estrategias de gestión de residuos expuestas, el reciclaje por re-refinado (proceso de destilación al vacío) y uso como combustible.

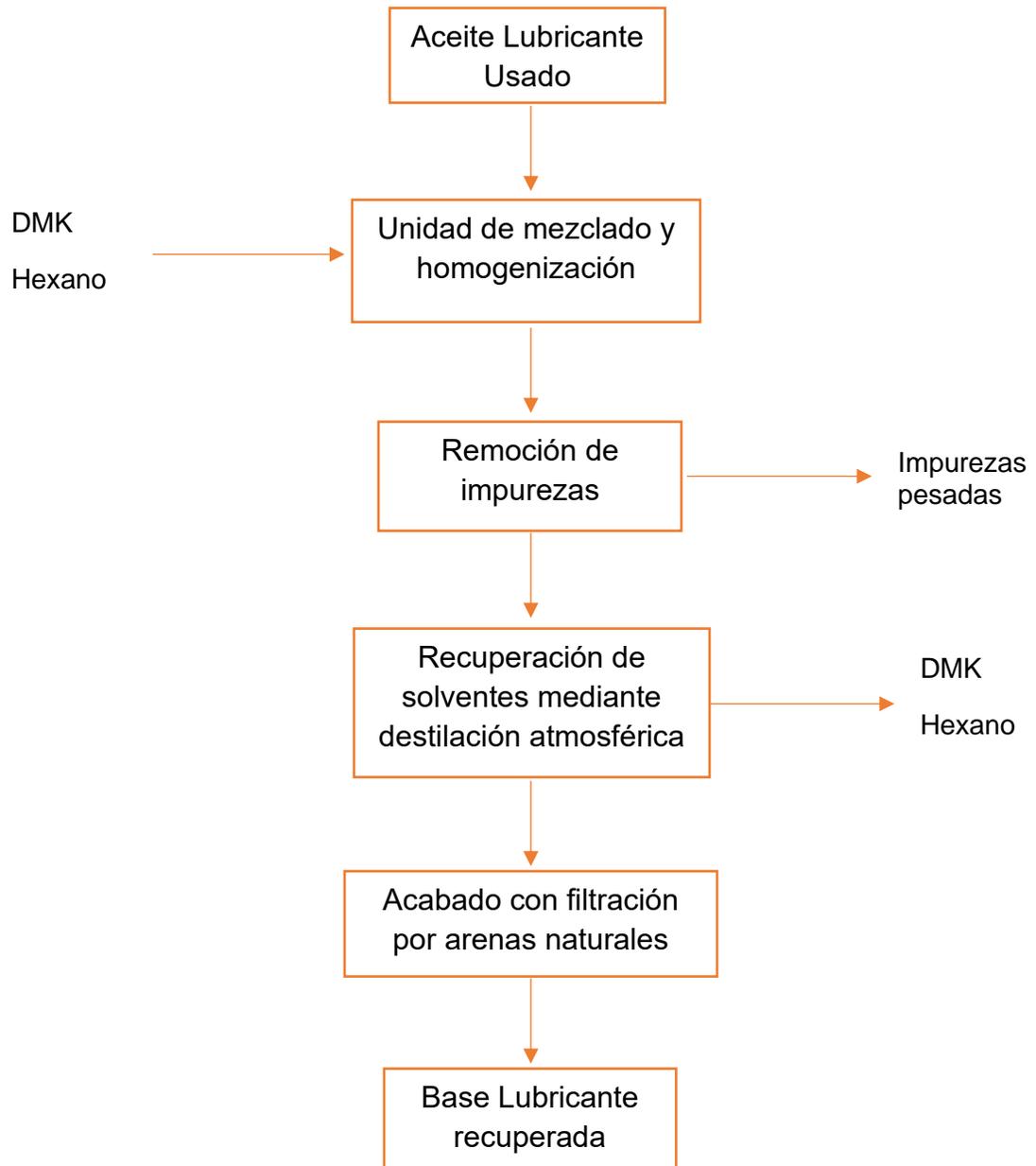
### **Definición del objetivo y alcance del sistema**

El objetivo del presente estudio es la evaluación mediante el Análisis del Ciclo de Vida del Proceso para la regeneración de aceite lubricantes usados.

Se aplica el proceso de cuantificación de energía, requerimientos de materias primas, transporte, emisiones a la atmósfera, emisiones al agua y residuos sólidos para el proceso de recuperación de bases lubricantes planteado. Un ACV de la cuna a la puerta, el sistema se puede observar en la Figura 28.

El ACV se evalúa con base en la metodología de evaluación de impacto Eco-Indicator 99. Se consideraron las siguientes categorías de impacto: potencial de calentamiento global (GWP), potencial de acidificación (AP), potencial de eutrofización (EP), potencial carcinógeno (CP), potencial de ecotoxicidad (ETP), potencial de formación inorgánica respiratoria (RIFP), potencial de formación orgánica respiratoria (ROFP), potencial de radiación (RP), agotamiento de la capa de ozono (OLD), agotamiento de minerales (MD), uso de la tierra (LU) y agotamiento de combustibles fósiles (FFD).

Figura 30. Ciclo de vida de la Cuna a la Puerta (Cradle to Gate) Valoración de aceites lubricantes usados mediante la recuperación de base lubricantes para el proceso planteado.



**Fuente:** Elaborado por el autor

Las entradas del proceso de recuperación de ALU planteado se tomaron de la tabla 18

Se aplicó ACV para la producción de 1000 kg de bases lubricantes a partir de aceite lubricantes usados. Se supuso que el transporte a la planta eran en promedio 500 Km y se transporta en tractocamiones de 30.000 Kg. El proceso de producción (ver Fig. 28) consta de las siguientes etapas:

1. Unidad de mezclado, homogenización y remoción de impurezas.
2. Destilación atmosférica.

### **Análisis del inventario del ciclo de vida**

El análisis del inventario del ciclo de vida (AICV) se realizó mediante el software OpenLCA. Con el fin de poder comparar el proceso aquí planteado con los dos métodos de gestión descritos anteriormente, para la evaluación, los datos del inventario para el análisis de ciclo de vida desarrollado en este trabajo fueron tomados de la Tabla 18.

### **Software de cálculo<sup>54</sup>**

El software usado para el Análisis de Ciclo de Vida y la evaluación de impactos es OpenLCA. Este fue desarrollado por GreenDelta y se encuentra disponible gratuitamente. Para integrar los impactos y flujos de los diferentes procesos asociados al ciclo de vida (e.g. transporte, generación eléctrica, disposición final en relleno, etc.) se utilizó la base de datos Ecoinvent v3.4 (2017), EF database, ELCD 3.2 y OzLCI2019, los cuales se pueden descargar de manera gratuita en el portal <https://nexus.openlca.org/>.

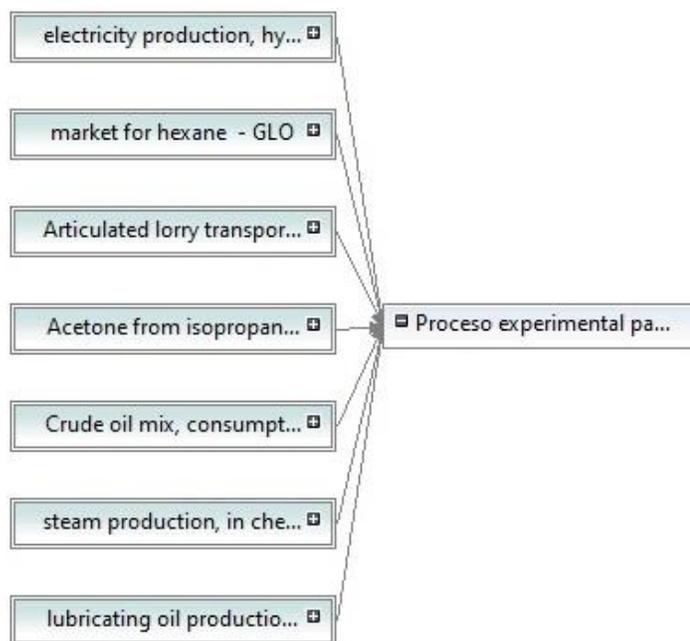
---

<sup>54</sup> TORRES ULLOA, Paola Andrea. Análisis de ciclo de vida del proceso de aprovechamiento y valorización de aceite de cocina usado en Bogotá como materia prima oleoquímica. Departamento de Ingeniería Química y Ambiental, 2019.

OpenLCA® desarrolla cálculos confiables en el análisis de ciclo de vida, y proporciona resultados detallados por proceso, flujo, o categoría de impacto. Esta herramienta ofrece diversas características de modelado y análisis. Además, se puede importar y exportar datos en dos formatos comunes a otras bases de datos de ACV (e.g. EcoSpold01, ILCD).

El ACV se evalúa con base en la metodología de evaluación de impacto Eco-Indicator 99.

Figura 31. Diagrama modelado del Proceso experimental para la regeneración de aceite lubricante usados en OpenLCA



**Fuente:** Elaborado por el autor

Figura 32. Entradas y salidas del Proceso experimental para la regeneración de aceite lubricante usados en OpenLCA

**Inputs/Outputs: Proceso experimental para la regeneración de aceites lubricantes usados**

**Inputs**

| Flow   | Category                        | Amount     | Unit | Costs/Reven... | Uncertainty | Avoided waste | Provider        | Data quality ... | Description |
|--|---------------------------------|------------|------|----------------|-------------|---------------|-----------------|------------------|-------------|
| F <sub>2</sub> Crude oil, at consumer EU-27              | Energy carriers and technol...  | 1200.00000 | kg   |                | none        |               | P Crude oil...  |                  |             |
| F <sub>2</sub> Acetone from isopropanol                  | Organic chemicals/nan           | 8100.00000 | kg   |                | none        |               | P Acetone ...   |                  |             |
| F <sub>2</sub> Hexane (GLO) market for   Cut-off, ...    | Ecoinvent cut-off S copy        | 2700.00000 | kg   |                | none        |               | P market f...   |                  |             |
| F <sub>2</sub> Lubricating oil (RER) production   C...   | Ecoinvent cut-off S copy        | 1.20000E4  | kg   |                | none        |               | P lubricati...  |                  |             |
| F <sub>2</sub> Steam, in chemical industry (RER) ...     | Ecoinvent cut-off S copy        | 270.00000  | kg   |                | none        |               | P steam pr...   |                  |             |
| F <sub>2</sub> Electricity, high voltage (BR) electri... | Ecoinvent cut-off S copy        | 103.00000  | MWh  |                | none        |               | P electricit... |                  |             |
| F <sub>2</sub> transport in t*km                         | Transport services/Other tra... | 1.2*500    | t*km |                | none        |               | P Articulat...  |                  |             |

**Outputs**

| Flow  | Category                      | Amount     | Unit | Costs/Reven... | Uncertainty | Avoided pro...           | Provider | Data quality ... | Description |
|---|-------------------------------|------------|------|----------------|-------------|--------------------------|----------|------------------|-------------|
| F <sub>2</sub> Base lubricante recuperada             |                               | 1000.00000 | kg   |                | none        |                          |          |                  |             |
| F <sub>2</sub> Acetone from isopropanol               | Organic chemicals/nan         | 8060.00000 | kg   |                | none        | <input type="checkbox"/> |          |                  |             |
| F <sub>2</sub> Hexane (GLO) market for   Cut-off, ... | Ecoinvent cut-off S copy      | 2687.00000 | kg   |                | none        | <input type="checkbox"/> |          |                  |             |
| F <sub>2</sub> Sludge                                 | End-of-life treatment         | 200.00000  | kg   |                | none        |                          |          |                  |             |
| F <sub>2</sub> Carbon dioxide                         | Emission to air/high popul... | 13.00000   | kg   |                | none        |                          |          |                  |             |
| F <sub>2</sub> Sulfur dioxide                         | Emission to air/high popul... | 0.02000    | kg   |                | none        |                          |          |                  |             |
| F <sub>2</sub> Nitrogen dioxide                       | Emission to air/high popul... | 2.00000    | kg   |                | none        |                          |          |                  |             |
| F <sub>2</sub> Particulates, < 10 um                  | Emission to air/high popul... | 6.13000    | kg   |                | none        |                          |          |                  |             |

Fuente: Elaborado por el autor

## 5 ANALISIS DE RESULTADOS

A continuación, se presentan los resultados obtenidos en el desarrollo experimental de acuerdo con el orden planteado en el capítulo 4.

### 5.1 SELECCIÓN TECNOLOGÍA DE REGENERACIÓN DE ACEITES LUBRICANTES USADOS MEDIANTE EL ANÁLISIS MULTICRITERIO

En la tabla 15. podemos observar los resultados obtenidos de la evaluación de las 7 principales tecnologías de regeneración de aceites lubricantes usados para la recuperación de bases lubricante usadas a escala industrial a nivel mundial.

**Tabla 19.** Resultados de la Evaluación de tecnologías de regeneración de aceites lubricantes usados

|          | <b>Listados de Alternativas</b>      | <b>Ponderación final</b> |
|----------|--------------------------------------|--------------------------|
| 1        | Proceso ácido-arcilla                | 0,250                    |
| <b>2</b> | <b>Proceso de destilación</b>        | <b>0,261</b>             |
| 3        | Extracción solvente con hidroacabado | 0,186                    |
| 4        | TFE + acabado solvente               | 0,138                    |
| 5        | TFE + acabado de arcilla             | 0,139                    |
| 6        | TFE + hidroacabado                   | 0,101                    |
| 7        | Proceso de extracción con solventes  | 0,149                    |

**Fuente:** Elaborado por el autor

## 5.2 PROCESO EXPERIMENTAL PARA LA REGENERACIÓN DE ACEITES LUBRICANTES USADOS

### 5.2.1 Caracterización aceite lubricante usados

En la tabla 16 se reportan los resultados obtenidos de la caracterización del aceite lubricante usado.

**Tabla 20.** Caracterización aceite lubricante usado recolectado

| ítem | Propiedad                    | Unidad | Medida  |
|------|------------------------------|--------|---------|
| 1    | Densidad                     | g/ml   | 0,8677  |
| 2    | Viscosidad cinemática a 40°C | cSt    | 109,818 |
| 3    | Zinc                         | mg/L   | 463,56  |
| 4    | Fosforo                      | mg/L   | 1,93    |
| 5    | Calcio                       | mg/L   | 933,5   |
| 6    | Aluminio                     | mg/L   | 8,32    |
| 7    | Hierro                       | mg/L   | 170,88  |
| 8    | % solidos                    | %      | 12      |

**Fuente:** Elaborado por el autor

### 5.2.2 Caracterización Base Lubricante Recuperada

En la tabla 17 se reportan los resultados obtenidos de la caracterización de la Base Lubricante Recuperada.

**Tabla 21.** Caracterización Base Lubricante Recuperada

| Item | Propiedad                    | Unidad | Medida |
|------|------------------------------|--------|--------|
| 1    | Densidad                     | g/ml   | 0,8526 |
| 2    | Viscosidad cinemática a 40°C | cSt    | 48,873 |
| 3    | Zinc                         | mg/L   | 3,3648 |
| 4    | Fosforo                      | mg/L   | N/D    |
| 5    | Calcio                       | mg/L   | 11,168 |
| 6    | Aluminio                     | mg/L   | 1,92   |
| 7    | Hierro                       | mg/L   | 1,69   |
| 8    | % solidos                    | %      | 0      |

**Fuente:** Elaborado por el autor

### 5.2.3 Resultados análisis de espectroscopía de <sup>1</sup>H-RMN

En la tabla 18 se reportan los resultados obtenidos del análisis <sup>1</sup>H-RMN de las muestras tomadas de la base lubricante recuperada con un proceso de acabado por filtración con arenas naturales: Sepiolita, dolomita, zeolita y el análisis <sup>1</sup>H-RMN de la muestra tomada a la Base Lubricante de Ecopetrol.

**Tabla 22.** Tabla de resultados análisis de espectroscopía de <sup>1</sup>H-RMN

| No. muestra | Descripción muestra (Arena absorbente) | N       | Fa     | Fp     |
|-------------|--|---------|--------|--------|
| 1           | Sepiolita                              | 39,6193 | 0,0136 | 0,9864 |
| 2           | Dolomita                               | 51,8671 | 0,0093 | 0,9907 |
| 3           | Zeolita                                | 25,3236 | 0,0087 | 0,9913 |
| 4           | Base Lubricante ECP                    | 21,5975 | 0,0082 | 0,9918 |

n = Longitud media de la cadena parafínica

Fa = Factor de aromaticidad

Fp = Factor de parafinidad

**Fuente:** Elaborado por el autor

En la tabla 18, se observa que la máxima diferencia en el factor de parafinidad es del 0,05% con respecto al factor de parafinidad de la base parafínica de Ecopetrol, lo cual nos indica, que la calidad de la base parafínica recuperada mediante el proceso experimenta, es de similares características a la de la base de Ecopetrol.

#### **5.2.4 Resultados análisis de contenido de metales mediante espectrometría de emisión atómica**

En la tabla 19 se presentan los resultados del análisis de contenido de metales mediante espectrometría de emisión atómica y en la tabla de 19 se muestran los porcentajes de remoción del Proceso experimental para la regeneración de aceites lubricante usados, según la arena natural usada como medio filtrante.

**Tabla 23.** Contenido de metales

| <b>Descripción muestra<br/>(Arena absorbente)</b> | <b>Zinc<br/>mg/L</b> | <b>Fosforo<br/>mg/L</b> | <b>Calcio<br/>mg/L</b> | <b>Aluminio<br/>mg/L</b> | <b>Hierro<br/>mg/L</b> |
|---|----------------------|-------------------------|------------------------|--------------------------|------------------------|
| Sepiolita   | 0,4488               | N. D                    | 2,236                  | < 0,5                    | 3,14                   |
| Dolomita  | 3,3648               | N. D                    | 11,168                 | 1,92                     | 1,69                   |
| Zeolita   | 1,3464               | N. D                    | 12,392                 | 5,8                      | 7,8                    |
| Base Lubricante ECP                               | 0,6912               | N. D                    | 1,488                  | 1,08                     | 0,63                   |
| Proceso FAN                                       | 253,48               | 2,61                    | 43,88                  | 14                       | 33,64                  |
| Aceite lubricante usado                           | 463,56               | 1,93                    | 933,5                  | 8,32                     | 170,88                 |

N.D = No Detectado

**Fuente:** Elaborado por el autor

**Tabla 24.** Porcentaje de remoción según el proceso

| <b>Descripción muestra<br/>(Arena absorbente)</b> | <b>Zinc</b> | <b>Fosforo</b> | <b>Calcio</b> | <b>Aluminio</b> | <b>Hierro</b> |
|---|-------------|----------------|---------------|-----------------|---------------|
| Sepiolita   | 99,90%      | 0              | 99,76%        | 96,39%          | 98,16%        |
| Dolomita  | 99,27%      | 0              | 98,80%        | 76,92%          | 99,01%        |
| Zeolita   | 99,71%      | 0              | 98,67%        | 30,29%          | 95,44%        |
| Proceso FAN                                       | 45,32%      | -35,23%        | 95,30%        | -68,27%         | 80,31%        |

**Fuente:** Elaborado por el autor

En la tabla 20 se observa la efectividad del proceso experimental al tener en promedio una remoción del 91% de los metales contenidos en el aceite lubricante usado, muy por encima del proceso planteado por FAN.

### **5.2.5 Resultados Evaluación ambiental mediante la metodología del Análisis del Ciclo de Vida en el software SimaPro 7.1 del Proceso de regeneración de aceite lubricantes usados mediante la tecnología de re-refinado y del proceso de valoración energética como combustible.**

**Tabla 25.** Inventario de ciclo de vida de diferentes escenarios para la gestión de 1000 kg aceite usado

|                          | <b>Unidad</b> | <b>Reciclaje por re-refinación</b> | <b>Co-combustible</b> |
|--------------------------|---------------|------------------------------------|-----------------------|
| <b>Emisiones de aire</b> |               |                                    |                       |
| CO2                      | Kg            | 660                                | 2930                  |
| CH4                      | Kg            | 0,0176                             | 0,0658                |
| N2O                      | Kg            | 0,165                              | 0,674                 |

|   |        |         |        |
|---|--------|---------|--------|
| SO2                                     | Kg     | 97,7    | 425    |
| NOx                                     | Kg     | 33,9    | 141    |
| HCl                                     | Kg     | 0,226   | 0,936  |
| HF                                      | Kg     | 0,0267  | 0,11   |
| CO                                      | Kg     | 0       | 0,252  |
| NMVOOC                                  | Kg     | 9,24    | 38,5   |
| H2S                                     | Kg     | 0,0117  | 0,0154 |
| NH3                                     | Kg     | 0,0483  | 0,166  |
| As                                      | Kg     | 1,71    | 7,86   |
| Cd                                      | Kg     | 0,00405 | 0,0171 |
| Cr                                      | Kg     | 0,00259 | 0,0322 |
| Hg                                      | Kg     | 0,501   | 2,06   |
| Ni                                      | Kg     | 0,0405  | 0,185  |
| Pb                                      | Kg     | 0,00754 | 0,0314 |
| PAH                                     | gm     | 0,369   | 1,08   |
| Furano                                  | gm     | 0,00771 | 0,0319 |
| PCBs                                    | gm     | 0,846   | 3,4    |
| Dioxinas (medidas como 2, 3, 7, 8-TCDD) | µg     | 0,616   | 2,48   |
| Particulas <10 µm                       | Kg     | 10,7    | 10,2   |
| <b>Efluentes Liquidos</b>               |        |         |        |
| P                                       | Kg     | 0,00494 | 0,0205 |
| N                                       | Kg     | 0,025   | 0,104  |
| S                                       | Kg     | 0,0811  | 0,343  |
| COD                                     | Kg     | 97      | 414    |
| BOD                                     | Kg     | 95,5    | 405    |
| Fenol                                   | Kg     | 0,0631  | 0,266  |
| PAH                                     | Kg     | 0,00258 | 0,011  |
| As                                      | gm     | 1       | 3,04   |
| Cd                                      | gm     | 0,154   | 0,629  |
| Cr                                      | gm     | 1,32    | 5,57   |
| Hg                                      | gm     | 0,0358  | 0,138  |
| Ni                                      | Kg     | 0,0127  | 0,051  |
| Pb                                      | Kg     | 0,00272 | 0,0112 |
| <b>Recursos consumidos</b>              |        |         |        |
| Energía                                 | GJ Eq. | 0,182   | 0,711  |

**Fuente:** HASSANAIN, Eslam M., et al. Life cycle assessment of waste strategies for used lubricating oil. The International Journal of Life Cycle Assessment, 2017, vol. 22, no 8, p. 1232-1240.

### 5.2.6 Resultados Evaluación ambiental mediante la metodología del Análisis del Ciclo de Vida en el software OpenLCA del Proceso experimental para la regeneración de aceites lubricante usados.

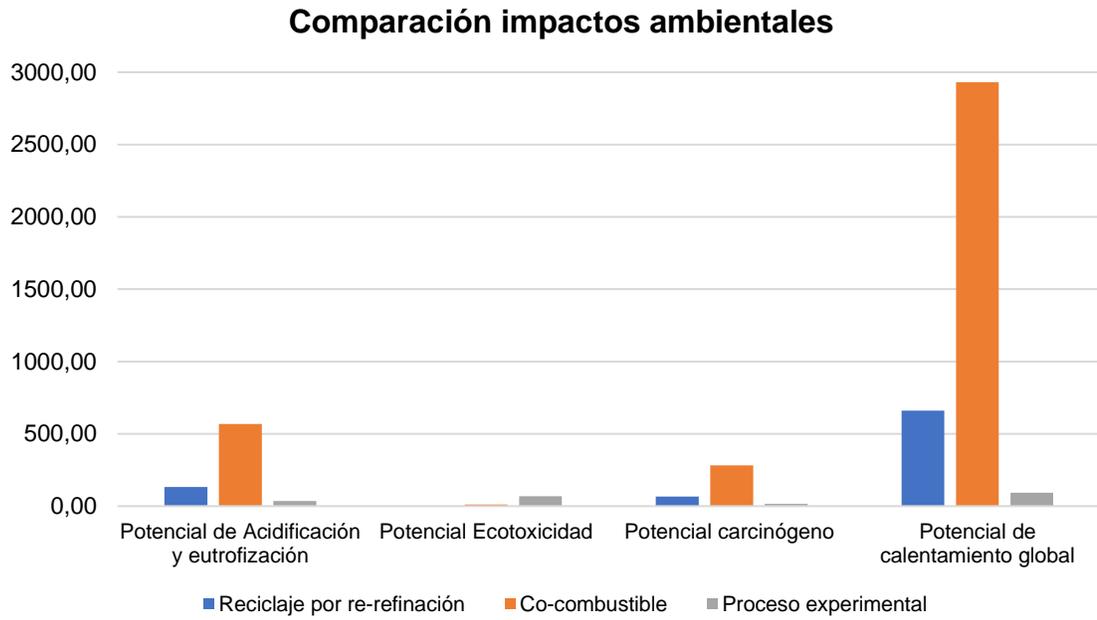
En la tabla 22 se presentan los resultados del Análisis de Ciclo de vida de la cuna hasta la puerta, en OpenLCA del Proceso experimental para la regeneración de aceites lubricantes usados. El ACV se evalúa con base en la metodología de evaluación de impacto Eco-Indicator 99.

**Tabla 26.** Resultados de la Evaluación ambiental mediante ACV del Proceso para la regeneración de aceite lubricante usados en Open LCA

| <b>Categoría de Impacto</b>                    | <b>Unidad de referencia</b> | <b>Resultados</b> |
|--|-----------------------------|-------------------|
| Potencial de Acidificación y eutrofización     | Puntos                      | 35,8840           |
| Potencial Ecotoxicidad                         | Puntos                      | 68,4163           |
| Uso de la tierra                               | Puntos                      | 113,1237          |
| Potencial carcinógeno                          | Puntos                      | 16,6364           |
| potencial de calentamiento global              | Puntos                      | 92,8249           |
| Potencial de radiaciones ionizantes            | Puntos                      | 2,8947            |
| Agotamiento de la capa de ozono                | Puntos                      | 0,1848            |
| Potencial de formación inorgánica respiratoria | Puntos                      | 298,8705          |
| Agotamiento de combustibles fósiles            | Puntos                      | 2388,9917         |
| Agotamiento de minerales                       | Puntos                      | 19,1400           |

**Fuente:** Elaborado por el autor

Figura 33. Comparación impactos ambientales de diferentes escenarios de gestión de 1.000 gr de aceite lubricante usado



Fuente: Elaborado por el autor

## 6 CONCLUSIONES

El método de decisión multicriterio nos permitió evaluar las 7 principales tecnologías usadas a nivel mundial en una escala industrial, mediante 10 criterios que consideraban los aspectos: técnicos, económicos, operativos y ambientales, producto de esta evaluación se preselecciono el proceso de regeneración de aceites lubricantes usados por re-refinación o destilación al vacío.

El proceso descrito por FAN, en su Proceso de Regeneración de aceite lubricantes usados y biolubricantes mediante una nueva tecnología verde y sostenible; cuya metodología plantea una extracción con solvente binario en una mezcla de hexano - DMK, en una relación de 1:3 y una relación solvente - aceite usado de 9:1, se optimizo mediante una agitación mecánica a 300 RPM disminuyendo los tiempos de depuración de 24 horas a 30 minutos y una filtración por arenas naturales que permitieron mejorar el acabado del producto terminado. Resultado de estos, es el Proceso experimental para la regeneración de aceite lubricantes usados.

Este proceso experimental permitió la valoración del 88% mediante la recuperación de bases lubricantes. Mejoro la remoción de impurezas comparado con el proceso de FAN pasando de un % promedio de remoción de impurezas del 24% al 91%.

Mediante el análisis del  $^1\text{H-RMN}$ , se pudo establecer que la calidad de la base parafínica recuperada es de similares características a la de Ecopetrol teniendo una diferencia del 0,05% en el factor de parafinidad.

La evaluación financiera, muestra la viabilidad de ambos procesos de gestión, tanto el proceso experimental como el proceso de destilación al vacío, dando una TIR del 118% y 96%, un Payback de 10 meses y 12 meses respectivamente, en un horizonte del proyecto de 5 años. Lo cual pudo ser corroborado mediante los análisis de sensibilidad del VPN realizados a ambo procesos, dando una probabilidad del 100% en ambos casos, de tener un VPN positivo.

La evaluación ambiental mediante la metodología de Análisis de Ciclo de Vida de tres modos de gestión de residuos: aprovechamiento energético, valoración de aceites lubricantes usados mediante la recuperación de bases lubricantes por el proceso de re-refinado o destilación al vacío y el proceso experimental; nos permitió establecer que el proceso más amigable con el medio ambiente es el proceso experimental, el cual por cada 1000 Kg de aceites lubricante usado, genera un Potencial de Calentamiento Global (GWP) de 92,82 Kg de CO<sub>2</sub> comparado con los 660 Kg de CO<sub>2</sub> del proceso de re-refinación y los 2930 Kg de CO<sub>2</sub> de la valoración energética como combustible.

Con lo anterior podemos concluir que el Proceso experimental para la regeneración de aceites lubricantes usados, es un proceso sostenible tanto técnico, económica y ambientalmente, teniendo buenas perspectivas para su escalamiento a nivel industrial.

## **7 RECOMENDACIONES**

Determinar el número de veces que se permite reciclar los disolventes (hexano y DMK), sin afectar sus propiedades.

Determinar el número de veces que se permite reciclar las arenas naturales filtrantes, sin afectar sus propiedades.

Llevar el estudio del Proceso experimental para la regeneración de aceites lubricante usados a un escalamiento nivel piloto que permita definir su viabilidad y futuro escalamiento a nivel industrial, que conlleve a un nuevo proceso de gestión de residuos.

## 8 BIBLIOGRAFIA

AFSORDEGAN, Arayeh. A contribution to multi-criteria decision making in sustainable energy management based on fuzzy and qualitative reasoning. Tesis Doctoral programa Ingeniería de sistemas y proyectos. Barcelona. Universitat Politècnica de Catalunya. 2015. 22p.

ALEMI, Mehrdad; JALALIFAR, Hossein; KAMALI, Gholam; KALBASI, Mansou. A mathematical estimation for artificial lift systems selection based on ELECTRE model. En: Journal of Petroleum Science and Engineering, Abril-mayo, 2011, vol.78 no. 1, p. 193–200

Análisis de ciclo de vida. principios y marco de referencia, NTC-ISO 14040. Bogotá D.C.: El Instituto. 2007. 9 p

BERNAL, Sergio; NIÑO, Daniel. Modelo multicriterio aplicado a la toma de decisiones representables en diagramas de Ishikawa. Tesis de pregrado. Bogotá: Universidad Distrital Francisco de Paula Santander, 2018, 40p.

C. Kahraman, de Fuzzy Multi Criteria Decision Making\_Theory and Applications with Recent Developments, Springer, 2008, pp. 1-588.

Calidad Total [Sitio web]. Buenos Aires: Calidad Total, La Matriz de Pugh para la toma de decisiones [Consulta: 10 de junio de 2022]. Disponible en: <https://cutt.ly/sJVVBun>

CARRILLO, Mary Itzel. Análisis del Ciclo de Vida: Herramienta de Gestión Ambiental. Tesis Maestría en Ingeniería Administrativa. Orizaba. Instituto Tecnológico de Orizaba. 2018. 6p.

EL-FADEL, M.; KHOURY, R. Strategies for vehicle waste-oil management: a case study. Resources, conservation and recycling, vol. 33, no 2. 2001. 75-91p.

FAN, William Tsung-Chieh. Regeneration of used petroleum-based lubricants and biolubricants by a novel green and sustainable technology. PhD Environmental Engineering. University of Southern California, 2010.

FATAHI, Ehsan. Selection of the Best Artificial Lift Method in One of the Iranian Oil Field by the Employment of ELECTRE Model. En: British Journal of Applied Science and Technology, enero- marzo, vol. 1 no.4. 2011.172–180p.

FONDO DE ACEITES USADOS ASOCIACION COLOMBIANA DEL PETROLEO. Informe Año 2019. Bogotá. 2019.

FONTANA, M. Métodos de decisión multicriterio AHP y PROMETHEE aplicados a la elección de un dispositivo móvil. Trabajo de grado Ingeniero Industrial. Universidad de Sevilla. Escuela Técnica Superior de Ingeniería. Sevilla. 2015. 14-20p

FORERO PINTO, Ana Milena. Determinación de la absorción óptica y el cambio en el índice de refracción de una nanoestructura de CdSe por el método de elementos finitos bajo la acción de campos eléctricos y magnéticos uniformes. Tesis de Maestría en Física. Universidad Industria de Santander. 2020. 45-70p

Geo Innova [Sitio web]. Navarra: Geo Innova, Análisis del Ciclo de Vida: ISO 14040 [Consulta: 10 de junio de 2022]. Disponible en: <https://cutt.ly/tKtDyKM>

GÓMEZ, Manuel. Evaluación y análisis comparativo de diferentes métodos de selección de sistemas de levantamiento artificial. Tesis de Magíster en Ciencias. Caracas: Universidad Central de Venezuela, 2005.

GULER, Kutay; PETRISOR, Denisa Mirela. A Pugh Matrix based product development model for increased small design team efficiency. Cogent Engineering, vol. 8, no 1. 2021. 3-4 p.

HASSANAIN, Eslam M., et al. Life cycle assessment of waste strategies for used lubricating oil. The International Journal of Life Cycle Assessment, vol. 22, no 8. 2017

Haya, E. Análisis de Ciclo de Vida Madrid. Master en Ingeniería y Gestión Medioambiental. Madrid. Escuela de Organización Industrial. 2016. 4-23p.

HERNANDEZ PEDRAZA, Juan David; MALDONADO RODRIGUEZ, Andres Felipe. Evaluación de un proceso para la recuperación de Bases lubricantes contenidas en

los aceites lubricantes usados. Tesis de Licenciatura. Fundación Universidad de América. 2020. 54p.

HSU, Yu Lung; LEE, Cheng Haw; KRENG, Victor B. Analysis and comparison of regenerative technologies of waste lubricant. WSEAS Transactions on Environment and Development, vol. 5, no 3. 2009. 295-309p.

HSU, Yu-Lung; LIU, Chun-Chu. Evaluation and selection of regeneration of waste lubricating oil technology. Environmental monitoring and assessment, vol. 176, no 1. 2011. 197-212p.

HWANG, Ching-Lai; YOON, Kwangsun. Multiple attribute decision making Methods and Applications. New York: Springer Verlag, 1981.

INSTITUTO COLOMBIANO DE NORMAS TÉCNICAS Y CERTIFICACIÓN. Gestión ambiental. Análisis de ciclo de vida. principios y marco de referencia, NTC-ISO 14040. Bogotá D.C.: El Instituto. 2007. 9p

JAFARI, Ahmad Jonidi; HASSANPOUR, Malek. Analysis and comparison of used lubricants, regenerative technologies in the world. Resources, Conservation and Recycling, vol. 103. 2015. 179-191.

JIMÉNEZ, J. El proceso analítico jerárquico (AHP). Fundamentos, metodología y aplicaciones. Rect@ Revista Electrónica de Comunicaciones y Trabajos de ASEPUMA, vol. 1. 2002. 28-77p.

KALNES, T., et al. Treatment and recycling of waste lubricants. A petroleum refinery integration study. En AICHE National Meeting, San Diego, CA. 1990. 19-22p.

Kramer, D.C.; Lok, B.K.; Kurg, R.R. and Rosenbaum, J.M. (2003b) Chevron Texaco Global Lubricants. The Advent of Modern Hydroprocessing: The Evolution of Base Oil Technology, Part 2. Machinery Lubrication Magazine. 2003.

La Matriz de Pugh para la toma de decisiones [Sitio web]. Buenos Aires. 2016. [Fecha de consulta: 10 de junio de 2022]. Disponible en: <https://cutt.ly/sJVVBun>

MELO CARLOS, Zulma Lizeth. Contribución de un modelo de decisión multicriterio para la selección del método de levantamiento artificial óptimo para un campo de estudio. Trabajo de grado Magister en Ingenierías de Petróleos y Gas. Bucaramanga. Universidad Industrial de Santander. Facultad de ingenierías Fisicoquímicas. Escuela de Ingeniería de Petróleos. 2020. 38-42p

Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible. Manual técnico para el manejo de aceites lubricantes usados de origen automotor e industrial. Bogotá. 2014. 16-64p

NIELSEN CINGEL, Melanie. Análisis de rentabilidad de planta de regeneración de aceites lubricantes. Tesis Doctoral Licenciatura en Economía. Mendoza. Universidad Nacional de Cuyo. Facultad de Ciencias Económicas. 2016. 8p.

Payri, F., & Desantes, J. [Sitio web]. Diagnóstico de Motores Diesel mediante el Análisis del Aceite Usado. [Consulta: 15 de julio 2022]. Disponible en: <https://cutt.ly/cCQjt90>

POHEKAR, Sanjay D.; RAMACHANDRAN, Muthu. Application of multi-criteria decision making to sustainable energy planning—A review. *Renewable and sustainable energy reviews*, vol. 8, no 4. 2004. 365-381p.

PRAMANIK, K. Properties and use of Jatropha curcas oil and diesel fuel blends in compression ignition engine. *Renewable energy*, 2003, vol. 28, no 2, p. 239-248.

SAATY, Thomas. *The Analytic Network Process*. Pittsburgh: RSW Publications, 1996.

TORRES COBOS, Pablo Andrés. Diseño de un plan de recolección y el re-refinamiento de los aceites lubricantes usados en la ciudad de Loja. Tesis de Ingeniero Mecánico Automotriz. Quito. Universidad Internacional Del Ecuador. Facultad de Ingeniería Mecánica Automotriz. 2014. 30-101p.

TORRES ULLOA, Paola Andrea. Análisis de ciclo de vida del proceso de aprovechamiento y valorización de aceite de cocina usado en Bogotá como materia prima oleoquímica. Departamento de Ingeniería Química y Ambiental, 2019.

Transformación de los aceites usados para su utilización como energéticos en procesos de combustión. Unidad de Política Minero-Energética -UPME, octubre de 2001. Resumen ejecutivo

TWENERGY. [Sitio web]. Ciclo de vida de producto. Bogotá: DANE. [Consulta: 30 de Julio 2022] Disponible en: <https://cutt.ly/yCQFZAD>

U.S. Environmental Protection Agency. [Sitio web]. Used Oil Management Program. [Consulta: 10 de julio del 2022]. Disponible en: <https://cutt.ly/aCQgANZ>

UNIVERSITAT POLITECNICA DE VALENCIA. [Sitio web]. Valencia. 2018. [Fecha de consulta: 10 de junio de 2022]. Disponible en: <https://bit.ly/3x8pINR>

VALERO, Magda Liliana. Selección de tecnologías para el tratamiento de las aguas de producción de shale gas utilizando una técnica de decisión multicriterio. Trabajo de grado Magister en Ingeniería Ambiental. Bucaramanga. Universidad Industrial de Santander. Facultad de Ingenierías Físicoquímicas. Escuela de Ingeniería Química. 2013. 84p

WELTON, Thomas; REICHARDT, Christian. Solvents and solvent effects in organic chemistry. John Wiley & Sons, 2011. 89p

WILLING, Andreas. Lubricants based on renewable resources—an environmentally compatible alternative to mineral oil products. Chemosphere, vol. 43, no 1. 2001. 89-98p.

## ANEXO A

### CLASIFICACIÓN MÉTODOS DE DECISIÓN MULTICRITERIO.

#### 1. MÉTODO TOPSIS (TECHNIQUE FOR ORDER PERFORMANCE BY SIMILARITY TO IDEAL SOLUTION)

Método creado y desarrollado por Hwang y Yoon en 1981, se basa en el concepto de que la opción elegida debe tener la distancia euclidiana más corta de la solución ideal y la más lejana de la solución ideal negativa.

La solución ideal es hipotética, para la cual todas las alternativas relativas a los valores de atributo de criterio (V) corresponden a los valores máximos de atributo en la base de datos que comprende las soluciones satisfactorias. La solución ideal negativa es la solución hipotética para la cual las alternativas relativas a los valores de los atributos de los criterios (Vii), corresponden a los valores mínimos de los atributos en la base de datos. TOPSIS brinda una solución que no solo está más cerca de la mejor hipotéticamente, sino también más alejada de la alternativa hipotéticamente peor<sup>55</sup>

Este método se basa en que es deseable que una determinada alternativa se ubique a la distancia más corta respecto de una solución ideal positiva y a la mayor distancia respecto a una solución ideal negativa. En este método una solución ideal se define como un conjunto de niveles (o puntuaciones) ideal respecto a todos los atributos considerados de un determinado problema, aun cuando la solución ideal usualmente sea imposible o no sea factible de obtener

---

<sup>55</sup> FATAHI, Ehsan. Selection of the Best Artificial Lift Method in One of the Iranian Oil Field by the Employment of ELECTRE Model. En: British Journal of Applied Science and Technology, enero-marzo, 2011, vol. 1 no.4, p.172–180.

Desde este punto de vista la racionalidad de la conducta humana radica en encontrarse lo más cerca posible de la solución ideal y en alejarse lo más posible de una solución anti-ideal o ideal negativa. En el método TOPSIS se detalla un índice llamado similaridad o proximidad relativa combinando los valores de la proximidad a la solución ideal positiva y la lejanía respecto a la solución ideal negativa. La idea es seleccionar la alternativa que tenga la máxima similaridad con respecto a la solución ideal positiva<sup>56</sup>.

A pesar de todo esto, TOPSIS presenta ciertos inconvenientes. Uno de ellos es el fenómeno del orden, en este fenómeno el orden de las alternativas cambia cuando una alternativa es añadida o eliminada del problema de decisión. En algunos casos, podría llegar a darse el orden inverso total, donde el orden de las preferencias es invertido totalmente, es decir, que la alternativa que se consideraba la mejor, con la inclusión o la eliminación de alguna alternativa, se convierte en la peor. Este fenómeno, en la mayoría de los casos, no es aceptable. Wang y Luo ya estudiaron el orden inverso en TOPSIS (Wang y Luo, 2009), pero no aportaron ninguna solución al respecto.

Los principales fundamentos del orden inverso en TOPSIS son debidas al cálculo de la norma y a la elección de la solución ideal positiva y la solución ideal negativa. TOPSIS contempla las sutilezas que el concepto de ideal tiene y se construye un método operativo; La solución ideal y anti-ideal, son soluciones artificiales. En este sentido, la solución ideal contiene a todos los valores de los criterios que pertenecen a los valores óptimos de las alternativas: la solución anti-ideal agrupa a todos los valores de los criterios que conciernen a los valores menos deseados de cada criterio de la calificación de las alternativas.

---

<sup>56</sup> HWANG, Ching-Lai; YOON, Kwangsun. Multiple attribute decision making Methods and Applications. New York: Springer Verlag, 1981.

## **2. MÉTODO ELECTRE (ELIMINATION AND CHOICE TRANSLATING ALGORITHM)**

Es uno de los métodos más usados en la última década, fue propuesto por Bernard Roy en 1965 siendo de los modelos de clasificación superior más importantes utilizado para la aplicación en problemas MCDM, Se basa en la construcción y aplicación de una relación superior, mediante comparaciones en pares, entre alternativas sobre los criterios de decisión y a partir de ellas se obtiene un grado de dominancia o ventaja de una opción respecto de otra<sup>57</sup>.

El método ELECTRE maneja el concepto de clasificación por comparaciones igualadas entre opciones sobre los criterios apropiados. Una opción domina las otras si se cumplen uno o más criterios en comparación con el criterio de otras alternativas y es igual al criterio restante.

El procedimiento de ELECTRE permite reducir el tamaño del conjunto de soluciones eficientes mediante una participación del conjunto eficiente en dos subconjuntos. Uno de alternativas muy favorables para el decisor y otro de alternativas menos favorables. En relación con el procedimiento, partiendo de una matriz de decisión, se utiliza la relación de sobre clasificación con el fin de obtener una matriz de superación. Una alternativa sobre califica a otra y pasa a formar parte de un conjunto de alternativas más favorable cuando es al menos igual de buena, teniendo en cuenta el conjunto de atributos considerados. Para ello, es necesario que la concordancia entre ambas supere un índice y la discordancia no supere otro, ambos establecidos previamente<sup>58</sup>.

---

<sup>57</sup> MELO CARLOS, Zulma Lizeth. Contribución de un modelo de decisión multicriterio para la selección del método de levantamiento artificial óptimo para un campo de estudio. Trabajo de grado Magister en Ingenierías de Petróleos y Gas. Bucaramanga. Universidad Industrial de Santander. Facultad de ingenierías Físicoquímicas. Escuela de Ingeniería de Petróleos. 2020. 42p

<sup>58</sup> ALEMI, Mehrdad; JALALIFAR, Hossein; KAMALI, Gholam; KALBASI, Mansou. A mathematical estimation for artificial lift systems selection based on ELECTRE model. En: Journal of Petroleum Science and Engineering, Abril-mayo, 2011, vol.78 no. 1, p. 193–200

### **3. PROCESO ANALÍTICO JERÁRQUICO AHP.**

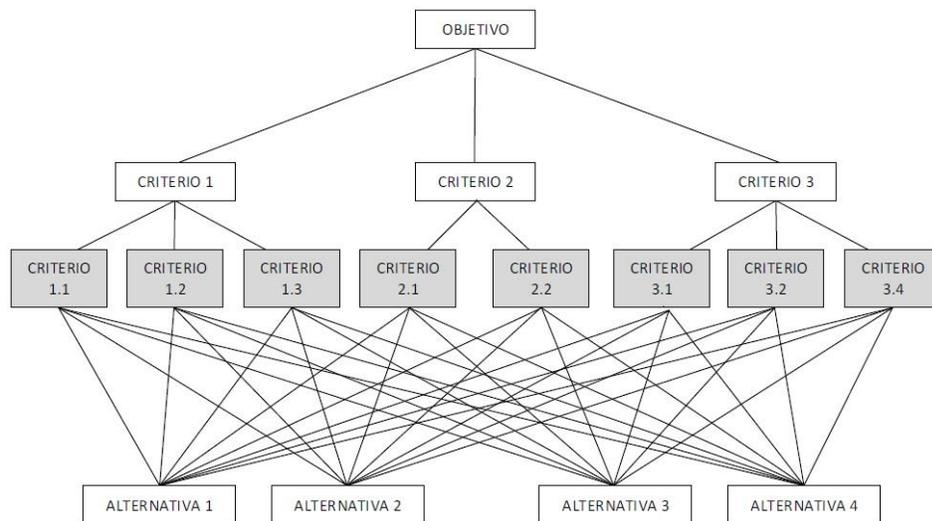
Diferentes métodos multicriterio son aplicados a problemas medioambientales y de energía, siendo uno de los métodos más utilizado, el Proceso Analítico Jerárquico o “Analytic Hierarchy Process” (AHP por sus siglas en inglés), el cual permite involucrar criterios tanto cuantitativos como cualitativos para realizar los análisis.

Este método fue desarrollado por Tomas L. Saaty en 1980. El método AHP (Analytic Hierarchy Procces o análisis jerárquico de proceso) es una herramienta muy útil para solventar problemas complejos de toma de decisiones y ayudar al usuario o decisión-maker a adoptar la solución más adecuada a través de una estructura jerárquica similar a la representada en la figura 8. En líneas generales, se basa en reducir una decisión compleja a una serie de comparaciones por parejas y sintetizar dichos resultados, incorporando así los aspectos tanto objetivos como subjetivos en la decisión.

Los datos con los que AHP trabaja son un conjunto de criterios y un conjunto de alternativas entre las que se debe elegir la más adecuada. Hay que resaltar que, ya que algunos criterios pueden estar en oposición, por lo general la mejor alternativa no será aquella que maximice cada uno de los criterios, si no la que ofrezca el mejor equilibrio entre estos. El método AHP genera un peso para cada criterio acorde con las comparaciones realizadas por el decision-maker. A mayor peso de un criterio, mayor importancia se le otorga a éste. A continuación, para un criterio fijo, el método asigna una puntuación a cada alternativa basándose en las comparaciones de las alternativas para el criterio considerado. Por último, combina los pesos de los criterios y las puntuaciones de las alternativas para obtener una puntuación global para cada alternativa, estableciendo así un ranking de preferencia entre estas. Esta puntuación global es una suma ponderada de las puntuaciones con respecto a todos

los criterios<sup>59</sup>. Para que el método sea eficaz, es fundamental elegir bien los criterios y subcriterios, los cuales deben estar muy bien definidos, ser relevantes y mutuamente excluyentes (independencia entre ellos). Es importante que el número de criterios y subcriterios en cada nivel no sea superior a 7, para evitar excesivas comparaciones a pares<sup>60</sup>.

Figura 34. Ejemplo de estructura jerárquica AHP



**Fuente:** UNIVERSITAT POLITECNICA DE VALENCIA. [Sitio web]. Valencia. Disponible en: <https://bit.ly/3x8pINR>

El método AHP es una herramienta muy flexible y potente precisamente porque las puntuaciones y la clasificación global, están fundamentadas en las comparaciones tanto de los criterios como de las alternativas realizadas por el usuario. Los cálculos realizados por AHP siempre van guiados por la experiencia del usuario por lo que

<sup>59</sup> FONTANA, M. Métodos de decisión multicriterio AHP y PROMETHEE aplicados a la elección de un dispositivo móvil. Trabajo de grado Ingeniero Industrial. Universidad de Sevilla. Escuela Técnica Superior de Ingeniería. Sevilla. 2015. 8p

<sup>60</sup> UNIVERSITAT POLITECNICA DE VALENCIA. [Sitio web]. Valencia. 2018. [Fecha de consulta: 10 de junio de 2022]. Disponible en: <https://bit.ly/3x8pINR>

es una herramienta muy útil de transformar evaluaciones (tanto cualitativas como cuantitativas) en un ranking multicriterio. Además, es una herramienta muy simple ya que no hace falta construir un sistema complejo con las decisiones del usuario integradas en él.

Por otra parte, el número de evaluaciones a realizar se hace muy alto si tenemos un número razonable de criterios y/o alternativas. Aunque cada una de las comparaciones es sencilla, un gran número de estas puede convertir el proceso en irrazonable, ya que el número de comparaciones experimenta un comportamiento cuadrático tanto con los criterios como con las alternativas. Para reducir esta carga de trabajo el método AHP puede ser parcial o incluso totalmente automatizado estableciendo umbrales adecuados para decidir el valor de algunas valoraciones.

Si recordamos los pasos de un método de toma de decisiones, las primeras fases eran las siguientes: definición del problema, definición de las alternativas, y definición y ponderación de los criterios. Es al final de este tercer paso donde empieza la implicación de nuestro método, cuyas etapas son descritas con detalle a continuación:

1. Cálculo del vector de pesos de criterios.
2. Cálculo de la matriz de puntuación de las alternativas.
3. Clasificación (ranking) de las alternativas.

### **Cálculo del vector de pesos de criterio**

Con el fin de calcular un peso para cada criterio, el método AHP comienza creando una matriz de comparación A. La matriz A es una matriz real  $m \times m$  donde  $m$  es el número de criterios de nuestro problema. Cada valor de la matriz  $a_{jk}$  representa la importancia relativa del criterio j con respecto al k. Si  $a_{jk} > 1$ , entenderemos que el criterio j tiene más importancia que k, si por el contrario  $a_{jk} < 1$ , el criterio j es menos importante que k. Para criterios con la misma importancia  $a_{jk} = 1$ , incluyendo los valores de la diagonal de la matriz  $j = k$ .

$$A = \begin{pmatrix} 1 & a_{12} & \dots & a_{1n} \\ a_{21} & 1 & \dots & a_{2n} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ a_{n1} & a_{n2} & \vdots & 1 \end{pmatrix}$$

Estructura Matriz

Además, los valores de la matriz tienen que cumplir el axioma de reciprocidad, a saber:

$$a_{jk} \cdot a_{kj} = 1 \quad (\text{Ecuación 1})$$

Por lo que el número de comparaciones que un usuario deberá realizar en este paso serán

$$\frac{m \cdot m - m}{2} \quad (\text{Ecuación 2})$$

Que corresponden a cualquiera de las dos diagonales (inferior o superior) de la matriz, siendo la diagonal opuesta calculada por el mencionado axioma de reciprocidad. Los valores con los que se rellenará dicha matriz serán valores numéricos extraídos de las comparaciones realizadas por los usuarios<sup>61</sup>.

Para las matrices de comparación pareadas, se usa una Escala Fundamental (Ver Tabla 4). Esta es la clave del método, usar una escala de comparación por pares, puesto que el cerebro humano está especialmente bien diseñado para comparar dos criterios o alternativas entre sí, pero menos cuando tiene que hacer comparaciones conjuntas.

---

<sup>61</sup> FONTANA, M. Métodos de decisión multicriterio AHP y PROMETHEE aplicados a la elección de un dispositivo móvil. Trabajo de grado Ingeniero Industrial. Universidad de Sevilla. Escuela Técnica Superior de Ingeniería. Sevilla. 2015. 9p

La comparación por parejas puede realizarse tomando como referencia la escala presentada en la tabla 23 donde 1 representa que dos criterios son igualmente importantes, mientras que el valor de 9 indica que uno de los criterios es absolutamente más importante. Los valores intermedios son condiciones que pueden usarse dependiendo del juicio.

**Tabla 27.** Escala para comparación por parejas

| Escala Numérica | Que tan importante es A con respecto a B         |
|-----------------|--|
| 1               | Igual importancia                                |
| 3               | Importancia moderada de un elemento sobre otro   |
| 5               | Importancia fuerte de un elemento sobre otro     |
| 7               | Importancia muy fuerte de un elemento sobre otro |
| 9               | Extrema importancia de un elemento sobre otro    |
| 2, 4, 6, 8      | Valores intermedios con incrementos              |

**Fuente:** A. Mofarrah, Decision Making Tool for Produced Water Management: An Application of Multicriteria Decision Making Approach, 2008, pp. 6-8

De esta forma, al usar la escala de importancia, se define la priorización por parejas, a diferentes niveles de jerarquía y se establece una matriz de comparación por parejas la cual es desarrollada definiendo los pesos de cada par denotado como  $w_i$  para el primer par  $i$  y un vector  $A$  definido como:

$$A = (a_1 \cdot a_2 \cdot a_3 \dots a_n) \text{ donde } = 1 \quad (\text{Ecuación 3})$$

Cuando se dispone de una escala, las prioridades relativas de los elementos que cuelgan de un nodo son conocidas directamente. En este caso, la matriz recíproca de comparaciones pareadas,  $A = (a_i/a_j)$ , queda como:

$$A = \begin{bmatrix} A_1/A_1 & A_1/A_2 & \dots & A_1/A_n \\ A_2/A_1 & A_2/A_2 & \dots & A_2/A_n \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ A_n/A_1 & A_n/A_2 & \dots & A_n/A_n \end{bmatrix}$$

Una vez construida la matriz  $A$ , el paso siguiente para la sintetización de los datos es obtener a partir de ella la matriz normalizada  $A_{norm}$ , igualando a la unidad la suma de los valores de cada columna. Cada valor esta matriz se calcula como:

$$\hat{a}_{jk} = \frac{a_{jk}}{\sum_{l=1}^m a_{lk}}$$

$$\begin{matrix} & \begin{matrix} C1 & C2 & \dots & Cm \end{matrix} \\ \begin{matrix} 1/\sum C1 \\ a_{21}/\sum C1 \\ \vdots \\ a_{m1}/\sum C1 \end{matrix} & \begin{matrix} a_{12}/\sum C2 \\ 1/\sum C2 \\ \vdots \\ a_{m2}/\sum C2 \end{matrix} & \dots & \begin{matrix} a_{1n}/\sum Cm \\ a_{2n}/\sum Cm \\ \vdots \\ 1/\sum Cm \end{matrix} \end{matrix}$$

Matriz  $A_{norm}$

Una vez calculada esta matriz, el vector  $w$  de pesos de criterio se obtiene calculando el valor medio de cada columna de  $A_{norm}$

$$w_j = \frac{\sum_{l=1}^m \hat{a}_{jl}}{m} \quad (\text{Ecuación 4})$$

## Cálculo de la matriz de puntuación de las alternativas

El primer paso para obtener la matriz que da nombre a este apartado habrá que construir tantas matrices  $B$  como criterios tengamos en nuestro problema. Estas matrices son matrices cuadradas de dimensión  $n$  siendo  $n$  el número de alternativas en nuestro problema. Estas matrices se conocen con el nombre de matrices de comparación a pares, y cada término  $b_{ih}^{(j)}$ , de una matriz  $B^{(j)}$ , la evaluación de la alternativa  $i$  con respecto a la  $h$  para el criterio  $j$ .

El modo de rellenar esta tabla sigue los mismos criterios y reglas que la matriz  $A$  del apartado anterior siguiendo una metodología similar a la anterior, con valores de 1 a 9 cuya interpretación se recoge en la tabla 4.

También deberán cumplir sus términos la relación de reciprocidad, por lo que el número de comparaciones que un usuario deberá realizar (por criterio) será:

$$\frac{n \cdot n - n}{2} \quad (\text{Ecuación 5})$$

Una vez obtenidas todas las matrices  $B^{(j)}$ , las cuales presentarán una estructura similar a la matriz  $A$ , se continua con el siguiente paso, el cual será aplicar la misma normalización, utilizando la misma metodología seguida para la obtención de la matriz normalizada  $A_{norm}$ .

Posteriormente, continuamos con el siguiente paso que aplicábamos en el apartado anterior, dando lugar a  $n$  vectores (vector columna de dimensión  $m$ ), que contendrán las evaluaciones de las  $m$  alternativas para cada criterio  $j$ .

Finalmente, la matriz de puntuación de alternativas  $S$  se construye simplemente adicionando los vectores  $s_j$ .

$$S = (s_1, s_2, s_3 \dots s_n) \quad (\text{Ecuación 6})$$

## Clasificación de las alternativas

Una vez hemos obtenido tanto el vector  $w$  como la matriz  $S$ , el último paso del método es obtener un vector  $v$  de puntuaciones globales mediante la simple operación:

$$v = S \cdot w \quad (\text{Ecuación 7})$$

El  $i$ -ésimo valor  $v_i$  del vector  $v$  representa la puntuación global asignada a la alternativa  $i$ . Por último, el ranking de alternativas se obtiene ordenando los valores obtenidos en orden decreciente<sup>62</sup>.

Una de las grandes ventajas del Proceso Analítico Jerárquico es que permite relajar las hipótesis tan restrictivas que imponía el enfoque tradicional en decisión (escuela utilitarista), en concreto no exige la transitividad en las preferencias. Además, permite evaluar el grado de consistencia del decisor a la hora de introducir los juicios en las matrices recíprocas de comparaciones pareadas<sup>63</sup>.

La comparación de las diferentes alternativas respecto al criterio del nivel inferior de la estructura jerárquica, como la comparación de los diferentes criterios de un mismo nivel jerárquico dan lugar a una matriz cuadrada denominada matriz de decisión. Esta matriz cumple con las propiedades de reciprocidad (si  $a_{ij}=x$ , entonces  $a_{ji}=1/x$ ), homogeneidad (si  $i$  y  $j$  son igualmente importantes,  $a_{ij} = a_{ji} = 1$ , y, además,  $a_{ii} = 1$  para todo  $i$ ), y consistencia (la matriz no debe contener contradicciones en la valoración realizada). La consistencia se obtiene mediante el índice de consistencia (Consistency Index, CI) donde  $\lambda_{\max}$  es el máximo autovalor y  $n$  es la dimensión de la matriz de decisión. Un índice de consistencia igual a cero significa que la consistencia es completa. Una vez obtenido CI, se obtiene la proporción de

---

<sup>62</sup> FONTANA, M. Métodos de decisión multicriterio AHP y PROMETHEE aplicados a la elección de un dispositivo móvil. Trabajo de grado Ingeniero Industrial. Universidad de Sevilla. Escuela Técnica Superior de Ingeniería. Sevilla. 2015. 10-12p

<sup>63</sup> JIMÉNEZ, J. El proceso analítico jerárquico (AHP). Fundamentos, metodología y aplicaciones. Rect@ Revista Electrónica de Comunicaciones y Trabajos de ASEPUMA, vol. 1. 2002. 28-77p.

consistencia (Consistency Ratio, CR) siendo aceptado siempre que no supere los valores indicados en la Tabla 5. Si en una matriz se supera el CR máximo, hay que revisar las ponderaciones

$$CI = \frac{\lambda_{max} - n}{n - 1} \quad (\text{Ecuación 8})$$

$$CR = \frac{CI}{RI} \quad (\text{Ecuación 9})$$

Donde RI es el índice aleatorio, que indica la consistencia de una matriz aleatoria (Tabla 5):

**Tabla 28.** Índice aleatorio RI

| Tamaño de matriz | 2 | 3    | 4   | 5    | 6    | 7    | 8    | 9    | 10   |
|------------------|---|------|-----|------|------|------|------|------|------|
| Índice aleatorio | 0 | 0,58 | 0,9 | 1,12 | 1,24 | 1,32 | 1,41 | 1,45 | 1,49 |

**Fuente:** UNIVERSITAT POLITECNICA DE VALENCIA. [Sitio web]. Valencia. 2018. [Fecha de consulta: 10 de junio de 2022]. Disponible en: <https://bit.ly/3x8pINR>

**Tabla 29.** Porcentajes máximos del ratio de consistencia CR

| Tamaño de matriz (n) | Radio de consistencia |
|----------------------|-----------------------|
| 3                    | 5%                    |
| 4                    | 9%                    |
| 5 o mayor            | 10%                   |

**Fuente:** UNIVERSITAT POLITECNICA DE VALENCIA. [Sitio web]. Valencia. 2018. [Fecha de consulta: 10 de junio de 2022]. Disponible en: <https://bit.ly/3x8pINR>

Una vez verificada la consistencia, se obtienen los pesos, que representan la importancia relativa de cada criterio o las prioridades de las diferentes alternativas respecto a un determinado criterio. Para ello, el AHP original utiliza el método de los autovalores, donde hay que resolver la siguiente ecuación<sup>64</sup>:

$$A \cdot w = \lambda_{max} \cdot w \quad (\text{Ecuación 10})$$

#### **4. MÉTODO POR MATRIZ DE EVALUACIÓN TECNOLÓGICA (MET).**

El método (MET) se basó en el proyecto original de gestión tecnológica de Pugh Roberts Associates y en las actividades de un grupo de PDVSA aconsejados por la empresa SRI Internacional, para el desarrollo de un área de proyectos tecnológicos según Gómez<sup>65</sup>.

Las técnicas de evaluación por opciones tecnológicas realizada por PDVSA se desarrollaron a partir de criterios que miden las particularidades cualitativas y cuantitativas, permitiendo la evaluación y jerarquización de manera sistemática y objetiva, dentro de cualquier oportunidad tecnológica en las áreas de explotación, producción y cualquier otra relacionada a la industria<sup>66</sup>. El método por matriz de evaluación tecnológica tiene seis (6) etapas:

1. Adaptación metodológica.
2. Selección y ponderación de criterios generales.
3. Definición y selección de criterios específicos.

---

<sup>64</sup> Fuente. UNIVERSITAT POLITECNICA DE VALENCIA. [Sitio web]. Valencia. 2018. [Fecha de consulta: 10 de junio de 2022]. Disponible en: <https://bit.ly/3x8pINR>

<sup>65</sup> GÓMEZ, Manuel. Evaluación y análisis comparativo de diferentes métodos de selección de sistemas de levantamiento artificial. Tesis de Magíster en Ciencias. Caracas: Universidad Central de Venezuela, 2005.

<sup>66</sup> BERNAL, Sergio; NIÑO, Daniel. Modelo multicriterio aplicado a la toma de decisiones representables en diagramas de Ishikawa. Tesis de pregrado. Bogotá: Universidad Distrital Francisco de Paula Santander, 2018, 40p.

4. Ponderación de criterios generales.
5. Evaluación y jerarquización de opciones tecnológicas.
6. Ponderación de criterios específicos<sup>67</sup>

## **5. MÉTODO PROMETHEE<sup>68</sup>.**

PROMETHEE (Método de Organización de Clasificación de Preferencias para Evaluaciones de Enriquecimiento) fue desarrollado por Jean-Pierre Brans y presentado por primera vez en 1982. El método posee las siguientes características:

Considera e integra en cada criterio un concepto básico de relación de graduación difusa mediante medidas de comparación por pares para alternativas a diferentes grados de relación entre sí. Estos diferentes grados de relación se usan luego para configurar un pre-orden parcial (PROMETHEE I), y/o un pre orden completo (PROMETHEE II). Como las evaluaciones de cada criterio se expresan en sus propias unidades, los efectos de escalado se eliminan por completo. No es aceptable obtener conclusiones según las escalas en las que se expresan las evaluaciones.

PROMETHEE minimiza al máximo el número de incomparabilidades cuando para un procedimiento específico, todas las incomparabilidades son sistemáticamente retiradas, la información suministrada puede ser más debatible. El método PROMETHEE evade los procedimientos de caja negra al incluir solamente parámetros técnicos que tienen significado para el que toma las decisiones. El método suministra información sobre la naturaleza conflictiva de los criterios y ofrece herramientas de sensibilidad para probar fácilmente diferentes conjuntos de

---

<sup>67</sup> SAATY, Thomas. The Analytic Network Process. Pittsburgh: RSW Publications, 1996.

<sup>68</sup> FONTANA, M. Métodos de decisión multicriterio AHP y PROMETHEE aplicados a la elección de un dispositivo móvil. Trabajo de grado Ingeniero Industrial. Universidad de Sevilla. Escuela Técnica Superior de Ingeniería. Sevilla. 2015. 14-20p

pesos. PROMETHEE permite crear criterios cualitativos con diferentes valores semánticos y es el propio tomador de decisiones, quien debe asignar valores numéricos a cada valor semántico. Esto es claramente un vacío significativo que crea un alto grado de incertidumbre.

Como ya sabemos, un problema multicriterio presente una estructura del tipo  $\max\{g_1(a), g_2(a), \dots, g_j(a), \dots, g_k(a) \mid a \in A\}$  donde  $A$  es un conjunto finito de alternativas  $\{a_1, a_2, \dots, a_i, \dots, a_n\}$  y  $\{g_1(\cdot), g_2(\cdot), \dots, g_j(\cdot), \dots, g_k(\cdot)\}$  un conjunto de criterios de evaluación. Por lo general este problema estará mal condicionado ya que ninguna alternativa maximizará la totalidad de los criterios, por lo que se deberá llegar a una solución de compromiso.

Figura 35. Estructura de un problema multicriterio

| $a$      | $g_1(\cdot)$ | $g_2(\cdot)$ | ...      | $g_j(\cdot)$ | ...      | $g_k(\cdot)$ |
|----------|--------------|--------------|----------|--------------|----------|--------------|
| $a_1$    | $g_1(a_1)$   | $g_2(a_1)$   | ...      | $g_j(a_1)$   | ...      | $g_k(a_1)$   |
| $a_2$    | $g_1(a_2)$   | $g_2(a_2)$   | ...      | $g_j(a_2)$   | ...      | $g_k(a_2)$   |
| $\vdots$ | $\vdots$     | $\vdots$     | $\ddots$ | $\vdots$     | $\ddots$ | $\vdots$     |
| $a_i$    | $g_1(a_i)$   | $g_2(a_i)$   | ...      | $g_j(a_i)$   | ...      | $g_k(a_i)$   |
| $\vdots$ | $\vdots$     | $\vdots$     | $\ddots$ | $\vdots$     | $\ddots$ | $\vdots$     |
| $a_n$    | $g_1(a_n)$   | $g_2(a_n)$   | ...      | $g_j(a_n)$   | ...      | $g_k(a_n)$   |

**Fuente:** FONTANA, M. Métodos de decisión multicriterio AHP y PROMETHEE aplicados a la elección de un dispositivo móvil. Trabajo de grado Ingeniero Industrial. Universidad de Sevilla. Escuela Técnica Superior de Ingeniería. Sevilla. 2015. 14p

Para un problema de esta índole, las relaciones de dominancia se establecen del siguiente modo:

Para cada par de alternativas  $(a, b) \in A$ :

$$\begin{cases} \forall j: g_j(a) \geq g_j(b) \\ \exists k: g_k(a) > g_k(b) \end{cases} \Leftrightarrow aPb \quad (\text{Ecuación 10})$$

$$\forall j: g_j(a) = g_j(b) \quad \Leftrightarrow \quad alb \quad (\text{Ecuación 11})$$

$$\left\{ \begin{array}{l} \forall j: g_j(a) \geq g_j(b) \\ \Leftrightarrow aRb \\ \exists k: g_k(a) < g_k(b) \end{array} \right. \quad (\text{Ecuación 12})$$

Donde P, I, R significan preferencia, indiferencia e incomparabilidad respectivamente. Una alternativa será mejor que otra (P) si es mejor que ella en todos los criterios; si en unos criterios se considera mejor y en otros peor, son incomparables  $\otimes$  si no añadimos información adicional. Las alternativas que no son dominadas por ninguna otra se denominan soluciones eficientes. En un problema multicriterio general, la mayoría de las soluciones (frecuentemente todas) serán de este tipo, por lo que es imposible decidir sin información adicional.

En el método PROMETHEE, dicha información requerida es muy concisa, y a su vez fácil de conseguir y comprensible tanto para los *decisión-makers* o usuarios como para los analistas. El objetivo de los métodos multicriterio es reducir al máximo el número de *incomparabilidades* (R). Muchos de ellos construyen una única función objetivo, transformando así el problema en uno con un único criterio para el que existe una solución óptima. Este método puede resultar simplista ya que se basa en demasiadas suposiciones. Aquí se propone enriquecer las relaciones de dominancia creando relaciones de superación (*outranking relations*).

Para la elaboración de nuestro método multicriterio, se han tenido en cuenta los siguientes requisitos:

1. Habrá que tener en cuenta el valor de la diferencia entre las evaluaciones de las alternativas en cada criterio

$$d_j(a, b) = g_j(a) - g_j(b) \quad (\text{Ecuación 13})$$

2. Como las evaluaciones  $g_j(a)$  de cada criterio serán expresadas en sus propias unidades, deberán eliminarse todos los efectos de escala. No es aceptable obtener una conclusión dependiente de la escala en la que las evaluaciones se presentan, aspecto que no se respeta en otros métodos.
3. En comparaciones por pares, un método adecuado debe proveer si existe preferencia, indiferencia o incomparabilidad. El propósito es reducir las incomparabilidades, pero esto no significa hacerlo incluso cuando no sea realista. Si para un método se tiene que todas las incomparabilidades son automáticamente retiradas la información obtenida puede ser cuestionable.
4. El método debe ser comprensible para los usuarios del mismo, para ello se deben evitar procedimientos tipo *caja negra*
5. Relacionado con lo anterior, debemos evitar el uso de parámetros técnicos sin transcendencia para los usuarios.
6. El método debe proporcionar información acerca de la naturaleza conflictiva del problema.

Prácticamente todos los métodos asignan pesos de importancia relativa a los criterios, los cuales reflejan la opinión del usuario. Estos pesos no son fáciles de decidir y a veces los usuarios dudan. Un buen método debe ofrecer herramientas para probar sin dificultad diferentes conjuntos de pesos.

### **Información para modelar la preferencia**

Como se mencionó anteriormente, los problemas multicriterio necesitan de información adicional a la aportada por el cuadro de evaluación. Para el método PROMETHEE esta información es clara, comprensible y consiste en:

- **Información entre criterios**

La información necesaria en este aspecto para el método PROMETHEE no difiere de la utilizada en otros métodos multicriterio. Son los denominados pesos relativos  $\{w_j, j = 1, 2, \dots, k\}$ . Son números no negativos y adimensionales y se les asignará un valor (el criterio de asignación de los valores para los pesos no es competencia del método PROMETHEE) mayor cuanto más alta sea la importancia del criterio. Una vez obtenidos los valores estos serán normalizados quedando:

$$\sum_{j=1}^k w_j = 1 \quad (\text{Ecuación 14})$$

Asociar pesos a criterios es una tarea complicada, ya que implica percepciones y prioridades del usuario. Es, por así decirlo, su espacio de libertad. El método PROMETHEE proporciona herramientas para probar fácilmente con diferentes conjuntos de pesos con el fin de ajustarlos y ver como dichos ajustes intervienen en la decisión a tomar.

- **Información para cada criterio**

El método PROMETHEE está basado en comparaciones por parejas, por lo que se tendrá en cuenta la diferencia en valor entre dos evaluaciones de dos alternativas para un criterio dado. Si esta diferencia es pequeña, se asignará una pequeña preferencia o incluso indiferencia si ésta se considera insignificante. No existe ninguna objeción para considerar esta relación de preferencia como un número real entre 0 y 1. Entonces para cada criterio se tiene una *función de preferencia*:

$$P_j(a, b) = F_j(a, b)\{d_j(a, b)\} \quad \forall (a, b) \in A \quad (\text{Ecuación 15})$$

Donde

$$d_j(a, b) = g_j(a) - g_j(b) \quad (\text{Ecuación 16})$$

Y

$$0 \leq P_j(a, b) \leq 1 \quad (\text{Ecuación 17})$$

Si el criterio debe ser maximizado, esta función da preferencia a  $a$  sobre  $b$  para diferencias calculadas con respecto al criterio  $g_j \cdot P_j$  valdrá 0 si esta diferencia es negativa. También se cumple la siguiente propiedad:

$$P_j(a, b) = 0 \Rightarrow P_j(b, a) = 1 \quad (\text{Ecuación 18})$$

Para criterios que deban ser minimizados, la función de preferencia se reescribirá como

$$P_j(a, b) = F_j\{-d_j(a, b)\} \quad (\text{Ecuación 18})$$

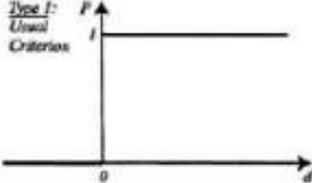
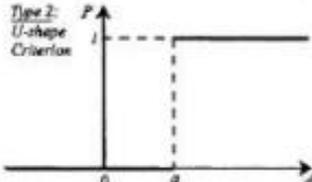
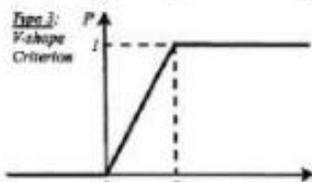
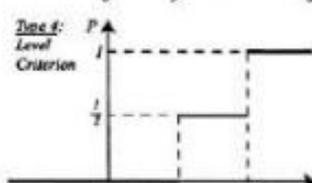
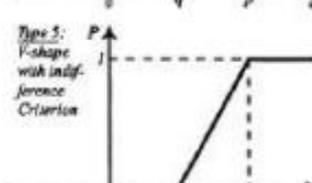
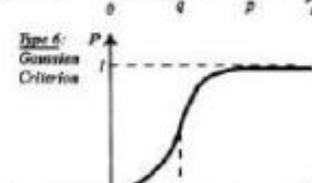
El conjunto  $\{g_j(\cdot), P_j(a, b)\}$  se conoce como el criterio generalizado asociado a  $g_j$ , y debe ser definido para cada criterio. En la Fig. 10 se muestran seis tipos comunes de criterios generalizados.

Los parámetros a definir en las tablas tienen su significado claro:

- $q$  es el umbral de indiferencia, valor máximo de la diferencia entre dos alternativas para los que ésta se considera insignificante.
- $p$  es el umbral de preferencia estricta, valor mínimo de la diferencia entre dos alternativas para los que se considera preferencia absoluta.
- $s$  (para modelos más complejos), es el punto de inflexión en modelos más avanzados

Se ha comprobado que estos seis tipos son aplicables a la gran mayoría de aplicaciones de problemas reales, aunque se deja a elección del analista establecer otras ecuaciones. Así la elección de un criterio generalizado queda reducido a la elección de los parámetros apropiados, lo cual se puede considerar una tarea sencilla.

Figura 36. Modelos básicos de criterios generalizados

| Criterio generalizado  | Definición   | Parámetros a ajustar |
|--|--|----------------------|
| <p>Type 1:<br/>Usual<br/>Criterion</p>                                  | $P(d) = \begin{cases} 0 & d \leq 0 \\ 1 & d > 0 \end{cases}$                                   | -                    |
| <p>Type 2:<br/>U-shape<br/>Criterion</p>                                | $P(d) = \begin{cases} 0 & d \leq q \\ 1 & d > q \end{cases}$                                   | q                    |
| <p>Type 3:<br/>V-shape<br/>Criterion</p>                                | $P(d) = \begin{cases} 0 & d \leq 0 \\ \frac{d}{p} & 0 < d \leq p \\ 1 & d > p \end{cases}$     | p                    |
| <p>Type 4:<br/>Level<br/>Criterion</p>                                 | $P(d) = \begin{cases} 0 & d \leq q \\ \frac{1}{2} & q < d \leq p \\ 1 & d > p \end{cases}$     | p, q                 |
| <p>Type 5:<br/>V-shape<br/>with indif.<br/>ference<br/>Criterion</p>  | $P(d) = \begin{cases} 0 & d \leq q \\ \frac{d-q}{p-q} & q < d \leq p \\ 1 & d > p \end{cases}$ | p, q                 |
| <p>Type 6:<br/>Gaussian<br/>Criterion</p>                             | $P(d) = \begin{cases} 0 & d \leq 0 \\ 1 - e^{-\frac{d^2}{2s^2}} & d > 0 \end{cases}$           | s                    |

**Fuente:** FONTANA, M. Métodos de decisión multicriterio AHP y PROMETHEE aplicados a la elección de un dispositivo móvil. Trabajo de grado Ingeniero Industrial. Universidad de Sevilla. Escuela Técnica Superior de Ingeniería. Sevilla. 2015. 17p

## Parámetros previos para la implementación

Antes de empezar con el método definiremos dos parámetros necesarios para su implementación

- **Índice de preferencia agregado**

Sean  $a, b \in A$  y sea:

$$\pi(a, b) = \sum_{j=1}^k P_j(a, b)w_j \quad (\text{Ecuación 20})$$

$$\pi(b, a) = \sum_{j=1}^k P_j(b, a)w_j \quad (\text{Ecuación 21})$$

$\pi(a, b)$  expresa que grado de preferencia tiene  $a$  sobre  $b$  considerando todos los criterios. indica la preferencia de  $b$  sobre  $a$ . Ambos índices de preferencia agregada tienen las siguientes propiedades:

$$\left\{ \begin{array}{l} \pi(a, a) = \pi(b, b) = 0 \\ 0 \leq \pi(a, b) \leq 1 \\ 0 \leq \pi(b, a) \leq 1 \\ 0 \leq \pi(a, b) + \pi(b, a) \leq 1 \end{array} \right.$$

Por la propia definición de los índices se deduce que un valor de  $\pi(a, b)$  próximo a 1 indicará una preferencia global de  $a$  sobre  $b$ , mientras que un valor próximo a 0 indicará debilidad. Como se observa en la cuarta propiedad de los índices, la complementariedad es solo un caso particular del par de índices por lo que una debilidad global de  $a$  sobre  $b$  no necesariamente implicará una preferencia global de  $b$  sobre  $a$ .

- **Flujos de superación**

En cada problema, una alternativa  $a$  se enfrenta a las  $(n-1)$  alternativas restantes que definen  $A$ . Entonces definimos:

$$\phi^+(a) = \frac{1}{n-1} \sum_{x \in A} \pi(a, x) \quad (\text{Ecuación 22})$$

$$\phi^-(a) = \frac{1}{n-1} \sum_{x \in A} \pi(x, a) \quad (\text{Ecuación 23})$$

Que se conocen como flujo de relevancia positivo y flujo de relevancia negativo. El primero indica como una alternativa  $a$  es de relevante frente al resto, muestra su carácter dominador. Cuanto más alto, mejor será la alternativa. El segundo muestra su debilidad, como es dominada por el resto de alternativas. Cuanto más bajo es su valor, mejor resulta la alternativa.

### **PROMETHEE I: La clasificación parcial**

En este método, la clasificación se obtiene usando los flujos positivos y negativos de relevancia. Es importante caer en la cuenta de que si usáramos ambos flujos por separados las clasificaciones no saldrían las mismas, por tanto, este método usa una intersección de ambos. PROMETHEE las siguientes clasificaciones:

$$aP^I b \Leftrightarrow \begin{cases} \phi^+(a) > \phi^+(b) \text{ y } \phi^-(a) < \phi^-(b), \text{ o} \\ \phi^+(a) = \phi^+(b) \text{ y } \phi^-(a) < \phi^-(b), \text{ o} \\ \phi^+(a) > \phi^+(b) \text{ y } \phi^-(a) = \phi^-(b) \end{cases} \quad (\text{Ecuación 24})$$

$$aI^I b \Leftrightarrow \phi^+(a) = \phi^+(b) \text{ y } \phi^-(a) = \phi^-(b) \quad (\text{Ecuación 25})$$

$$aR^I b \Leftrightarrow \begin{cases} \phi^+(a) > \phi^+(b) \text{ y } \phi^-(a) > \phi^-(b), \text{ o} \\ \phi^+(a) < \phi^+(b) \text{ y } \phi^-(a) > \phi^-(b) \end{cases} \quad (\text{Ecuación 26})$$

Donde P, I, R indican (como ya se comentó en la introducción) preferencia, indiferencia e incomparabilidad. Extendiéndonos un poco más diremos que  $aP^I b$  significa que un mayor poder de  $a$  sobre  $b$ , también lleva asociada una menor debilidad de  $a$  sobre  $b$  (como se explicó anteriormente este hecho no es trivial pues los flujos no son complementarios).  $aI^I b$  es el caso en que ambos flujos son iguales para las dos alternativas. Por último, la incomparabilidad se da en casos en los que  $a$  es mejor que  $b$  sólo para algunos criterios, siendo superada en otros. Entonces los resultados no son consistentes y hay que tratarlo con cuidado. El método PROMETHEE I es prudente y no decide que alternativa es mejor, recayendo la decisión sobre el *decision-maker*.

## PROMETHEE II: La clasificación completa

En este método las clasificaciones de incomparabilidad se eliminan de una manera razonable. Si definimos el flujo neto de relevancia (*net outranking flow*) como

$$\phi(a) = \phi^+(a) - \phi^-(a) \quad (\text{Ecuación 27})$$

Obtendremos las siguientes relaciones:

$$aP^{II} b \Leftrightarrow \phi(a) > \phi(b) \quad (\text{Ecuación 28})$$

$$aP^{II}b \Leftrightarrow \phi(a) = \phi(b) \quad (\text{Ecuación 29})$$

Como hemos dicho anteriormente, en este método todas las alternativas son comparables, aunque a su vez la información requiere más estudio ya que al calcular el flujo neto como la resta de flujos se pierde una valiosa cantidad de información. Dicho flujo neto tiene las siguientes propiedades:

$$\begin{cases} -1 \leq \phi(a) \leq 1 \\ \sum_{x \in A} \phi(a) = 0 \end{cases} \quad (\text{Ecuación 30})$$

Cuando el valor de  $\phi(a) > 0$ , la alternativa es más dominadora que dominada por el resto, en el caso negativo, la solución es por general dominada por las demás. El flujo neto de este método podría ser comparado con las funciones de utilidad u objetivo de otros métodos.

En la práctica real se deben usar ambas clasificaciones ya que, aunque PROMETHEE II es sencillo de usar, el análisis de incomparabilidades que ofrece PROMETHEE I puede ayudar a tomar la decisión apropiada.

#### 2.4.1.5.5 Los perfiles de las alternativas

Si desarrollamos las fórmulas de flujos positivos y negativos y la de índice de preferencia agregado, el flujo neto de relevancia se puede reescribir de la siguiente forma

$$\phi(a) = \phi^+(a) - \phi^-(a) = \frac{1}{n-1} \sum_{j=1}^k \sum_{x \in A} [P_j(a, x) - P_j(x, a)] w_j \quad (\text{Ecuación 31})$$

y por tanto

$$\phi(a) = \sum_{j=1}^k \sum_{x \in A} \phi_j(a) \cdot w_j \quad (\text{Ecuación 32})$$

con

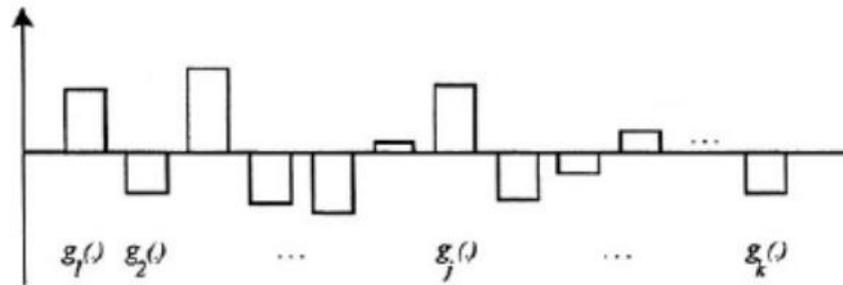
$$\phi_j(a) = \frac{1}{n-1} \sum_{x \in A} [P_j(a, x) - P_j(x, a)] \quad (\text{Ecuación 33})$$

$\phi_j(a)$  es el flujo neto de relevancia cuando solo consideramos el criterio  $g_j(\cdot)$ . El perfil de una alternativa se define como el conjunto de todos los flujos netos para cada criterio.

Con la elaboración de los perfiles de las alternativas se puede apreciar la calidad de una alternativa según los criterios y completar apreciaciones, también para entender algunos resultados que se puedan obtener.

Matemáticamente es el producto vectorial del vector de perfiles de una alternativa y el vector de pesos ponderados.

Figura 37. Representación gráfica del perfil de una alternativa



**Fuente:** FONTANA, M. Métodos de decisión multicriterio AHP y PROMETHEE aplicados a la elección de un dispositivo móvil. Trabajo de grado Ingeniero Industrial. Universidad de Sevilla. Escuela Técnica Superior de Ingeniería. Sevilla. 2015. 20p

## 6. MATRIX DE PUGH

A la hora de tomar decisiones es fundamental que dejemos de lado la subjetividad. Existen numerosas técnicas para lograr objetividad en las decisiones. Una de ellas es la denominada Matriz de Pugh, en honor a su creador: el británico Stuart Pugh. Pugh fue un reconocido ingeniero de diseño, responsable de acuñar el concepto de diseño total. El diseño total es la actividad sistemática necesaria que va desde la identificación de la necesidad del mercado/usuario hasta la venta exitosa del producto para satisfacerla. Una actividad que abarca productos, procesos, personas y organizaciones (Pugh, 1990).

La Matriz de Pugh es una herramienta cuantitativa que permite comparar opciones entre sí mediante un arreglo multidimensional (una matriz de decisiones). Su aplicación más habitual es durante la fase de diseño de un producto, ya sea completamente nuevo o una actualización de uno existente. El primer paso es identificar los criterios que serán evaluados. Los criterios son básicamente las necesidades del cliente. Estos son ubicados generalmente como filas de la matriz. Luego se deben especificar los posibles conceptos de diseño que apunten al cumplimiento de los criterios definidos. Los mismos aparecerán en las columnas de la matriz.

En general, se utiliza la Matriz de Pugh cuando se desea realizar una mejora a un producto existente. El diseño actual del producto se toma como referencia, el cual aparece como una columna sobre la que se realizarán las comparaciones posteriores. Mediante el uso de técnicas grupales como el brainstorming se irá evaluando cada criterio para cada alternativa de diseño (concepto) comparándolo con el diseño de referencia, la situación actual.

El primer paso del proceso es establecer una lista de criterios de diseño que finalmente permitan determinar el rendimiento técnico, operativo y comercial del producto. El propósito principal en esta etapa es identificar las variables que tendrán

mayor potencial para influir en el proceso de diseño y el producto final (Grenier, 1990; Simon, 1995). Una la determinación precisa de los criterios de diseño requiere una investigación integral, que pueden incluir procedimientos, tales como, literatura topográfica, bases de datos, informes, estadísticas y especificaciones del producto o la adquisición de datos a través de cuestionarios, encuestas y grupos focales. Los procesos de investigación podrían incluir además una evaluación holística de las decisiones de diseño, procesos, propiedades físicas, químicas y estéticas y comentarios positivos y negativos de los usuarios de productos similares actualmente disponible en el mercado. Después de crear una lista de criterios inicial, debe optimizarse aún más, cualquiera de los elementos superpuestos debe fusionarse, los criterios con impacto limitado deben eliminarse. Este proceso también tiene una función secundaria, lo que permite que el equipo de diseño se familiarice con los criterios y puedan entender su posible impacto. No obstante, la lista de criterios en cuestión no debería considerarse como una lista constante. A medida que avanza el proceso de diseño, pueden surgir nuevos criterios, los criterios existentes pueden ser modificado, o cualquier criterio inútil puede ser eliminado<sup>69</sup>.

El segundo paso es definir la fuerza y la naturaleza de las relaciones entre cada par de criterios. Un problema de diseño a menudo se compone de una red de subproblemas interrelacionados que se abordan simultáneamente (Buchanan, 1992; Dorst & Cross, 2001). Esta naturaleza compleja del problema de diseño, implica que cualquier decisión de diseño tomada con respecto a cualquier criterio, afectará qué tan bien funcionará el producto. Al satisfacer otros criterios debido a la naturaleza emergente del proceso de diseño, es probable que el equipo de diseño pueda perder la perspectiva de los criterios de diseño subyacentes y, en cambio, centrar el tiempo y la energía en tareas y aspectos específicos del problema de diseño (Buchanan, 1992; Rittel & Webber, 1973). Esto subraya la importancia de

---

<sup>69</sup> GULER, Kutay; PETRISOR, Denisa Mirela. A Pugh Matrix based product development model for increased small design team efficiency. *Cogent Engineering*, vol. 8, no 1. 2021. 3p.

organizar los criterios de diseño y las interrelaciones de manera clara y legible, evitando a su vez la desconexión conceptual que podría ocurrir a medida que avanza el diseño. Como el número de criterios crece, la cantidad y complejidad de las relaciones de criterios a definir aumentan exponencialmente.

El tercer paso en el proceso es determinar el peso de cada criterio. Los pesos de los criterios pueden ser determinados por los miembros de un equipo de diseño a través de debates, stakeholders, personal experimentado o se pueden emplear métodos técnicamente exigentes, intensivos en recursos y a largo plazo, como Quality-FunctionDeployment (QFD) (Clausing, 1994). Cuestionarios de usuarios o los estudios del grupo focal también pueden utilizarse para este propósito; sin embargo, esto podría no ser óptimo para cada situación, especialmente cuando hay consideraciones de tiempo, presupuesto y recursos humanos, así como el acceso a la experiencia requerida para la aplicación precisa y consistente de la metodología es limitado<sup>70</sup>.

La mecánica para llenar la matriz, utilizando el formato mostrado en la tabla 26. y realizar las comparaciones entre pares de alternativas, es la siguiente: se toma la primera alternativa de diseño y se analiza criterio por criterio si su cumplimiento es superior al diseño actual, es inferior o es igual. Si es superior se coloca un signo «+», si es inferior un signo «-» y si es igual un «0». Para mayor comodidad, se suelen utilizar los números +1, -1 y 0 respectivamente ya que permiten operar en planillas de cálculo. Utilizaremos esta última nomenclatura de aquí en adelante. Una vez completada toda la tabla, se realiza la suma de cada columna. El concepto de diseño que obtenga un resultado mayor, producto del balance entre aspectos positivos y negativos, será la «mejor solución»<sup>71</sup>.

---

<sup>70</sup> GULER, Kutay; PETRISOR, Denisa Mirela. A Pugh Matrix based product development model for increased small design team efficiency. *Cogent Engineering*, vol. 8, no 1. 2021. 4p

<sup>71</sup> La Matriz de Pugh para la toma de decisiones [en Línea]. Buenos Aires. 2016. [Fecha de consulta: 10 de junio de 2022]. Disponible en: <https://cutt.ly/sJVVBun>

**Tabla 30.** Formato Matriz de Pugh

| CRITERIOS  | ALTERNATIVAS DE DISEÑO |               |               |               |               |               |               |
|------------|------------------------|---------------|---------------|---------------|---------------|---------------|---------------|
|            | Referencia             | Alternativa 1 | Alternativa 2 | Alternativa 3 | Alternativa 4 | Alternativa 5 | Alternativa 6 |
| Criterio 1 | REF                    |               |               |               |               |               |               |
| Criterio 2 | REF                    |               |               |               |               |               |               |
| Criterio 3 | REF                    |               |               |               |               |               |               |
| Criterio 4 | REF                    |               |               |               |               |               |               |
| Criterio 5 | REF                    |               |               |               |               |               |               |
| TOTAL      |                        |               |               |               |               |               |               |

Fuente Calidad Total [Sitio web]. Buenos Aires: Calidad Total, La Matriz de Pugh para la toma de decisiones [Consulta: 10 de junio de 2022]. Disponible en: <https://cutt.ly/sJVVBun>

**ANEXO B**

**EVALUACIÓN DE LAS PRINCIPALES TECNOLOGÍAS DE REVALORIZACIÓN  
DE ACEITES LUBRICANTES UTILIZADAS A NIVEL MUNDIAL**

**Tabla 4.** Listado de criterios o atributo a evaluar.

| <b>Listados de criterios</b> |                                |
|------------------------------|--------------------------------|
| 1                            | Tasa de reciclaje              |
| 2                            | Materiales químicos peligrosos |
| 3                            | Requerimientos de espacio      |
| 4                            | Maduración de la tecnología    |
| 5                            | Capacidad de producción        |
| 6                            | Calidad del producto terminado |
| 7                            | Consumo energético             |
| 8                            | Impacto ambiental              |
| 9                            | Capex                          |
| 10                           | Opex                           |

**Fuente:** Elaborado por el autor.

Para realizar las evaluaciones entre los distintos atributos y/o criterios de las tecnologías descritas en la sección 2.3, se tuvo en cuenta el estudio realizado en (HSU & LIU, 2011), donde se plantearon los aspectos económicos, operativos y ambientales de las tecnologías anteriormente enunciadas, estos valores los podemos observar en las tablas 5 y 6.

**Tabla 5.** Tabla comparativa de varias tecnologías de regeneración (aspecto económico)

| <b>Tecnología de regeneración</b>         | <b>Madurez de la tecnología</b> | <b>Energía requerida</b> | <b>Tasa de reciclaje</b> | <b>Calidad de la base recuperada</b> | <b>Demanda de equipos</b> | <b>Costos operativos</b> | <b>Escala (Kton/año)</b> |
|---|---------------------------------|--------------------------|--------------------------|--------------------------------------|---------------------------|--------------------------|--------------------------|
| Proceso ácido-arcilla                     | Nivel industrial                | Bajo                     | 63%                      | Mala                                 | Baja                      | Bajos                    | Pequeña (2-10)           |
| Proceso de destilación                    | Nivel industrial                | Alto                     | 50%                      | Mala                                 | Medio                     | Bajos                    | Medio (25)               |
| Extracción con Solvente                   | Nivel industrial                | Alto                     | 65% - 70%                | API Grupo I                          | Alto                      | Altos                    | Medio (25)               |
| TFE + hidroacabado                        | Nivel industrial                | Alto                     | 72%                      | API Grupo II                         | Alto                      | Altos                    | Grande (50 - 80)         |
| TFE + acabado de arcilla                  | Nivel industrial                | Alto                     | 72%                      | API Grupo II                         | Alto                      | Altos                    | Grande (100)             |
| TFE + acabado solvente                    | Nivel industrial                | Alto                     | 72%                      | API Grupo II                         | Alto                      | Altos                    | Grande (100)             |
| Extracción con solventes con hidroacabado | Nivel industrial                | Alto                     | 74%                      | API Grupo II                         | Alto                      | Altos                    | Medio (60)               |

**Fuente:** HSU, Yu-Lung; LIU, Chun-Chu. Evaluation and selection of regeneration of waste lubricating oil technology. Environmental monitoring and assessment, vol. 176, no 1. 2011. 202p.

**Tabla 6.** Tabla comparativa de varias tecnologías de regeneración (aspecto de protección ambiental)

| <b>Tecnología de regeneración</b>           | <b>Cantidad de lodo acido generado</b> | <b>Cantidad de aceite residual generado</b> | <b>Sustancias químicas peligrosas aplicadas en el proceso</b> | <b>Produce contaminación secundaria o no</b> |
|---|--|---|---|--|
| Proceso ácido-arcilla                       | Mucho                                  | Mucho                                       | Ácido sulfúrico   | Si   |
| Proceso de destilación                      | Poco                                   | Mucho                                       | Ácido sulfúrico   | Si   |
| Extracción con Solvente                     | Poco                                   | Mucho                                       | Ácido sulfúrico y solventes orgánicos                         | Si   |
| TFE + hidroacabado                          | Ninguna                                | Poco  | Ninguna   | Poco o ninguno                               |
| TFE + acabado de arcilla                    | Ninguna                                | Poco  | Ninguna   | Poco o ninguno                               |
| TFE + acabado solvente                      | Ninguna                                | Poco  | Solventes orgánicos   | Poco o ninguno                               |
| Extracción con disolventes con hidroacabado | Ninguna                                | Poco  | Solventes orgánicos   | Poco o ninguno                               |

**Fuente:** HSU, Yu-Lung; LIU, Chun-Chu. Evaluation and selection of regeneration of waste lubricating oil technology. Environmental monitoring and assessment, vol. 176, no 1. 2011. 203p.

Considerando lo descrito en la sección 2.4.1 Clasificación métodos de decisión multicriterio, teniendo en cuenta que, para nuestro caso, la selección de la mejor alternativa resultara de una serie de comparaciones por parejas entre los criterios o atributos de las tecnologías a evaluar. Por tanto, de los métodos de decisión multicriterio descritos, para realizar los análisis, se tomará el Proceso Analítico Jerárquico o “Analytic Hierarchy Process” (AHP por sus siglas en inglés), el cual permite involucrar criterios tanto cuantitativos como cualitativos; descrito en la sección 2.4.1.3 Proceso analítico jerárquico AHP, en el cual se seguirán los siguientes pasos:

- Cálculo del vector de pesos de criterio
- Cálculo de la matriz de puntuación de las alternativas
- Clasificación de las alternativas

### **Cálculo del vector de pesos de criterio**

La comparación por parejas se realizará tomando como referencia la escala presentada en la tabla 4 donde 1 representa que dos criterios son igualmente importantes, mientras que el valor de 9 indica que uno de los criterios es absolutamente más importante. Los valores intermedios son condiciones que pueden usarse dependiendo del juicio.

De esta forma, al usar la escala de importancia, se define la priorización por parejas, a diferentes niveles de jerarquía y se establece una matriz de comparación por parejas la cual es desarrollada definiendo los pesos de cada par denotado como  $w_i$  para el primer par  $i$  y un vector  $A$ .

**Tabla 31.** Cálculo del vector de pesos de criterio

| <b>Listados de criterios</b>     | Tasa de reciclaje | Materiales químicos peligrosos | Requerimientos de espacio | Maduración de la tecnología | Capacidad de producción | Calidad del producto terminado | Consumo energético | Impacto ambiental | Capex | Opex |
|----------------------------------|-------------------|--------------------------------|---------------------------|-----------------------------|-------------------------|--------------------------------|--------------------|-------------------|-------|------|
| 1 Tasa de reciclaje              | 1                 | 5                              | 5                         | 3                           | 1/2                     | 3                              | 2                  | 1/2               | 1/3   | 1/3  |
| 2 Materiales químicos peligrosos | 1/5               | 1                              | 1/2                       | 1/2                         | 1/7                     | 1/3                            | 1/3                | 1/5               | 1/9   | 1/7  |
| 3 Requerimientos de espacio      | 1/5               | 2                              | 1                         | 1/3                         | 1/5                     | 2                              | 1/2                | 1/5               | 1/9   | 1/7  |
| 4 Maduración de la tecnología    | 1/3               | 2                              | 3                         | 1                           | 1/3                     | 2                              | 3                  | 1/3               | 1/5   | 1/3  |
| 5 Capacidad de producción        | 2                 | 7                              | 5                         | 3                           | 1                       | 3                              | 2                  | 1/3               | 1/3   | 1/3  |
| 6 Calidad del producto terminado | 1/3               | 3                              | 1/2                       | 1/2                         | 1/3                     | 1                              | 1/3                | 1/5               | 1/9   | 1/7  |
| 7 Consumo energético             | 1/2               | 3                              | 2                         | 1/3                         | 1/2                     | 3                              | 1                  | 1/3               | 1/5   | 1/3  |
| 8 Impacto ambiental              | 2                 | 4                              | 5                         | 3                           | 3                       | 5                              | 3                  | 1                 | 1/5   | 1/3  |
| 9 Capex                          | 3                 | 9                              | 9                         | 5                           | 3                       | 9                              | 5                  | 5                 | 1     | 3    |
| 10 Opex                          | 3                 | 7                              | 7                         | 3                           | 3                       | 7                              | 3                  | 3                 | 1/3   | 1    |

**Fuente:** Elaborado por el autor.

**Tabla 7.** Datos Normalización del vector de pesos de criterio

| Listados de criterios            | Tasa de reciclaje | Materiales químicos peligrosos | Requerimientos de espacio | Maduración de la tecnología | Capacidad de producción | Calidad del producto terminado | Consumo energético | Impacto ambiental | Capex | Opex |
|----------------------------------|-------------------|--------------------------------|---------------------------|-----------------------------|-------------------------|--------------------------------|--------------------|-------------------|-------|------|
| 1 Tasa de reciclaje              | 0,08              | 0,12                           | 0,13                      | 0,15                        | 0,04                    | 0,08                           | 0,10               | 0,05              | 0,11  | 0,05 |
| 2 Materiales químicos peligrosos | 0,02              | 0,02                           | 0,01                      | 0,03                        | 0,01                    | 0,01                           | 0,02               | 0,02              | 0,04  | 0,02 |
| 3 Requerimientos de espacio      | 0,02              | 0,05                           | 0,03                      | 0,02                        | 0,02                    | 0,06                           | 0,02               | 0,02              | 0,04  | 0,02 |
| 4 Maduración de la tecnología    | 0,03              | 0,05                           | 0,08                      | 0,05                        | 0,03                    | 0,06                           | 0,15               | 0,03              | 0,07  | 0,05 |
| 5 Capacidad de producción        | 0,16              | 0,16                           | 0,13                      | 0,15                        | 0,08                    | 0,08                           | 0,10               | 0,03              | 0,11  | 0,05 |
| 6 Calidad del producto terminado | 0,03              | 0,07                           | 0,01                      | 0,03                        | 0,03                    | 0,03                           | 0,02               | 0,02              | 0,04  | 0,02 |
| 7 Consumo energético             | 0,04              | 0,07                           | 0,05                      | 0,02                        | 0,04                    | 0,08                           | 0,05               | 0,03              | 0,07  | 0,05 |
| 8 Impacto ambiental              | 0,16              | 0,09                           | 0,13                      | 0,15                        | 0,25                    | 0,14                           | 0,15               | 0,09              | 0,07  | 0,05 |
| 9 Capex                          | 0,24              | 0,21                           | 0,24                      | 0,25                        | 0,25                    | 0,25                           | 0,25               | 0,45              | 0,34  | 0,49 |
| 10 Opex                          | 0,24              | 0,16                           | 0,18                      | 0,15                        | 0,25                    | 0,20                           | 0,15               | 0,27              | 0,11  | 0,16 |

**Fuente:** Elaborado por el autor.

Evaluación de la Consistencia de la matriz de orden n = 10

**CR = 0,0704 < 10%**

**Tabla 32.** Cálculo de la matriz de puntuación de las alternativas

| Listados de Alternativas |                                      | Proceso ácido-arcilla | Proceso de destilación | Extracción solvente con hidroacabado | TFE + acabado solvente | TFE + acabado de arcilla | TFE + hidroacabado | Proceso de Extracción con solventes |
|--------------------------|--------------------------------------|-----------------------|------------------------|--------------------------------------|------------------------|--------------------------|--------------------|-------------------------------------|
| 1                        | Proceso ácido-arcilla                | 1                     | 1/5                    | 3                                    | 1/3                    | 1/2                      | 1/7                | 2                                   |
| 2                        | Proceso de destilación               | 5                     | 1                      | 5                                    | 1/2                    | 1/2                      | 1/3                | 5                                   |
| 3                        | Extracción solvente con hidroacabado | 1/3                   | 1/5                    | 1                                    | 1/5                    | 1/5                      | 1/7                | 2                                   |
| 4                        | TFE + acabado solvente               | 3                     | 2                      | 5                                    | 1                      | 2                        | 1/2                | 5                                   |
| 5                        | TFE + acabado de arcilla             | 3                     | 2                      | 5                                    | 1/2                    | 1                        | 1/3                | 5                                   |
| 6                        | TFE + hidroacabado                   | 7                     | 3                      | 7                                    | 2                      | 3                        | 1                  | 7                                   |
| 7                        | Proceso de Extracción con solventes  | 1/2                   | 1/5                    | 1/2                                  | 1/5                    | 1/5                      | 1/7                | 1                                   |

**Fuente:** Elaborado por el autor.

**Tabla 9.** Datos Normalizados de la matriz de puntuación de las alternativas

| Listados de Alternativas |                                      | Proceso ácido-arcilla | Proceso de destilación | Extracción solvente con hidroacabado | TFE + acabado solvente | TFE + acabado de arcilla | TFE + hidroacabado | Proceso de Extracción con solventes |
|--------------------------|--------------------------------------|-----------------------|------------------------|--------------------------------------|------------------------|--------------------------|--------------------|-------------------------------------|
| 1                        | Proceso ácido-arcilla                | 0,05                  | 0,02                   | 0,11                                 | 0,07                   | 0,07                     | 0,06               | 0,07                                |
| 2                        | Proceso de destilación               | 0,25                  | 0,12                   | 0,19                                 | 0,11                   | 0,07                     | 0,13               | 0,19                                |
| 3                        | Extracción solvente con hidroacabado | 0,02                  | 0,02                   | 0,04                                 | 0,04                   | 0,03                     | 0,06               | 0,07                                |
| 4                        | TFE + acabado solvente               | 0,15                  | 0,23                   | 0,19                                 | 0,21                   | 0,27                     | 0,19               | 0,19                                |
| 5                        | TFE + acabado de arcilla             | 0,15                  | 0,23                   | 0,19                                 | 0,11                   | 0,14                     | 0,13               | 0,19                                |
| 6                        | TFE + hidroacabado                   | 0,35                  | 0,35                   | 0,26                                 | 0,42                   | 0,41                     | 0,39               | 0,26                                |
| 7                        | Proceso de Extracción con solventes  | 0,03                  | 0,02                   | 0,02                                 | 0,04                   | 0,03                     | 0,06               | 0,04                                |

**Fuente:** Elaborado por el autor.

Evaluación de la Consistencia de la matriz de orden  $n = 7$

$$\lambda_{\text{máx.}} = \sum N \cdot W_i = 7,56$$

$$CI = 0,0933$$

$$IR = 1,4143$$

$$CR = 0,066 < 10\%$$

## Cálculo de la matriz de puntuación de las alternativas

**Tabla 33.** Matriz de puntuación Tasa de Reciclaje

| Listados de Alternativas |                                      | Proceso ácido-arcilla | Proceso de destilación | Extracción solvente con hidroacabado | TFE + acabado solvente | TFE + acabado de arcilla | TFE + hidroacabado | Proceso de extracción con solventes |
|--------------------------|--------------------------------------|-----------------------|------------------------|--------------------------------------|------------------------|--------------------------|--------------------|-------------------------------------|
| 1                        | Proceso ácido-arcilla                | 1                     | 3                      | 1/2                                  | 1/3                    | 1/3                      | 1/3                | 1/2                                 |
| 2                        | Proceso de destilación               | 1/3                   | 1                      | 1/4                                  | 1/5                    | 1/5                      | 1/5                | 1/3                                 |
| 3                        | Extracción solvente con hidroacabado | 2                     | 4                      | 1                                    | 1/2                    | 1/2                      | 1/2                | 1/3                                 |
| 4                        | TFE + acabado solvente               | 3                     | 5                      | 2                                    | 1                      | 1                        | 1                  | 3                                   |
| 5                        | TFE + acabado de arcilla             | 3                     | 5                      | 2                                    | 1                      | 1                        | 1                  | 3                                   |
| 6                        | TFE + hidroacabado                   | 3                     | 5                      | 2                                    | 1                      | 1                        | 1                  | 3                                   |
| 7                        | Proceso de extracción con solventes  | 2                     | 3                      | 3                                    | 1/3                    | 1/3                      | 1/3                | 1                                   |

**Fuente:** Elaborado por el autor.

**Tabla 34.** Normalización Matriz de puntuación Tasa de Reciclaje

| Listados de Alternativas |                                      | Proceso ácido-arcilla | Proceso de destilación | Extracción solvente con hidroacabado | TFE + acabado solvente | TFE + acabado de arcilla | TFE + hidroacabado | Proceso de extracción con solventes |
|--------------------------|--------------------------------------|-----------------------|------------------------|--------------------------------------|------------------------|--------------------------|--------------------|-------------------------------------|
| 1                        | Proceso ácido-arcilla                | 0,07                  | 0,12                   | 0,05                                 | 0,08                   | 0,08                     | 0,08               | 0,04                                |
| 2                        | Proceso de destilación               | 0,02                  | 0,04                   | 0,02                                 | 0,05                   | 0,05                     | 0,05               | 0,03                                |
| 3                        | Extracción solvente con hidroacabado | 0,14                  | 0,15                   | 0,09                                 | 0,11                   | 0,11                     | 0,11               | 0,03                                |
| 4                        | TFE + acabado solvente               | 0,21                  | 0,19                   | 0,19                                 | 0,23                   | 0,23                     | 0,23               | 0,27                                |
| 5                        | TFE + acabado de arcilla             | 0,21                  | 0,19                   | 0,19                                 | 0,23                   | 0,23                     | 0,23               | 0,27                                |
| 6                        | TFE + hidroacabado                   | 0,21                  | 0,19                   | 0,19                                 | 0,23                   | 0,23                     | 0,23               | 0,27                                |
| 7                        | Proceso de extracción con solventes  | 0,14                  | 0,12                   | 0,28                                 | 0,08                   | 0,08                     | 0,08               | 0,09                                |

**Fuente:** Elaborado por el autor.

Evaluación de la Consistencia de la matriz de orden  $n = 7$

$$\lambda_{\text{máx.}} = \sum N \cdot W_i = 7,3868$$

$$CI = 0,0645$$

$$IR = 1,414286$$

$$CR = 0,0456 < 10\%$$

**Tabla 35.** Matriz de puntuación uso de materiales químicos peligrosos

| Listados de Alternativas |                                      | Proceso ácido-arcilla | Proceso de destilación | Extracción solvente con hidroacabado | TFE + acabado solvente | TFE + acabado de arcilla | TFE + hidroacabado | Proceso de extracción con solventes |
|--------------------------|--------------------------------------|-----------------------|------------------------|--------------------------------------|------------------------|--------------------------|--------------------|-------------------------------------|
| 1                        | Proceso ácido-arcilla                | 1                     | 1/7                    | 1/3                                  | 1/3                    | 1/2                      | 1/5                | 1/2                                 |
| 2                        | Proceso de destilación               | 7                     | 1                      | 3                                    | 2                      | 3                        | 3                  | 4                                   |
| 3                        | Extracción solvente con hidroacabado | 3                     | 1/3                    | 1                                    | 2                      | 3                        | 2                  | 3                                   |
| 4                        | TFE + acabado solvente               | 3                     | 1/2                    | 1/2                                  | 1                      | 2                        | 1/2                | 2                                   |
| 5                        | TFE + acabado de arcilla             | 2                     | 1/3                    | 1/3                                  | 1/2                    | 1                        | 3                  | 2                                   |
| 6                        | TFE + hidroacabado                   | 5                     | 1/3                    | 1/2                                  | 2                      | 1/3                      | 1                  | 2                                   |
| 7                        | Proceso de extracción con solventes  | 2                     | 1/4                    | 1/2                                  | 1/3                    | 1/2                      | 1/2                | 1                                   |

**Fuente:** Elaborado por el autor.

**Tabla 36.** Normalización Matriz de puntuación uso de materiales químicos peligrosos

| Listados de Alternativas |                                      | Proceso ácido-arcilla | Proceso de destilación | Extracción solvente con hidroacabado | TFE + acabado solvente | TFE + acabado de arcilla | TFE + hidroacabado | Proceso de extracción con solventes |
|--------------------------|--------------------------------------|-----------------------|------------------------|--------------------------------------|------------------------|--------------------------|--------------------|-------------------------------------|
| 1                        | Proceso ácido-arcilla                | 0,04                  | 0,05                   | 0,05                                 | 0,04                   | 0,05                     | 0,02               | 0,03                                |
| 2                        | Proceso de destilación               | 0,30                  | 0,35                   | 0,49                                 | 0,24                   | 0,29                     | 0,29               | 0,28                                |
| 3                        | Extracción solvente con hidroacabado | 0,13                  | 0,12                   | 0,16                                 | 0,24                   | 0,29                     | 0,20               | 0,21                                |
| 4                        | TFE + acabado solvente               | 0,13                  | 0,17                   | 0,08                                 | 0,12                   | 0,19                     | 0,05               | 0,14                                |
| 5                        | TFE + acabado de arcilla             | 0,09                  | 0,12                   | 0,05                                 | 0,06                   | 0,10                     | 0,29               | 0,14                                |
| 6                        | TFE + hidroacabado                   | 0,22                  | 0,12                   | 0,08                                 | 0,24                   | 0,03                     | 0,10               | 0,14                                |
| 7                        | Proceso de extracción con solventes  | 0,09                  | 0,09                   | 0,08                                 | 0,04                   | 0,05                     | 0,05               | 0,07                                |

**Fuente:** Elaborado por el autor.

Evaluación de la Consistencia de la matriz de orden  $n = 7$

$$\lambda_{\text{máx.}} = \sum N \cdot W_i = 7,657$$

$$CI = 0,1095$$

$$IR = 1,414286$$

$$CR = 0,07742 < 10\%$$

**Tabla 37.** Matriz de puntuación requerimiento de espacio

| Listados de Alternativas |                                      | Proceso ácido-arcilla | Proceso de destilación | Extracción solvente con hidroacabado | TFE + acabado solvente | TFE + acabado de arcilla | TFE + hidroacabado | Proceso de extracción con solventes |
|--------------------------|--------------------------------------|-----------------------|------------------------|--------------------------------------|------------------------|--------------------------|--------------------|-------------------------------------|
| 1                        | Proceso ácido-arcilla                | 1                     | 1/3                    | 3                                    | 3                      | 5                        | 5                  | 2                                   |
| 2                        | Proceso de destilación               | 3                     | 1                      | 3                                    | 5                      | 5                        | 5                  | 3                                   |
| 3                        | Extracción solvente con hidroacabado | 1/3                   | 1/3                    | 1                                    | 2                      | 2                        | 3                  | 1/2                                 |
| 4                        | TFE + acabado solvente               | 1/3                   | 1/5                    | 1/2                                  | 1                      | 1/3                      | 2                  | 1/3                                 |
| 5                        | TFE + acabado de arcilla             | 1/5                   | 1/5                    | 1/2                                  | 3                      | 1                        | 2                  | 1/3                                 |
| 6                        | TFE + hidroacabado                   | 1/5                   | 1/5                    | 1/3                                  | 1/2                    | 1/2                      | 1                  | 1/5                                 |
| 7                        | Proceso de extracción con solventes  | 1/2                   | 1/3                    | 2                                    | 3                      | 3                        | 5                  | 1                                   |

**Fuente:** Elaborado por el autor.

**Tabla 38.** Normalización Matriz de puntuación requerimiento de espacio

| Listados de Alternativas |                                      | Proceso ácido-arcilla | Proceso de destilación | Extracción solvente con hidroacabado | TFE + acabado solvente | TFE + acabado de arcilla | TFE + hidroacabado | Proceso de extracción con solventes |
|--------------------------|--------------------------------------|-----------------------|------------------------|--------------------------------------|------------------------|--------------------------|--------------------|-------------------------------------|
| 1                        | Proceso ácido-arcilla                | 0,18                  | 0,13                   | 0,29                                 | 0,17                   | 0,30                     | 0,22               | 0,27                                |
| 2                        | Proceso de destilación               | 0,54                  | 0,38                   | 0,29                                 | 0,29                   | 0,30                     | 0,22               | 0,41                                |
| 3                        | Extracción solvente con hidroacabado | 0,06                  | 0,13                   | 0,10                                 | 0,11                   | 0,12                     | 0,13               | 0,07                                |
| 4                        | TFE + acabado solvente               | 0,06                  | 0,08                   | 0,05                                 | 0,06                   | 0,02                     | 0,09               | 0,05                                |
| 5                        | TFE + acabado de arcilla             | 0,04                  | 0,08                   | 0,05                                 | 0,17                   | 0,06                     | 0,09               | 0,05                                |
| 6                        | TFE + hidroacabado                   | 0,04                  | 0,08                   | 0,03                                 | 0,03                   | 0,03                     | 0,04               | 0,03                                |
| 7                        | Proceso de extracción con solventes  | 0,09                  | 0,13                   | 0,19                                 | 0,17                   | 0,18                     | 0,22               | 0,14                                |

**Fuente:** Elaborado por el autor.

Evaluación de la Consistencia de la matriz de orden  $n = 7$

$$\lambda_{\text{máx.}} = \sum N \cdot W_i = 7,5133$$

$$CI = 0,0855$$

$$IR = 1,414286$$

$$CR = 0,06049 < 10\%$$

**Tabla 39.** Matriz de puntuación madurez de la tecnología

| Listados de Alternativas |                                      | Proceso ácido-arcilla | Proceso de destilación | Extracción solvente con hidroacabado | TFE + acabado solvente | TFE + acabado de arcilla | TFE + hidroacabado | Proceso de extracción con solventes |
|--------------------------|--------------------------------------|-----------------------|------------------------|--------------------------------------|------------------------|--------------------------|--------------------|-------------------------------------|
| 1                        | Proceso ácido-arcilla                | 1                     | 3                      | 5                                    | 6                      | 5                        | 7                  | 2                                   |
| 2                        | Proceso de destilación               | 1/3                   | 1                      | 3                                    | 5                      | 4                        | 6                  | 3                                   |
| 3                        | Extracción solvente con hidroacabado | 1/5                   | 1/3                    | 1                                    | 3                      | 2                        | 4                  | 2                                   |
| 4                        | TFE + acabado solvente               | 1/6                   | 1/5                    | 1/3                                  | 1                      | 1/3                      | 2                  | 1/3                                 |
| 5                        | TFE + acabado de arcilla             | 1/5                   | 1/4                    | 1/2                                  | 3                      | 1                        | 5                  | 1/2                                 |
| 6                        | TFE + hidroacabado                   | 1/7                   | 1/6                    | 1/4                                  | 1/2                    | 1/5                      | 1                  | 1/2                                 |
| 7                        | Proceso de extracción con solventes  | 1/2                   | 1/3                    | 1/2                                  | 3                      | 2                        | 2                  | 1                                   |

**Fuente:** Elaborado por el autor.

**Tabla 40.** Normalización Matriz de puntuación madurez de la tecnología

|   | <b>Listados de Alternativas</b>      | Proceso ácido-arcilla | Proceso de destilación | Extracción solvente con hidroacabado | TFE + acabado solvente | TFE + acabado de arcilla | TFE + hidroacabado | Proceso de extracción con solventes |
|---|--------------------------------------|-----------------------|------------------------|--------------------------------------|------------------------|--------------------------|--------------------|-------------------------------------|
| 1 | Proceso ácido-arcilla                | 0,39                  | 0,57                   | 0,47                                 | 0,28                   | 0,34                     | 0,26               | 0,21                                |
| 2 | Proceso de destilación               | 0,13                  | 0,19                   | 0,28                                 | 0,23                   | 0,28                     | 0,22               | 0,32                                |
| 3 | Extracción solvente con hidroacabado | 0,08                  | 0,06                   | 0,09                                 | 0,14                   | 0,14                     | 0,15               | 0,21                                |
| 4 | TFE + acabado solvente               | 0,07                  | 0,04                   | 0,03                                 | 0,05                   | 0,02                     | 0,07               | 0,04                                |
| 5 | TFE + acabado de arcilla             | 0,08                  | 0,05                   | 0,05                                 | 0,14                   | 0,07                     | 0,19               | 0,05                                |
| 6 | TFE + hidroacabado                   | 0,06                  | 0,03                   | 0,02                                 | 0,02                   | 0,01                     | 0,04               | 0,05                                |
| 7 | Proceso de extracción con solventes  | 0,20                  | 0,06                   | 0,05                                 | 0,14                   | 0,14                     | 0,07               | 0,11                                |

**Fuente:** Elaborado por el autor.

Evaluación de la Consistencia de la matriz de orden  $n = 7$

$$\lambda_{\text{máx.}} = \sum N \cdot W_i = 7,6875$$

$$CI = 0,1146$$

$$IR = 1,414286$$

$$CR = 0,08102 < 10\%$$

**Tabla 41.** Matriz de puntuación capacidad de producción

| Listados de Alternativas |                                      | Proceso ácido-arcilla | Proceso de destilación | Extracción solvente con hidroacabado | TFE + acabado solvente | TFE + acabado de arcilla | TFE + hidroacabado | Proceso de extracción con solventes |
|--------------------------|--------------------------------------|-----------------------|------------------------|--------------------------------------|------------------------|--------------------------|--------------------|-------------------------------------|
| 1                        | Proceso ácido-arcilla                | 1                     | 1/5                    | 1/3                                  | 1/4                    | 1/3                      | 1/4                | 1/2                                 |
| 2                        | Proceso de destilación               | 5                     | 1                      | 3                                    | 3                      | 2                        | 5                  | 4                                   |
| 3                        | Extracción solvente con hidroacabado | 3                     | 1/3                    | 1                                    | 1/3                    | 1/4                      | 1/2                | 2                                   |
| 4                        | TFE + acabado solvente               | 4                     | 1/3                    | 3                                    | 1                      | 1/2                      | 2                  | 3                                   |
| 5                        | TFE + acabado de arcilla             | 3                     | 1/2                    | 4                                    | 1/2                    | 1                        | 3                  | 3                                   |
| 6                        | TFE + hidroacabado                   | 4                     | 1/5                    | 2                                    | 1/2                    | 1/3                      | 1                  | 3                                   |
| 7                        | Proceso de extracción con solventes  | 2                     | 1/4                    | 1/2                                  | 1/3                    | 1/3                      | 1/3                | 1                                   |

**Fuente:** Elaborado por el autor.

**Tabla 42.** Normalización Matriz de puntuación capacidad de producción

|   | <b>Listados de Alternativas</b>      | Proceso ácido-arcilla | Proceso de destilación | Extracción solvente con hidroacabado | TFE + acabado solvente | TFE + acabado de arcilla | TFE + hidroacabado | Proceso de extracción con solventes |
|---|--------------------------------------|-----------------------|------------------------|--------------------------------------|------------------------|--------------------------|--------------------|-------------------------------------|
| 1 | Proceso ácido-arcilla                | 0,05                  | 0,07                   | 0,02                                 | 0,04                   | 0,07                     | 0,02               | 0,03                                |
| 2 | Proceso de destilación               | 0,23                  | 0,36                   | 0,22                                 | 0,51                   | 0,42                     | 0,41               | 0,24                                |
| 3 | Extracción solvente con hidroacabado | 0,14                  | 0,12                   | 0,07                                 | 0,06                   | 0,05                     | 0,04               | 0,12                                |
| 4 | TFE + acabado solvente               | 0,18                  | 0,12                   | 0,22                                 | 0,17                   | 0,11                     | 0,17               | 0,18                                |
| 5 | TFE + acabado de arcilla             | 0,14                  | 0,18                   | 0,29                                 | 0,08                   | 0,21                     | 0,25               | 0,18                                |
| 6 | TFE + hidroacabado                   | 0,18                  | 0,07                   | 0,14                                 | 0,08                   | 0,07                     | 0,08               | 0,18                                |
| 7 | Proceso de extracción con solventes  | 0,09                  | 0,09                   | 0,04                                 | 0,06                   | 0,07                     | 0,03               | 0,06                                |

**Fuente:** Elaborado por el autor.

Evaluación de la Consistencia de la matriz de orden  $n = 7$

$$\lambda_{\text{máx.}} = \sum N \cdot W_i = 7,3855$$

$$CI = 0,06424$$

$$IR = 1,414286$$

$$CR = 0,045426 < 10\%$$

**Tabla 43.** Matriz de puntuación calidad de producto terminado

| Listados de Alternativas |                                      | Proceso ácido-arcilla | Proceso de destilación | Extracción solvente con hidroacabado | TFE + acabado solvente | TFE + acabado de arcilla | TFE + hidroacabado | Proceso de extracción con solventes |
|--------------------------|--------------------------------------|-----------------------|------------------------|--------------------------------------|------------------------|--------------------------|--------------------|-------------------------------------|
| 1                        | Proceso ácido-arcilla                | 1                     | 1/2                    | 1/5                                  | 1/5                    | 1/5                      | 1/5                | 1/3                                 |
| 2                        | Proceso de destilación               | 2                     | 1                      | 1/3                                  | 1/3                    | 1/3                      | 1/3                | 1/2                                 |
| 3                        | Extracción solvente con hidroacabado | 5                     | 1                      | 1                                    | 1/5                    | 1/5                      | 1/3                | 1/2                                 |
| 4                        | TFE + acabado solvente               | 9                     | 5                      | 5                                    | 1                      | 1                        | 3                  | 4                                   |
| 5                        | TFE + acabado de arcilla             | 9                     | 5                      | 5                                    | 1                      | 1                        | 3                  | 4                                   |
| 6                        | TFE + hidroacabado                   | 7                     | 3                      | 3                                    | 1/3                    | 1/3                      | 1                  | 2                                   |
| 7                        | Proceso de extracción con solventes  | 5                     | 2                      | 2                                    | 1/4                    | 1/4                      | 1/2                | 1                                   |

**Fuente:** Elaborado por el autor.

**Tabla 44.** Normalización Matriz de puntuación calidad de producto terminado

|   | <b>Listados de Alternativas</b>      | Proceso ácido-arcilla | Proceso de destilación | Extracción solvente con hidroacabado | TFE + acabado solvente | TFE + acabado de arcilla | TFE + hidroacabado | Proceso de extracción con solventes |
|---|--------------------------------------|-----------------------|------------------------|--------------------------------------|------------------------|--------------------------|--------------------|-------------------------------------|
| 1 | Proceso ácido-arcilla                | 0,03                  | 0,03                   | 0,01                                 | 0,06                   | 0,06                     | 0,02               | 0,03                                |
| 2 | Proceso de destilación               | 0,05                  | 0,06                   | 0,02                                 | 0,10                   | 0,10                     | 0,04               | 0,04                                |
| 3 | Extracción solvente con hidroacabado | 0,13                  | 0,06                   | 0,06                                 | 0,06                   | 0,06                     | 0,04               | 0,04                                |
| 4 | TFE + acabado solvente               | 0,24                  | 0,29                   | 0,30                                 | 0,30                   | 0,30                     | 0,36               | 0,32                                |
| 5 | TFE + acabado de arcilla             | 0,24                  | 0,29                   | 0,30                                 | 0,30                   | 0,30                     | 0,36               | 0,32                                |
| 6 | TFE + hidroacabado                   | 0,18                  | 0,17                   | 0,18                                 | 0,10                   | 0,10                     | 0,12               | 0,16                                |
| 7 | Proceso de extracción con solventes  | 0,13                  | 0,11                   | 0,12                                 | 0,08                   | 0,08                     | 0,06               | 0,08                                |

**Fuente:** Elaborado por el autor.

Evaluación de la Consistencia de la matriz de orden  $n = 7$

$$\lambda_{\text{máx.}} = \sum N \cdot W_i = 7,7657$$

$$CI = 0,1276$$

$$IR = 1,414286$$

$$CR = 0,0902 < 10\%$$

**Tabla 45.** Matriz de puntuación consumo energético

| Listados de Alternativas |                                      | Proceso ácido-arcilla | Proceso de destilación | Extracción solvente con hidroacabado | TFE + acabado solvente | TFE + acabado de arcilla | TFE + hidroacabado | Proceso de extracción con solventes |
|--------------------------|--------------------------------------|-----------------------|------------------------|--------------------------------------|------------------------|--------------------------|--------------------|-------------------------------------|
| 1                        | Proceso ácido-arcilla                | 1                     | 5                      | 9                                    | 7                      | 7                        | 9                  | 3                                   |
| 2                        | Proceso de destilación               | 1/5                   | 1                      | 3                                    | 5                      | 5                        | 7                  | 1/2                                 |
| 3                        | Extracción solvente con hidroacabado | 1/9                   | 1/3                    | 1                                    | 3                      | 3                        | 5                  | 1/2                                 |
| 4                        | TFE + acabado solvente               | 1/7                   | 1/5                    | 1/3                                  | 1                      | 1                        | 3                  | 1/5                                 |
| 5                        | TFE + acabado de arcilla             | 1/7                   | 1/5                    | 1/3                                  | 1                      | 1                        | 3                  | 1/5                                 |
| 6                        | TFE + hidroacabado                   | 1/9                   | 1/7                    | 1/5                                  | 1/3                    | 1/3                      | 1                  | 1/7                                 |
| 7                        | Proceso de extracción con solventes  | 1/3                   | 2                      | 2                                    | 5                      | 5                        | 7                  | 1                                   |

**Fuente:** Elaborado por el autor.

**Tabla 46.** Normalización Matriz de puntuación consumo energético

| Listados de Alternativas |                                      | Proceso ácido-arcilla | Proceso de destilación | Extracción solvente con hidroacabado | TFE + acabado solvente | TFE + acabado de arcilla | TFE + hidroacabado | Proceso de extracción con solventes |
|--------------------------|--------------------------------------|-----------------------|------------------------|--------------------------------------|------------------------|--------------------------|--------------------|-------------------------------------|
| 1                        | Proceso ácido-arcilla                | 0,49                  | 0,56                   | 0,57                                 | 0,31                   | 0,31                     | 0,26               | 0,54                                |
| 2                        | Proceso de destilación               | 0,10                  | 0,11                   | 0,19                                 | 0,22                   | 0,22                     | 0,20               | 0,09                                |
| 3                        | Extracción solvente con hidroacabado | 0,05                  | 0,04                   | 0,06                                 | 0,13                   | 0,13                     | 0,14               | 0,09                                |
| 4                        | TFE + acabado solvente               | 0,07                  | 0,02                   | 0,02                                 | 0,04                   | 0,04                     | 0,09               | 0,04                                |
| 5                        | TFE + acabado de arcilla             | 0,07                  | 0,02                   | 0,02                                 | 0,04                   | 0,04                     | 0,09               | 0,04                                |
| 6                        | TFE + hidroacabado                   | 0,05                  | 0,02                   | 0,01                                 | 0,01                   | 0,01                     | 0,03               | 0,03                                |
| 7                        | Proceso de extracción con solventes  | 0,16                  | 0,23                   | 0,13                                 | 0,22                   | 0,22                     | 0,20               | 0,18                                |

**Fuente:** Elaborado por el autor.

Evaluación de la Consistencia de la matriz de orden  $n = 7$

$$\lambda_{\text{máx.}} = \sum N \cdot W_i = 7,7923$$

$$CI = 0,13205$$

$$IR = 1,414286$$

$$CR = 0,0934 < 10\%$$

**Tabla 47.** Matriz de puntuación impacto ambiental

| Listados de Alternativas |                                      | Proceso ácido-arcilla | Proceso de destilación | Extracción solvente con hidroacabado | TFE + acabado solvente | TFE + acabado de arcilla | TFE + hidroacabado | Proceso de extracción con solventes |
|--------------------------|--------------------------------------|-----------------------|------------------------|--------------------------------------|------------------------|--------------------------|--------------------|-------------------------------------|
| 1                        | Proceso ácido-arcilla                | 1                     | 1/3                    | 1/7                                  | 1/7                    | 1/5                      | 1/5                | 1/2                                 |
| 2                        | Proceso de destilación               | 3                     | 1                      | 1/5                                  | 1/5                    | 1/3                      | 1/2                | 2                                   |
| 3                        | Extracción solvente con hidroacabado | 7                     | 5                      | 1                                    | 2                      | 3                        | 5                  | 6                                   |
| 4                        | TFE + acabado solvente               | 7                     | 5                      | 1/2                                  | 1                      | 2                        | 3                  | 7                                   |
| 5                        | TFE + acabado de arcilla             | 5                     | 3                      | 1/3                                  | 1/2                    | 1                        | 2                  | 5                                   |
| 6                        | TFE + hidroacabado                   | 5                     | 2                      | 1/5                                  | 1/3                    | 1/2                      | 1                  | 3                                   |
| 7                        | Proceso de extracción con solventes  | 2                     | 1/2                    | 1/6                                  | 1/7                    | 1/5                      | 1/3                | 1                                   |

**Fuente:** Elaborado por el autor.

**Tabla 48.** Normalización Matriz de puntuación impacto ambiental

| Listados de Alternativas |                                      | Proceso ácido-arcilla | Proceso de destilación | Extracción solvente con hidroacabado | TFE + acabado solvente | TFE + acabado de arcilla | TFE + hidroacabado | Proceso de extracción con solventes |
|--------------------------|--------------------------------------|-----------------------|------------------------|--------------------------------------|------------------------|--------------------------|--------------------|-------------------------------------|
| 1                        | Proceso ácido-arcilla                | 0,03                  | 0,02                   | 0,06                                 | 0,03                   | 0,03                     | 0,02               | 0,02                                |
| 2                        | Proceso de destilación               | 0,10                  | 0,06                   | 0,08                                 | 0,05                   | 0,05                     | 0,04               | 0,08                                |
| 3                        | Extracción solvente con hidroacabado | 0,23                  | 0,30                   | 0,39                                 | 0,46                   | 0,41                     | 0,42               | 0,24                                |
| 4                        | TFE + acabado solvente               | 0,23                  | 0,30                   | 0,20                                 | 0,23                   | 0,28                     | 0,25               | 0,29                                |
| 5                        | TFE + acabado de arcilla             | 0,17                  | 0,18                   | 0,13                                 | 0,12                   | 0,14                     | 0,17               | 0,20                                |
| 6                        | TFE + hidroacabado                   | 0,17                  | 0,12                   | 0,08                                 | 0,08                   | 0,07                     | 0,08               | 0,12                                |
| 7                        | Proceso de extracción con solventes  | 0,07                  | 0,03                   | 0,07                                 | 0,03                   | 0,03                     | 0,03               | 0,04                                |

**Fuente:** Elaborado por el autor.

Evaluación de la Consistencia de la matriz de orden  $n = 7$

$$\lambda_{\text{máx.}} = \sum N \cdot W_i = 7,35155$$

$$CI = 0,05859$$

$$IR = 1,414286$$

$$CR = 0,04143 < 10\%$$

**Tabla 49.** Matriz de puntuación CAPEX

| <b>Listados de Alternativas</b> |                                      | <b>Proceso ácido-arcilla</b> | <b>Proceso de destilación</b> | <b>Extracción solvente con hidroacabado</b> | <b>TFE + acabado solvente</b> | <b>TFE + acabado de arcilla</b> | <b>TFE + hidroacabado</b> | <b>Proceso de extracción con solventes</b> |
|---------------------------------|--------------------------------------|------------------------------|-------------------------------|---|-------------------------------|---------------------------------|---------------------------|--|
| 1                               | Proceso ácido-arcilla                | 1                            | 3                             | 4   | 6                             | 5                               | 7                         | 2  |
| 2                               | Proceso de destilación               | 1/3                          | 1                             | 3   | 5                             | 4                               | 6                         | 1/2  |
| 3                               | Extracción solvente con hidroacabado | 1/4                          | 1/3                           | 1   | 3                             | 2                               | 5                         | 1/3  |
| 4                               | TFE + acabado solvente               | 1/6                          | 1/5                           | 1/3   | 1                             | 1/2                             | 3                         | 1/5  |
| 5                               | TFE + acabado de arcilla             | 1/5                          | 1/4                           | 1/2   | 2                             | 1                               | 3                         | 1/4  |
| 6                               | TFE + hidroacabado                   | 1/7                          | 1/6                           | 1/5   | 1/3                           | 1/3                             | 1                         | 1/6  |
| 7                               | Proceso de extracción con solventes  | 1/2                          | 2                             | 3   | 5                             | 4                               | 6                         | 1  |

**Tabla 50.** Normalización Matriz de puntuación CAPEX

| Listados de Alternativas |                                      | Proceso ácido-arcilla | Proceso de destilación | Extracción solvente con hidroacabado | TFE + acabado solvente | TFE + acabado de arcilla | TFE + hidroacabado | Proceso de extracción con solventes |
|--------------------------|--------------------------------------|-----------------------|------------------------|--------------------------------------|------------------------|--------------------------|--------------------|-------------------------------------|
| 1                        | Proceso ácido-arcilla                | 0,39                  | 0,43                   | 0,33                                 | 0,27                   | 0,30                     | 0,23               | 0,45                                |
| 2                        | Proceso de destilación               | 0,13                  | 0,14                   | 0,25                                 | 0,22                   | 0,24                     | 0,19               | 0,11                                |
| 3                        | Extracción solvente con hidroacabado | 0,10                  | 0,05                   | 0,08                                 | 0,13                   | 0,12                     | 0,16               | 0,07                                |
| 4                        | TFE + acabado solvente               | 0,06                  | 0,03                   | 0,03                                 | 0,04                   | 0,03                     | 0,10               | 0,04                                |
| 5                        | TFE + acabado de arcilla             | 0,08                  | 0,04                   | 0,04                                 | 0,09                   | 0,06                     | 0,10               | 0,06                                |
| 6                        | TFE + hidroacabado                   | 0,06                  | 0,02                   | 0,02                                 | 0,01                   | 0,02                     | 0,03               | 0,04                                |
| 7                        | Proceso de extracción con solventes  | 0,19                  | 0,29                   | 0,25                                 | 0,22                   | 0,24                     | 0,19               | 0,22                                |

**Fuente:** Elaborado por el autor.

Evaluación de la Consistencia de la matriz de orden  $n = 7$

$$\lambda_{\text{máx.}} = \sum N \cdot W_i = 7,48033$$

$$CI = 0,08005$$

$$IR = 1,414286$$

$$CR = 0,056604 < 10\%$$

**Tabla 51.** Matriz de puntuación OPEX

| Listados de Alternativas |                                      | Proceso ácido-arcilla | Proceso de destilación | Extracción solvente con hidroacabado | TFE + acabado solvente | TFE + acabado de arcilla | TFE + hidroacabado | Proceso de extracción con solventes |
|--------------------------|--------------------------------------|-----------------------|------------------------|--------------------------------------|------------------------|--------------------------|--------------------|-------------------------------------|
| 1                        | Proceso ácido-arcilla                | 1                     | 3                      | 5                                    | 7                      | 6                        | 8                  | 4                                   |
| 2                        | Proceso de destilación               | 1/3                   | 1                      | 4                                    | 6                      | 5                        | 7                  | 3                                   |
| 3                        | Extracción solvente con hidroacabado | 1/5                   | 1/4                    | 1                                    | 5                      | 4                        | 6                  | 2                                   |
| 4                        | TFE + acabado solvente               | 1/7                   | 1/6                    | 1/5                                  | 1                      | 1/2                      | 2                  | 1/3                                 |
| 5                        | TFE + acabado de arcilla             | 1/6                   | 1/5                    | 1/4                                  | 2                      | 1                        | 3                  | 1/2                                 |
| 6                        | TFE + hidroacabado                   | 1/8                   | 1/7                    | 1/6                                  | 1/2                    | 1/3                      | 1                  | 1/4                                 |
| 7                        | Proceso de extracción con solventes  | 1/4                   | 1/3                    | 1/2                                  | 3                      | 2                        | 4                  | 1                                   |

**Fuente:** Elaborado por el autor.

**Tabla 52.** Normalización Matriz de puntuación OPEX

|   | <b>Listados de Alternativas</b>      | Proceso ácido-arcilla | Proceso de destilación | Extracción solvente con hidroacabado | TFE + acabado solvente | TFE + acabado de arcilla | TFE + hidroacabado | Proceso de extracción con solventes |
|---|--------------------------------------|-----------------------|------------------------|--------------------------------------|------------------------|--------------------------|--------------------|-------------------------------------|
| 1 | Proceso ácido-arcilla                | 0,45                  | 0,59                   | 0,45                                 | 0,29                   | 0,32                     | 0,26               | 0,36                                |
| 2 | Proceso de destilación               | 0,15                  | 0,20                   | 0,36                                 | 0,24                   | 0,27                     | 0,23               | 0,27                                |
| 3 | Extracción solvente con hidroacabado | 0,09                  | 0,05                   | 0,09                                 | 0,20                   | 0,21                     | 0,19               | 0,18                                |
| 4 | TFE + acabado solvente               | 0,06                  | 0,03                   | 0,02                                 | 0,04                   | 0,03                     | 0,06               | 0,03                                |
| 5 | TFE + acabado de arcilla             | 0,08                  | 0,04                   | 0,02                                 | 0,08                   | 0,05                     | 0,10               | 0,05                                |
| 6 | TFE + hidroacabado                   | 0,06                  | 0,03                   | 0,01                                 | 0,02                   | 0,02                     | 0,03               | 0,02                                |
| 7 | Proceso de extracción con solventes  | 0,11                  | 0,07                   | 0,04                                 | 0,12                   | 0,11                     | 0,13               | 0,09                                |

**Fuente:** Elaborado por el autor.

Evaluación de la Consistencia de la matriz de orden  $n = 7$

$$\lambda_{\text{máx.}} = \sum N \cdot W_i = 7,72208$$

$$CI = 0,12035$$

$$IR = 1,414286$$

$$CR = 0,0851 < 10\%$$

**Tabla 9.** Cálculo de la matriz de puntuación de las alternativas

|   | <b>Listados de Alternativas</b>      | Tasa de reciclaje | Materiales químicos peligrosos | Requerimientos de espacio | Maduración de la tecnología | Capacidad de producción | Calidad del producto terminado | Consumo energético | Impacto ambiental | Capex | Opex |
|---|--------------------------------------|-------------------|--------------------------------|---------------------------|-----------------------------|-------------------------|--------------------------------|--------------------|-------------------|-------|------|
| 1 | Proceso ácido-arcilla                | 0,07              | 0,04                           | 0,22                      | 0,36                        | 0,04                    | 0,03                           | 0,44               | 0,03              | 0,34  | 0,39 |
| 2 | Proceso de destilación               | 0,04              | 0,32                           | 0,35                      | 0,24                        | 0,34                    | 0,06                           | 0,16               | 0,06              | 0,18  | 0,24 |
| 3 | Extracción solvente con hidroacabado | 0,11              | 0,19                           | 0,10                      | 0,13                        | 0,09                    | 0,06                           | 0,09               | 0,35              | 0,10  | 0,15 |
| 4 | TFE + acabado solvente               | 0,22              | 0,13                           | 0,06                      | 0,04                        | 0,16                    | 0,30                           | 0,05               | 0,25              | 0,05  | 0,04 |
| 5 | TFE + acabado de arcilla             | 0,22              | 0,12                           | 0,07                      | 0,09                        | 0,19                    | 0,30                           | 0,05               | 0,16              | 0,07  | 0,06 |
| 6 | TFE + hidroacabado                   | 0,22              | 0,13                           | 0,04                      | 0,03                        | 0,12                    | 0,15                           | 0,02               | 0,10              | 0,03  | 0,03 |
| 7 | Proceso de extracción con solventes  | 0,12              | 0,07                           | 0,16                      | 0,11                        | 0,06                    | 0,09                           | 0,19               | 0,04              | 0,23  | 0,10 |
|   | <b>PONDERACION DE CRITERIOS</b>      | 1                 | 2                              | 3                         | 4                           | 5                       | 6                              | 7                  | 8                 | 9     | 10   |
|   |                                      | 0,09              | 0,24                           | 0,03                      | 0,06                        | 0,11                    | 0,03                           | 0,05               | 0,13              | 0,30  | 0,19 |

**Tabla 10.** Resultados de la Evaluación de tecnologías de regeneración de aceites lubricantes usados

|          | <b>Listados de Alternativas</b>      | <b>Ponderación final</b> |
|----------|--------------------------------------|--------------------------|
| 1        | Proceso ácido-arcilla                | 0,250                    |
| <b>2</b> | <b>Proceso de destilación</b>        | <b>0,261</b>             |
| 3        | Extracción solvente con hidroacabado | 0,186                    |
| 4        | TFE + acabado solvente               | 0,138                    |
| 5        | TFE + acabado de arcilla             | 0,139                    |
| 6        | TFE + hidroacabado                   | 0,101                    |
| 7        | Proceso de extracción con solventes  | 0,149                    |

Fuente. Elaboración del autor