

**MODELO VIABLE DE PLANTA DE TRATAMIENTO DE ACEITES  
LUBRICANTES USADOS, PARA LA ESCUELA DE AVIACIÓN DEL EJÉRCITO  
NACIONAL**

Desarrollado por:

Juan David Vega Tuta

Johan Steven Sabogal Castillo

José Ignacio Corredor Ruiz

Tutor

M. Sc Anderson Castro Carreño

**Centro de Educación Militar  
Programa de Ingeniería Aeronáutica  
Cohorte 1  
5/02/2021**

### **Dedicatoria.**

Dedico este trabajo, primero que todo a Dios, quien en su inmensa sabiduría puso este camino para mi familia y para mí. A mis padres, quienes con su amor, esmero y dedicación inculcaron en mí valores, los cuales he tratado de transmitir a mis hijos, con amor y respeto. A mi hermana, quien sin tener responsabilidad alguna me ha colaborado y con ello a mi familia. A mi esposa Yolanda, quien siempre me alentó a seguir adelante cuando en los momentos más oscuros me he querido rendir y dejar todo a un lado.

A mis hijos, Cristian, María Gabriela y Miguel Ángel, quienes son los protagonistas de este título, pues fueron ellos la razón para salir adelante y querer avanzar hacia un futuro seguro. A mis profesores a lo largo de la carrera, quienes dejaron en mí no solo una huella como personas sino como verdaderos docentes que me inculcaron el deseo de estudio y superación, sin ustedes no hubiera sido posible este título.

Por último, a todas aquellas personas que me he encontrado en este trasegar y que de una u otra manera han aportado un granito de arena para que al final este sea el producto de tanto trabajo y compromiso.

**José Ignacio Corredor Ruiz.**

Dedico con todo mi corazón a todas las personas que nos colaboraron en todo este proceso, en especial a mis padres, ya que gracias a ellos soy una persona de bien en la actualidad; muchos de mis logros se los debo a ustedes, entre los que se incluyen este. Me formaron con valores y reglas que me han ayudado en el recorrido de mi vida y en formarme como un ser humano de bien.

**Juan David Vega Tuta.**

Dedico esta tesis de manera especial a mis padres Clara Inés Castillo Gonzáles y Julio Enrique Sabogal Velázquez que siempre me apoyaron incondicionalmente en la parte moral, ética y económicamente para poder llegar a ser un profesional. Por formarme desde pequeño con respeto, educación y buen ejemplo hasta forjarme como la persona que soy hoy en día con valores y metas claras.

A mis tíos, primos y demás familia en general por el apoyo que siempre me brindaron día a día en el transcurso de cada año de mi carrera universitaria. No podría sentirme más agradecido y satisfecho con la confianza puesta en mi desde el primer momento que di el paso a la vida universitaria.

**Johan Steven Sabogal Castillo.**

### **Agradecimientos.**

Agradezco primero que todo a Dios, quien me permitió comenzar y llevar a feliz término la carrera de Ingeniería Aeronáutica. A la Escuela de Aviación del Ejército, quien me dio en primera instancia el apoyo necesario y creyó en mi para llevar a cabo esta hermosa carrera. Al profesor, tutor y amigo, M. Sc Anderson Castro Carreño, quien con su dedicación, exigencia y esmero logro llevar a feliz término este trabajo de grado, gracias por creer en nosotros cuando otros no lo hicieron.

**José Ignacio Corredor Ruiz.**

Agradezco a mi tía, ya que me ha venido apoyado en todo lo que he querido desde pequeño, aparte de ser una tía o un familiar más la puedo considerar como una segunda mamá, en la cual poderme apoyar en los momentos malos y buenos, muchas gracias por todo y este paso más en mi carrera profesional es en parte gracias a ti.

También agradezco a toda mi familia, porque gracias a ellos me sentí apoyado física y sentimentalmente, agradezco a mis hermanos, mis tíos, mis abuelos y a todo el resto de mi familia que me han venido apoyando en todo este proceso. A mis profesores y educadores que me han venido instruyendo en todo este proceso, con sus conocimientos, experiencia y ocurrencias, he podido forjarme como un mejor hombre y como un profesional de bien, muchas gracias por todo su tiempo y por el trabajo que le di a cada uno. Agradecemos también a nuestro tutor, ya que gracias a él hemos podido lograr nuestro objetivo, el cual es nuestro proyecto de grado y que gracias a él que nos depositó su confianza desde hace más

de 6 meses, hemos podido sacar este proyecto todos juntos adelante, gracias por el tiempo, los consejos, las jaladas de pelo que nos ha metido por distintos motivos y también porque aparte de que fue nuestro tutor, lo podemos considerar un amigo más el cual podemos contar con él en cualquier momento.

**Juan David Vega Tuta.**

En primer lugar, agradezco a la Escuela de Aviación del Ejército por haberme aceptado ser parte de ella, abrirme las puertas para poder estudiar mi carrera de Ingeniería Aeronáutica y formarme como un profesional integro y ético, así como también a los diferentes docentes que brindaron sus conocimientos y apoyo para seguir adelante día a día.

Gracias a mis padres y familia que fueron los mayores promotores de mis sueños, gracias por cada día confiar y creer en mí y en mis expectativas, gracias porque realizaron su aporte que hoy en día se ve reflejado en la culminación de mi paso por la Universidad

Agradezco también a mi tutor de tesis M.Sc. Anderson Castro Carreño por haberme brindado la oportunidad de recurrir a su capacidad y conocimiento, así como también haberme tenido toda la paciencia y confianza del mundo para guiarme durante todo el desarrollo de la tesis.

A Dios, gracias porque esta tesis es una gran bendición en todo sentido, con tu amor y bondad me permites tener y disfrutar a mi familia, así como cumplir cada uno de mis sueños y metas con tu bendición. Y finalmente, agradezco a mis compañeros de clase y amigos que durante el transcurso de mi carrera profesional me acompañaron y apoyaron el proceso hasta lograr este gran logro.

**Johan Steven Sabogal Castillo.**

**MODELO VIABLE DE PLANTA DE TRATAMIENTO DE ACEITES  
LUBRICANTES USADOS, PARA LA ESCUELA DE AVIACIÓN DEL EJÉRCITO  
NACIONAL.**

**Resumen.**

**Palabras Claves:** Lubricante, Tratamiento, Catalizadores, Reutilizable, Impacto Ambiental.

El desarrollo de este trabajo nace de la necesidad ambiental, técnica, científica y económica que gira en torno al manejo de aceites residuales en la Escuela de aviación, es por esto que se propone un modelo diseñado de planta de tratamiento de estos residuos a través de la revisión bibliográfica y el uso de programas de simulación y diseño como LabView para demostrar sus características. Se realizó un estudio de los métodos que actualmente existen para regeneración de los lubricantes usados comúnmente, haciéndolo más preciso, para el uso de residuos lubricantes en algunas aeronaves específicamente los helicópteros UH-60 utilizados por el Ejército Nacional de Colombia. A partir del análisis de los documentos se observa, que método de tratamiento basado en el uso del propano, es el óptimo de acuerdo con sus características técnicas y beneficio para el medio ambiente, así como el de mayor viabilidad en términos económicos y autosostenibilidad. Adicionalmente se pone en evidencia que el uso de catalizadores con propiedades acidas podría otorgar un beneficio al proceso de tratamiento, expuesto en la planta diseñada en este trabajo, en cuanto a su aporte frente a la a obtención de lubricantes tratados más limpios. Este proyecto tiene el fin de aportar al Ejército Nacional de Colombia en el manejo de residuos tratados tecnológicamente, como un aporte a la conservación del medio ambiente, en el marco de su política institucional.

**Abstract.****Title: VIABLE MODEL OF A USED LUBRICANTS OILS PROCESSING PLANT  
FOR THE NATIONAL ARMY AVIATION SCHOOL.****Authors: Juan David Vega Tuta, Johan Steven Sabogal Castillo and José Ignacio  
Corredor Ruiz.****Keywords: Lubricant, Oil, Catalysts, Reusable, Environmental Impact**

The development of this work arises from the environmental, technical, scientific and economic need that revolves around the management of residual oils in the School of Aviation, which is why a designed model of a processing plant for these waste is proposed through the bibliographic review and the use of simulation and design programs such as LabView to illustrate its characteristics. A study was carried out of the methods that currently exist for the regeneration of normally used lubricants, making it more precise, for the use of lubricant waste in some aircraft, specifically the UH-60 helicopters used by the Colombian National Army. From the analysis of the documents, it is observed that the processing method based on the use of propane is the most optimal according to its technical characteristics and benefit for the environment, as well as the greatest viability in economic terms and self-sustainability. Furthermore, it is evidenced that the use of catalysts with acidic properties could provide a benefit to the treatment process, exposed in the plant designed in this, in terms of its contribution compared to obtaining cleaner treated lubricants. This project aims to contribute to the Colombian National Army in the management of technologically treated waste, as a report to the conservation of the environment, within the framework of its institutional policy.

<b>CAPÍTULO 1.</b>	14
<b>Introducción.</b>	14
<b>1.1 Descripción del Problema.</b>	16
Impacto Ambiental de los (ALU).	17
Contaminación del Suelo.	18
Contaminación del Agua.	18
Contaminación del Aire.	19
Consumo de Lubricantes en el Ejército Nacional.	19
<b>1.2 Pregunta de investigación.</b>	22
<b>1.3 Objetivos.</b>	22
1.3.1 Objetivo general.	22
1. 3.2. Objetivos específicos.	22
<b>CAPÍTULO 2</b>	23
<b>Estado del Arte.</b>	23
Importancia de los catalizadores en procesos de purificación de lubricantes usados.	26
<b>CAPÍTULO 3</b>	28
<b>Marco Referencial</b>	28
<b>3.1 Historia del uso de los lubricantes:</b>	28
3.1.1 Uso de los lubricantes en la aviación:	29
3.1.2 Uso de los aceites lubricantes en maquinarias:	30
<b>3.2 Clasificación y composición de los lubricantes:</b>	31
3.2.1 Según su Origen:	31
3.2.2 Aceites Minerales:	32
3.2.3 Lubricantes Sintéticos:	35
<b>3.3 Propiedades fisicoquímicas de los lubricantes en general:</b>	37
3.3.1 Viscosidad:	37
3.3.2 Punto de inflamación y de combustión:	39
3.3.3 Densidad.	39

3.3.4 Número total de ácido TAN ( <i>Total Acid Number</i> ).	40
3.3.5 Estabilidad a la Oxidación.	40
3.3.6 Aditivos en los Lubricantes.	41
<b>3.4 Generalidades de los Aceites Lubricantes Usados (ALU):</b>	41
3.4.1 Contaminantes presentes en un (ALU).	43
<b>3.5 Marco legal referente al uso y tratamiento de residuos lubricantes.</b>	44
Ley 430 de 1998.	45
Ley 1252 de 2008.	45
Resolución 1446 de 2005.	45
Decreto 1220 de 2005.	46
Decreto 1609 de 2002.	46
Decreto 4299 de noviembre 25 de 2005.	46
Decreto 4741 de 2005.	47
<b>3.6 Metodología de la investigación utilizada para el presente proyecto.</b>	48
<b>CAPÍTULO 4</b>	51
<b>Resultados y análisis.</b>	51
<b>4.1 Evaluación de los procesos de regeneración de aceites lubricantes usados mediante la revisión y comparación bibliográfica.</b>	51
4.1.1 Método ácido-arcilla.	52
4.1.2 Extracción por solvente.	54
4.1.3 Método de Re-refinado del aceite.	56
4.1.4 Proceso meinken.	57
4.1.5 Proceso selecto propano-hidroterminado.	58
4.1.6 Proceso con arcilla.	60
4.1.7 Proceso de extracción con propano líquido.	61
<b>4.2 Diseño del plano de la planta de tratamiento propuesta de acuerdo con el método evaluado en la primera fase de investigación.</b>	69
<b>4.3 Simulación del proceso de la planta de tratamiento (ALU) mediante el programa de LabView.</b>	80

	10
4.3.1 Parte Gráfica:	81
4.3.2 Programación utilizada para la simulación por LabView de la Planta de (ALU) propuesta:	87
<b>4.4 Diagnóstico de la viabilidad sostenible de la planta de tratamiento de (ALU) y sus impactos ambientales.</b>	91
<b>4.5 Catalizadores modificados para optimizar el proceso de purificación del modelo de planta propuesto de (ALU).</b>	100
4.5.1 Pilarización de arcillas.	101
4.5.2 Etapas desarrolladas.	102
4.5.2.1 Preparación y obtención de catalizadores ácidos.	102
4.5.2.2 Caracterización de los catalizadores ácidos obtenidos.	103
4.5.2.3 Preparación y obtención de catalizadores ácidos.	103
4.5.2.4 Caracterización de Acidez.	105
4.5.3.5 Evaluación de las propiedades ácidas, usando la prueba de decano.	106
<b>CAPÍTULO 5.</b>	108
<b>Conclusiones.</b>	108
<b>Recomendaciones.</b>	111
<b>Bibliografía</b>	112

**Lista de Ilustraciones**

<b>Ilustración 1</b> Aceites Minerales.....	32
<b>Ilustración 2</b> Estructura química de las parafinas.....	34
<b>Ilustración 3</b> Estructura química de los naftenos. ....	34
<b>Ilustración 4</b> Estructura química de los aromáticos.....	35
<b>Ilustración 5</b> Metodología de Desarrollo del Proyecto.....	49
<b>Ilustración 6</b> Planta de Tratamiento.....	54
<b>Ilustración 7</b> Planta por Solvente. ....	55
<b>Ilustración 8</b> Diagrama planta. ....	57
<b>Ilustración 9</b> Diagrama de Flujo de la planta. ....	60
<b>Ilustración 10</b> Consumo lubricantes UH-60 2019. ....	97

**Lista de Tablas**

<b>Tabla 1</b> Consumo Mantenimiento UH-60.....	20
<b>Tabla 2</b> Consumo en Pesos Mantenimiento UH-60.....	21
<b>Tabla 3</b> Características de los lubricantes sólidos.....	36
<b>Tabla 4</b> Viscosidad del aceite en función de sus condiciones de operación. ....	38
<b>Tabla 5</b> Contaminantes en Lubricantes sados.....	43
<b>Tabla 6</b> Comparación métodos. ....	65
<b>Tabla 7</b> Elección del Proceso de Extracción. ....	67
<b>Tabla 8</b> Costo para la Implementación de la Planta de Tratamiento. ....	94
<b>Tabla 9</b> Inversiones Fijas.....	95
<b>Tabla 10</b> Inversiones Diferidas.....	96
<b>Tabla 11</b> Estimación costos lubricantes UH-60 2019.....	98
<b>Tabla 12</b> Estimación posible ahorro 2019.....	99
<b>Tabla 13</b> Espaciados <i>d001</i> de los sólidos pilarizados. ....	104
<b>Tabla 14</b> Acidez total por TPD-NH <sub>3</sub> . ....	106

## Lista de Figuras

<b>Fig. 1</b> Diseño propuesto de planta de tratamiento de (ALU). .....	70
<b>Fig. 2</b> Separador de Fases.....	72
<b>Fig. 3</b> Fase Destilación Atmosférica.....	77
<b>Fig. 4</b> Fase Destilación Fraccionada.....	78
<b>Fig. 5</b> Oxidador Térmico.....	79
<b>Fig. 6</b> Ingreso de Lubricante Usado.....	81
<b>Fig. 7</b> Mezcla de Aditivos. ....	82
<b>Fig. 8</b> Mezcla Propano Aceite. ....	83
<b>Fig. 9</b> Inicio Decantadores. ....	83
<b>Fig. 10</b> Fase Evaporación y Vaporación. ....	84
<b>Fig. 11</b> Destilación.....	85
<b>Fig. 12</b> Finalización del Proceso. ....	86
<b>Fig. 13</b> Eliminación de Vapores. ....	86
<b>Fig. 14</b> Estructura Fase Inicial.....	87
<b>Fig. 15</b> Estructura Decantadores.....	89
<b>Fig. 16</b> Estructura Destilación. ....	89
<b>Fig. 17</b> Estructura Oxidador Térmico. ....	90
<b>Fig. 18</b> Estructura Termómetros.....	91
<b>Fig. 19</b> Esquema del proceso de intercalación-pilarización:(1) Intercalación mediante intercambio iónico con los iones keggin, (2) formación de pilares (nanopartículas de óxido de aluminio) mediante calcinación. ....	102
<b>Fig. 20</b> Patrones de difracción de rayos X para la arcilla natural y modificada por pilarización Al <sub>13</sub> , y Al-Zr. ....	104
<b>Fig. 21</b> Test Catalítico - % conversión - % craqueo - % isomerización. ....	107
<b>Fig. 22</b> Comparación de los resultados de selectividad, % conversión - % craqueo % isomerización.....	108

## **CAPÍTULO 1.**

### **Introducción.**

Durante algunas décadas el ser humano a buscado la manera de hacer más amigable el desarrollo de las tecnologías usadas con el medio ambiente, tratando de reducir en gran medida, el uso de productos derivados del petróleo, sustituyéndolos por sustancias y/o, elementos que se puedan reutilizar o regenerar. De otro lado, el reemplazo de los lubricantes no es fácil, debido a su necesidad al ser sustancias fundamentales en la industria automotriz, la metalmecánica, la aviación, entre otras.

De acuerdo con lo anterior, el presente proyecto pretende hacer más fácil la reutilización, que su discontinuación del mercado; es por esto que se ha propendido por la investigación de métodos alternativos que logren tomar un aceite lubricante usado quien a partir de este momento se señalara como (ALU) y regenerarlo con el fin de ser reaprovechado nuevamente.

Por otra parte, entre los métodos utilizados más comunes para la recuperación de (ALU), son aquellos como los inducidos ellos por efectos de arcillas, el re-refinado de aceite, la extracción por medio de disolventes, entre otros, y que han sido puestos en práctica durante muchos años, generando algunos desechos tóxicos derivados del proceso, y el lubricante regenerado.

A partir de la revisión bibliográfica realizada se evidencia en este trabajo que el método más efectivo y económico para la purificación de (ALU), y que, además, contribuye a la

protección y conservación del medio ambiente, obteniendo como la regeneración de lubricantes es el método de extracción por propano.

En este trabajo, adicionalmente se evaluaron los resultados de catalizadores desarrollados de bentonita en polvo con contenidos de Al y de Al-Zr sólidos, obtenidos mediante un proceso de síntesis específico desarrollado por Castro et al. (2019), los cuales que se sugieren y que podrían aportar a una mejor eficiencia en el proceso de reutilización y purificación de (ALU) y permitió generar recomendaciones acerca de la importancia y posibilidad de desarrollar este tipo de tecnologías en las instalaciones del Ejército.

Por estas razones y después de realizar un análisis de los diferentes métodos, tomando en cuenta la necesidad de regenerar los lubricantes utilizados en la aviación, se evidencia la importancia de implementar una planta de regeneración de lubricantes por medio de la extracción por propano, logrando que la Aviación del Ejército se convierta en la primera fuerza armada autosustentable y autosuficiente en el uso de aceites regenerados.

Por tal motivo y después de una ardua investigación de diversas plantas de tratamiento de (ALU), se logró adecuar a las necesidades que se requerían para esta investigación, teniendo en cuenta el enfoque autosostenible, así como la necesidad de mitigar al máximo el impacto medio ambiental, se propone el modelo expuesto en este trabajo. Algunas de las características del diseño propuesto de la planta de tratamiento, se basaron en el método de extracción por propano líquido, optando además por la propuesta de la implementación de catalizadores para posiblemente mejorar la calidad de los (ALU), además, y pensando en reducir al máximo las emisiones atmosféricas contaminantes, se propone la instalación de un oxidador térmico que albergue y trate las emisiones de cada fase de la planta de tratamiento. De acuerdo a lo anterior y con la finalidad de crear así un posible diseño

innovador que vaya encaminado al aporte de los objetivos de sostenibilidad propuestos por la ONU, contribuyendo al tratamiento de (ALU), impidiendo así una posible contaminación de agua y suelos, convirtiendo a la aviación del Ejército en una organización sostenible en el uso de aceites lubricantes regenerados aportando a la reducción del uso de recursos y reduciendo las emisiones de carbono que perjudican al medio ambiente y contribuyen al cambio climático que se está generando con la industrialización; es así como se determinó que con el desarrollo de este proyecto se aportará a los siguientes objetivos de sostenibilidad:

- Objetivo 6 Agua limpia y saneamiento.
- Objetivo 9 Industria, innovación e infraestructuras.
- Objetivo 11 Ciudades y comunidades sostenibles.
- Objetivo 12 Producción y consumo responsables.
- Objetivo 13 Acción por el clima.

### **1.1 Descripción del Problema.**

La alta industrialización ha generado un incremento en el consumo de los lubricantes en los últimos años, ejemplo de esto es la necesidad que existe de realizar los cambios de aceite a los automotores cada vez con menos tiempo de utilización, entre cambio y cambio, esto debido a la alta frecuencia de uso afecta directamente el consumo y uso de aceites lubricantes, representado en más del sesenta (60%) por ciento de su producción universal, llegando a una cifra aproximada a 24 Tm, anualmente, mismas que desechadas, generan un impacto ambiental difícil de controlar, pues después de utilizar dichos lubricantes, estos

son vertidos bien sea a cauces de ríos, alcantarillados o terminan en terrenos afectando la tierra y material vegetal circundante. (Álvaro et al., 2019).

Según Jurado (2017), un mal manejo de los (ALU), generan contaminaciones en agua, suelo y aire, este último, generado por partículas metálicas que se desprenden del motor y gases emanados debido a la combustión incompleta; por otra parte, los (ALU) son considerados peligrosos, debido a sus características de inflamabilidad y toxicidad, que pueden permanecer en el ambiente viajando a través del suelo, infertilizándolo, debido a su baja biodegradabilidad, lo cual permite que se filtre a los caudales de aguas subterráneas, contaminándolas.

### **Impacto Ambiental de los (ALU).**

La mala disposición, almacenaje y reutilización de los lubricantes, ha desencadenado una amplia polución, siendo por supuesto los países más desarrollados los que más aportan al índice de contaminación global.

Existen contaminantes de los aceites lubricantes usados, que contienen diversos compuestos químicos, como metales pesados, entre los que se cuentan, el Cromo, el Cadmio, el Arsénico, el Plomo, Hidrocarburos Aromáticos Polinucleares, Benceno y algunas veces solventes clorados. Estos compuestos químicos producen un efecto directo sobre la salud humana y varios de estos productos son cancerígenos (Chuqui & Romero, 2017).

Al momento de verter en las aguas, los residuos de estos aceites ya usados, sea de forma directa o por el alcantarillado, se produce una película impermeable que impide la oxigenación de agua, logrando tener contacto con las fuentes hídricas limpias y generando

asfixia a los seres vivos ; en caso que estos desechos sean quemados, sin un control adecuado ni tratamiento debido, emiten gases tóxicos y contaminantes, debido a la presencia de plomo, cloro, fósforo, azufre entre otros, lo que es nocivo para la salud de los seres humanos (EE.UU. 2017).

### **Contaminación del Suelo.**

Una de las formas más usadas para el desecho de los lubricantes, se realiza en la inmunización de la madera, irrigación de los caminos para la atenuación del polvo o como base para el asfalto, lo que genera que los terrenos se vuelvan infértiles e inadecuados para su utilización. Moreno (2019) De otro lado al entrar en contacto con la tierra, los lubricantes contienen hidrocarburos que no son degradables biológicamente, destruirían el humus vegetal y acabarían con la fertilidad del suelo (Chuqui & Romero, 2017).

### **Contaminación del Agua.**

La contaminación de las fuentes hídricas es quizás el más grave de los focos de contaminación, pues al entrar en contacto con el líquido, el aceite forma una película impermeable que impide la adecuada oxigenación y acaba con la vida tanto en el agua como en la tierra, sin contar que puede contaminar alimentos y estos ser ingeridos por los seres vivos involuntariamente.

Como dato relevante y preocupante, se tiene que un litro (1 lt) de aceite contamina un millón de litros de agua (1.000.000 lts) que pueden tardar de diez (10) a quince (15) años en ser eliminados (Moreno, 2019).

**Contaminación del Aire.**

Actualmente se utiliza gran variedad de métodos para la eliminación de los lubricantes usados; uno de ellos es la utilización de hornos, que cumplen con la función de eliminar dichos lubricantes, pero generando gases que son evaporados a la atmosfera, poseedores de gran cantidad de contaminantes como el cloro, el fosforo y el azufre, sin contar con el plomo presente en estos aceites, que son entre el 1 y el 1.5% del peso, provenientes de las gasolinas y los aditivos suministrados. (Álvaro et al., 2019).

**Consumo de Lubricantes en el Ejército Nacional.**

La creciente utilización de aeronaves en el ámbito comercial, privado y militar ha incrementado el uso de (ALU) debido a su aumento en los tiempos de mantenimiento, para el correcto desempeño de las mismas. El uso de lubricantes en aviación, como en todos los sistemas mecanizados cuyo funcionamiento hace indispensable los aceites, obligadamente genera sobreexcedentes óleos, que, si resultan objeto de malos o inadecuados manejos, producen daños al medio ambiente, en especial a las fuentes hídricas.

En el caso especial del Ejército Nacional de Colombia, es que para mantener una flota de más de 50 aeronaves UH-60 genera un abundante empleo de lubricantes, como lo indica a continuación la tabla 1 que muestra el consumo durante el año 2019. Según el informe denominado plan de mantenimiento 2019 del BAEMA ubicado en la base militar de Tolemaida en el cual se registró el siguiente consumo de la flota de UH-60:

**Tabla 1** Consumo Mantenimiento UH-60.

TOTAL, AÑO 2019		
ELEMENTOS	CANTIDAD	UNIDAD DE MEDIDA
Aceite 2380	5.166	Cuartos
Mil-h-5606	1.220	Cuartos
Mil-h-83282	2.133	Cuartos
Mil-prf-6081	351	Cuartos

Fuente: Tomado de (Ejército 2019).

La anterior información expone la necesidad que existe de buscar alternativas limpias para tratar y reutilizar lubricantes usados en la aviación del ejército nacional que se desechan anualmente y que pueden generar efectos contaminantes a nivel de suelos, aire y aguas que entren en contacto con dichos residuos.

El manejo de aceites residuales es un tema que debe de preocupar a todas las personas que se vean involucradas directa o indirectamente en la producción, distribución y disposición final de los lubricantes, ya que se debe de hacer una excelente gestión sobre el manejo de estos residuos y así poder garantizar una protección del medio ambiente, el cual será el más afectado si no se llevan a cabo correctamente los procesos de almacenamiento, transporte y disposición final. (Álvaro et al., 2019).

Otro de los problemas que afrontan las fuerzas armadas y en especial el Ejército Nacional de Colombia, es el alto costo en el que incurren al momento de adquirir los

lubricantes y aditivos necesarios para el correcto funcionamiento de los motores y cajas reductoras de las aeronaves UH-60I y UH-60L, las cuales necesitan de un constante cambio debido a los esfuerzos y altas temperaturas a las que son sometidas en el área como lo muestra la siguiente tabla 2.

**Tabla 2** Consumo en Pesos Mantenimiento UH-60.

TOTAL, AÑO 2019 en pesos		
ELEMENTOS	Valor Unitario	Total
Aceite 2380	\$ 97.793	\$ 505.159.921
Mil-h-5606	\$ 33.380	\$ 40.710.285
Mil-h-83282	\$ 54.123	\$ 115.423.414
Mil-prf-6081	\$ 60.113	\$ 21.099.544
Total		\$ 682.393.163

Fuente: Tomado de Ejército (2019).

Así mismo, los cambios derivados de los mantenimientos preventivos, correctivos y overhaul necesarios para su funcionamiento, generan desperdicios que deben ser desechados de manera segura y con los más altos controles, con el fin de no incurrir en falta alguna, es por esta razón que se piensa en el desarrollo de la planta de tratamiento de extracción con propano, pues no solo evitaría el desecho y desperdicio de los resultantes de lubricantes, sino que lograría que se convirtiera en una institución autosostenible, capaz de recuperar y reutilizar gran parte del lubricante desechado evitando grandes costos a futuro, y generando nuevos empleos en su funcionamiento.

La propuesta de una planta de tratamiento para el reaprovechamiento de lubricantes usados en la escuela de aviación no solo es importante para mitigar efectos sobre el medio ambiente como se mencionó anteriormente, sino que además, el lograr reutilizar los lubricantes obtenidos de los remanentes de uso de las aeronaves lograría que el ejército nacional obtuviera un ahorro significativo en la compra del insumo denominado lubricantes para aeronaves y éste ahorro podría ser utilizado en otro rubro que a su vez redundaría en beneficios para esta institución.

## **1.2 Pregunta de investigación.**

¿Es viable desde el punto de vista técnico, ambiental y económico, proponer un modelo de planta de tratamiento de aceites lubricantes usados para la Escuela de Aviación del Ejército?

## **1.3 Objetivos.**

### **1.3.1 Objetivo general.**

Evaluar modelos de plantas de tratamiento eficientes para la regeneración de (ALU), producto de las aeronaves de Aviación Ejército.

### **1. 3.2. Objetivos específicos.**

- Analizar los procesos de regeneración de (ALU) empleados en la industria para proponer el proceso de tratamiento viable mediante la revisión y comparación bibliográfica.
- Diseñar el plano grafico de la planta de tratamiento de acuerdo con el método evaluado en la primera fase de investigación.

- Simular el proceso de la planta de tratamiento mediante el programa de LabView para identificar las características de su funcionamiento.
- Diagnosticar la viabilidad sostenible de la planta propuesta y sus impactos ambientales.
- Proponer catalizadores modificados que posiblemente permitan optimizar el proceso de purificación del modelo de planta propuesto.

## **CAPÍTULO 2**

### **Estado del Arte.**

Durante mucho tiempo el hombre moderno ha propuesto investigaciones alternativas amigables con el medio ambiente para así generar la mitigación de los efectos causados durante años por el mal manejo de los recursos. Es así que desde la academia se ha propendido por buscar la manera de reducir el uso de materias de base fósil que contaminan a diario el medio ambiente.

En Valdivia – Chile, Jones (2007), propuso una planta de regeneración de lubricantes utilizados en la industria automotriz, y concluyó, después de implementar el método cuantitativo, que la regeneración de los lubricantes no solo es necesaria para la industria de los aceites, sino que también es una ayuda que se le brinda al medio ambiente y además es un negocio casi inexplorado en el que muy pocas empresas y/o personas están dispuestos a invertir, pero si algo queda claro de las conclusiones obtenidas, es que la inversión necesaria para implementar dicha planta, se puede recuperar muy rápido debido al flujo de lubricantes

recuperados y al estilo de planta de tratamiento a la cual se hace referencia en el trabajo, pues está basada en la eliminación de contaminantes líquidos por termovacío y de contaminantes sólidos por decantación centrífuga.

En Pereira – Colombia Álvarez & Betancur (2015), propusieron una planta de regeneración de lubricantes con el fin de optimizar los residuos generados en la zona cafetera y ofrecerlos a diferentes empresas que aprovecharían sus propiedades caloríficas para ser usados en las cementeras y demás, su idea de proyecto se basa en una maquina reprocesadora, la cual será la encargada de realizar el proceso para luego ser sometido el (ALU) a un control de calidad para establecer si es de buena calidad o si por el contrario debe de ser nuevamente sometido a reproceso. Esta investigación concluye aportes interesantes para el manejo y reciclaje de los (ALU) donde se disminuye su efecto contaminante, así mismo evidencia lo rentable que puede ser la implementación de dicha planta, no solo para el medio ambiente, sino económicamente, tanto para el personal que trabajará en el proceso, como para los inversores que patrocinen el proyecto.

La disposición final de los (ALU), es quizás uno de los mayores problemas que afronta la humanidad, debido a esto, Andrade (2015), propuso una planta de tratamiento de lubricantes usados, la cual está sustentada en la separación por el método de destilación fraccionada, en donde por medio de la aplicación del calor logra separar el agua del lubricante refinado, esto con el fin de mitigar la contaminación a las fuentes hídricas, para tal proyecto baso su metodología en la parte teórica y en la metodología científica, con el fin de encontrar una verdad objetiva; dentro de su proyecto, se concluyó que el manejo seguro y responsable de

la recolección de los lubricantes usados no se lleva a cabo de la mejor manera, y es por esto que terminan dichos residuos en zonas acuíferas y vertederos que se convierten en foco de contaminación no solo para la fauna sino para el ser humano.

Por otro lado, Nielsen (2016), utilizando una metodología exploratoria, propone una planta de tratamiento basada en la tecnología de sedimentación y destilación, con el fin de separar los elementos pesados del lubricante y así poder enviarlo a una torre de destilación fraccionada que terminará de separar el lubricante regenerado por medio de la aplicación de temperatura, llegado a este punto la autora trata de comprobar si este tipo de proyecto es viable, y llega a la conclusión que no solo es viable desde el punto de vista económico, sino que deja abierta las puertas para futuras disertaciones sobre lo importante de este tipo de alternativas para el medio ambiente.

A su vez las plantas de tratamiento de (ALU) han brindado la oportunidad de regenerar desechos peligrosos, Chuqui & Romero (2017), encontraron que, aunque poner en funcionamiento una planta de tratamiento es costoso, es demasiado redituable dependiendo del flujo de aceites que se regeneren, así mismo concluyeron que es más viable y menos perjudicial a la salud regenerar un lubricante que incinerarlo como actualmente se hace, por tal motivo, decidieron, después de evaluar diferentes métodos, optar por la regeneración de los lubricantes utilizando el método de extracción por propano, esto debido a su compatibilidad con el medio ambiente, pues no genera desechos peligrosos.

Un aporte de Mallqui, J. & Tenazoa, G. (2017), utilizando el método cualitativo determinaron que es posible regenerar lubricantes tanto monogrados como

multigrados recurriendo al proceso térmico, pues es de esta manera como mediante la destilación a presión atmosférica les permitió regenerar lubricantes, esto con el fin de reutilizarlo casi con la misma calidad que un lubricante nuevo.

### **Importancia de los catalizadores en procesos de purificación de lubricantes usados.**

Actualmente, las refinerías a nivel mundial usan procesos como la hidrodesaromatización (HDA), hidrodesulfuración (HDS) e hidrodesnitrogenación (HDN) para la obtención de aceites lubricantes de alta calidad. Esto indica que la presencia de nitrógeno, azufre y aromáticos disminuye la calidad de los estos aceites como lo indican (Clough et al, 2017); y (Haldor, 2020).

Con esto en mente, se debe estudiar qué tipo de catalizadores son los utilizados para los diferentes procesos anteriormente mencionados, encontrando que, los catalizadores usados son los mismos que se usan para reacciones de Hidrocraqueo. Chandak (2016) y Dik, et al (2019). Se debe recordar que los catalizadores de hidrocraqueo principalmente se usan porque tiene una función dual, esto es, una función ácida (craqueante) y una función hidrogenante/deshidrogenante (H/DH). La función craqueante es proporcionada por un soporte ácido mientras la función hidrogenante/deshidrogenante es proporcionada por metales. En términos generales, estos catalizadores están compuestos por un soporte amorfo (sílico alúmina o zeolita) y una función metálica (Chang y Robinson, 2007) y (Amaya, et al, 2020).

A nivel comercial los hidrocraqueadores con mejor rendimiento que apuntan a producción de lubricantes de alta calidad usando catalizadores amorfos desarrollados para optimizar las propiedades, maximizando los barriles VI que se

producen, estos catalizadores están compuestos principalmente de NiMo/silica-alúmina y/o zeolita por sus características ácidas (Clough et al, 2017). Sin embargo, otros materiales que también poseen estas características ácidas son las arcillas, y arcillas modificadas, como se ha reportado actualmente por (Amaya et al, 2020).

Teniendo en cuenta esto, y aunque las zeolitas y silico-aluminas son los materiales principalmente utilizados en los procesos de mejorar la calidad de aceites lubricantes obtenidos, podemos proponer el uso de arcillas como catalizadores en este proceso, ya que, y al igual que en las zeolitas, y silicoaluminas, estos materiales también presentan características ácidas modulables, como se ha reportado por (Amaya et al, 2020), lo cual nos permitiría obtener materiales, activos, económicos y de origen nacional.

Con esto en mente, podemos decir que el uso de arcillas en la presente investigación generaría procesos, viables, económicos y amigables con el medio ambiente para el proceso de reciclaje y tratamiento de purificación de lubricantes para el ejército nacional.

## CAPÍTULO 3

### Marco Referencial

#### 3.1 Historia del uso de los lubricantes:

Según Rodríguez, (2015), afirma que los lubricantes son un concepto que ya existía desde que los seres humanos empezaron a utilizar las herramientas. Antes se utilizaba para prevenir los roces y la corrosión y para mantener las cosas limpias, en estos días tiene efecto de aislamiento y oxidación, de esta manera el lubricante ha estado existiendo como un producto imprescindible para varios objetos.

La primera utilización de los aceites se remonta hasta la época de los egipcios, los cuales, según Rodríguez, (2015), utilizaban aceite de oliva para mover piedras y maderas, y realizar construcciones enormes que estos desarrollaban; después de esto volvió a aparecer en los carros de combate, los cuales utilizaban un ‘sebo’ que es grasa animal en el eje de ruedas como lubricante.

En la Edad Medieval, por la extensión de uso de máquinas complejas de hierro y cobre, aparecieron varios productos lubricantes como aceite de esperma de ballena, aceite de ricino, aceite de cacahuete, aceite de colza, etc., pero no se desviaban del límite de aceite de animal o plantas, y la mayoría se utilizaba por experiencia, no por un análisis científico. (Rodríguez, 2015)

En el Siglo XX, el incremento de la producción obligo a la creación de maquinarias más complejas y delicadas, de este modo se empezaron a necesitar

productos lubricantes para realizar diferentes funciones en condiciones más severas.

En 1920, se creó el método de refinación, la inserción del aditivo para mejorar la calidad de productos lubricantes empezó a difundirse por toda el área industrial. (Rodríguez, 2015).

### **3.1.1 Uso de los lubricantes en la aviación:**

Los aceites sintéticos se utilizan principalmente en las turbinas. Son más fluidos y estables. Trabajan en amplia gama de temperaturas, altas y bajas. El engrase no es un circuito a presión sino por boquillas que lo lanzan finamente sobre los cojinetes de bolas o rodillos. Según el diseño de las cajas reductoras, de sus cojinetes y engranajes, el aceite podía variar su densidad hasta llegar a 9 centistokes en lugar de los 3 centistokes utilizados en USA; los cuales son los submúltiplos de los Stokes. (Kuchling, H, 1996).

Los Stokes son también conocidos como la viscosidad dinámica  $\eta$  ( $\eta = \text{«Eta»}$ ) la cual es una medida de la tenacidad o resistencia a la fluencia de un fluido (este último entendido como una sustancia líquida y fluida). Cuanto mayor sea la viscosidad, más denso (menos líquido) será el fluido; por otro lado, cuanto menor sea la viscosidad, más líquido será el fluido. (Kuchling, H, 1996).

Gradualmente, los aceites de turbinas de UK (*United Kingdom*), empezaron con 7'5 centistokes y fueron bajando hacia los 3 centistokes, pero fue escalonadamente. El 5 centistokes se consideró de 2<sup>da</sup> generación. (Kuchling, H, 1996).

En las turbinas militares, las USAF, (*United States Air Force*), por sus siglas en inglés; se mantuvieron en 3 centistokes, pero la Navy (por utilizar más turbohélices y helicópteros) con mayores cargas con reductoras, engranajes, etc., se mantuvieron en los 5 centistokes. (Kuchling, H, 1996).

En UK (*United Kingdom*) los 7'5 centistokes se resistían. Por tal razón, para las turbinas Soloviev D-30, la marca Shell tenía -y tiene- el Turbine Oil 2, de 2 centistokes de base mineral y con antioxidante añadido. (Kuchling, H, 1996).

En los primeros motores de turbina, los radiadores de aceite cedían el calor al aire. Inmediatamente hubo una solución mejor: el intercambiador de calor aceite-combustible que se hacían un favor mutuo. (Kuchling, H, 1996).

### **3.1.2 Uso de los aceites lubricantes en maquinarias:**

La lubricación se considera como un proceso fundamental para el funcionamiento óptimo de toda maquinaria industrial. Las máquinas empleadas en los procesos de producción de todo tipo siempre requieren del uso de lubricantes, debido a que una carencia de ellos causa que las máquinas se desgasten y dejen de funcionar en un lapso corto. También pueden ocasionar accidentes para las personas o gastos de reparación de la máquina muy elevados por la ruptura de sus partes. (Carrazo, 2020).

Como indica (Esquivel, 2018), los distintos tipos de aceites lubricantes que actualmente se usan en la industria para poder lubricar la maquinaria y herramientas, en su gran mayoría son de origen mineral y son extraídos del petróleo, pero también existen otros tipos de aceites lubricantes como el animal y

vegetal, los cuales tiene un poder de lubricación mayor, sin embargo éstos últimos tienen muy poca estabilidad, se oxidan muy rápido y se descomponen fácilmente produciendo sustancias ácidas que atacan las superficies metálicas de tus herramientas y máquinas.

Una de las ventajas que aporta la industria de los lubricantes es que crea productos innovadores y de alta calidad todos los días y es ideal para maquinaria industrial siempre que puedan funcionar con normalidad y no se sobrecalienten. Los lubricantes son de hecho muy importantes para mantener y proteger diferentes tipos de maquinaria industrial. Estos productos se utilizan para maximizar el rendimiento de máquinas de varios tipos y tamaños.

### **3.2 Clasificación y composición de los lubricantes:**

Un lubricante es una película delgada interpuesta entre dos superficies para reducir la fricción. Esto conduce a un movimiento entre estas dos superficies, lo que significa menos desgaste, disipación de calor y menor fricción. (Milán, 2017).

El lubricante ideal debe ser lo suficientemente viscoso para mantener las superficies apartadas, permanecer estable bajo los cambios de temperatura, mantener limpias las superficies lubricadas, no permitir la formación de residuos gomosos, no permitir la formación de lodos y no deberá ser corrosivo. (Bernal, 2019)

#### **3.2.1 Según su Origen:**

Pueden tener sus bases naturales y/o sintéticas dependiendo de la aplicación de cada uno, (Leal, 2014).

Según Leal, (2014), los lubricantes naturales se clasifican en:

- Aceites Animales: cera de abejas, estearinas, glicerina, etc.
- Aceites Vegetales: Resinas, aceites de palma, entre otros.
- Aceites Minerales: Derivados de la refinación del petróleo.

Los aceites paranínicos y nafténicos son aceites minerales muy utilizados para la refrigeración por su excelente comportamiento dieléctrico, por poseer una mejor capacidad de lubricación y especial comportamiento con respecto a la relación viscosidad temperatura. Benloch, (1997).

### **3.2.2 Aceites Minerales:**

Para efectos de esta investigación abordaremos más específicamente el tema de los aceites minerales, que son productos de la refinación del petróleo y son los utilizados más comúnmente en los vehículos y las aeronaves.

A continuación, se mostrará cómo son físicamente los diferentes aceites minerales.

#### **Ilustración 1** Aceites Minerales.



Fuente: Tomado de (Vidal, 2010).

El aceite mineral está compuesto por hidrocarburos saturados e insaturados derivados del petróleo. Hidrocarburos saturados: son muy estables a las siguientes sustancias Oxígeno, luz, temperatura ... no producen fitotoxicidad y su Bajo efecto insecticida. No son demasiado pegajosos. (Alcanos e hidrocarburos naftalenos). Hidrocarburos insaturados: muy inestable, muy inestable. (Porcuna, 2011).

Es muy importante distinguir que entro de la composición de los aceites minerales que existen tres clases principales de hidrocarburos en los aceites minerales los cuales son un referente para su tratamiento:

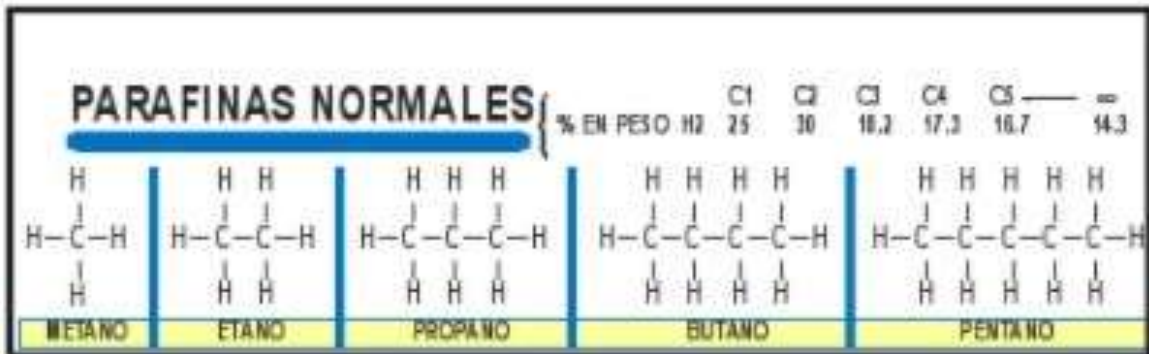
1. Parafinas (alcanos lineales y ramificados).
2. Naftenos (ciclo alcanos con sustituyentes alquílicos).
3. Aromáticos (incluyendo hidrocarburos policíclicos aromáticos HAPs sustituidos, con cantidades pequeñas de HAPs). (Porcuna, 2011).

A continuación, se describirán las diferentes clases de hidrocarburos presentes en los aceites minerales.

- Parafinas:

Son hidrocarburos que gracias a su cadena abierta y saturada tienen un alto índice de viscosidad, temperaturas de ignición e inflamación altas lo que los hace ideales para los motores de combustión interna, ya que no se espesan a temperaturas bajas lo cual es excelente para motores de arranque en frío. (Porcuna, 2011).

### Ilustración 2 Estructura química de las parafinas.



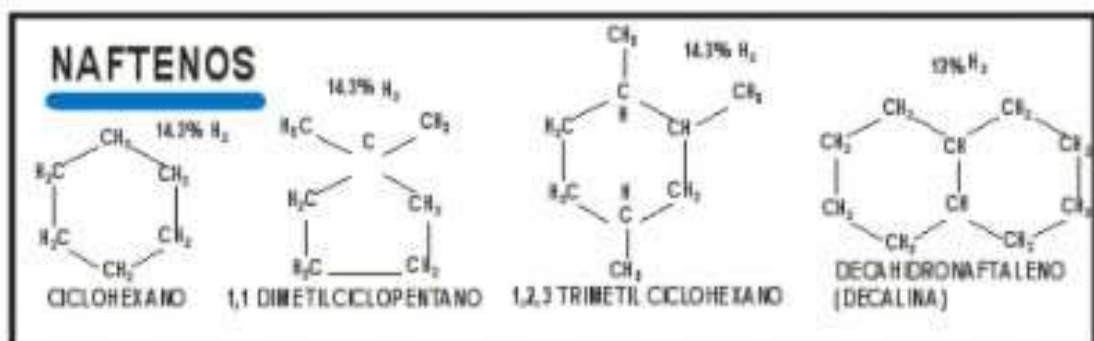
Fuente: Tomado de (Amador, 2015).

- Naftenos:

Estos poseen una cadena cerrada, debido a esto su índice de viscosidad es bajo.

La principal característica de estos aceites es que forman poco carbón evitando el atascamiento de elementos en fricción u obstrucciones en los ductos de lubricación del motor. (Shell, 2019).

### Ilustración 3 Estructura química de los naftenos.

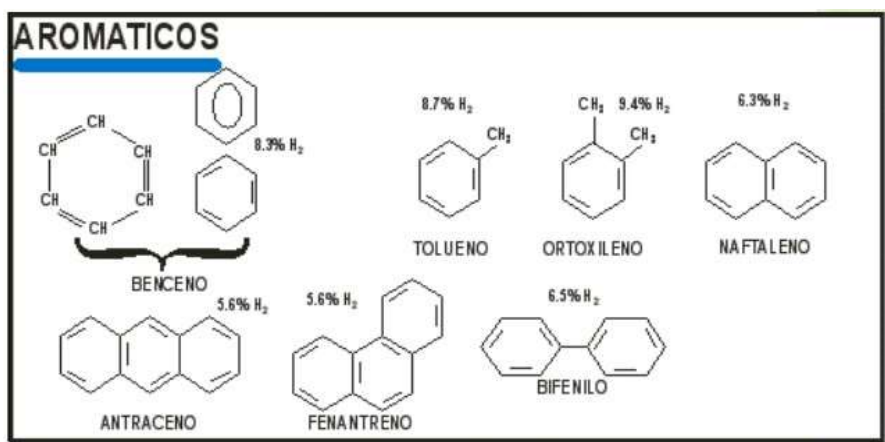


Fuente: Tomado de (Amador, 2015).

- Aromáticos:

Son aceites utilizados en cajas de velocidades debido a su bajo índice de viscosidad, los hidrocarburos aromáticos se oxidan con facilidad formando ácidos orgánicos, es por este motivo que se utiliza en este tipo de maquinaria, con el fin de que se mantengan en contacto con la superficie a limpiar y así evitar la presencia de contaminantes que faciliten su oxidación. (Shell, 2019).

**Ilustración 4** Estructura química de los aromáticos.



Fuente: Tomado de (Amador, 2015).

### 3.2.3 Lubricantes Sintéticos:

Como su nombre lo indica, un lubricante sintético es un lubricante que está diseñado y fabricado para cumplir mejor con el propósito previamente reservado para productos derivados directamente del petróleo. Los términos "sintético" y "sintético" describen aceites base según Ramírez (2020). El aceite sintético no se deriva directamente del petróleo o del crudo, sino que se elabora a partir de subproductos del petróleo mezclados en un proceso de laboratorio. Son más caros

que el aceite mineral debido a su mayor tiempo de fabricación y mayor complejidad. Esto según, (Cubillos, 2010).

A continuación, se muestran las dos diferentes clasificaciones que se dividen los aceites sintéticos:

- Sólidos:

Son utilizados cuando hay temperaturas considerablemente altas, cargas extremas con vibraciones u oscilaciones en órganos a velocidades lentas o condiciones desfavorables de trabajo. (Leal, 2014).

La siguiente tabla 3 muestra las características más relevantes de los lubricantes sólidos:

**Tabla 3** Características de los lubricantes sólidos.

Producto	Cualidades y características
GREDA (o arcilla de Batan)	Con base silicona, es efectiva para retardar la corrosión por fricción y es resistente a altas temperaturas hasta unos 371°C.
GRAFITO	Su inercia química lo capacita para aplicaciones en las que se requiera alta estabilidad térmica, pero hasta una temperatura máxima de 815,5°C.
BISULFURO DE MOLIBDENO (MoS <sub>2</sub> )	Estable en altas temperaturas, es de buena tenacidad superficial y su coeficiente de fricción es bajo.

MICA	Es un mineral natural finamente pulverizado. Algunas veces se agrega a ciertos lubricantes como material de relleno o para aumentar la viscosidad.
TALCO	Se usa como material de pulimento para el acabado de superficies en partes de máquinas.
OXIDO DE ZINC (ZnO <sub>2</sub> )	Tiene coeficiente de fricción bajo y se emplea como un elemento componente en el aceite mineral que se usa para lubricar pares en donde se manejan productos expuestos a descomposición.

Fuente: Tomado de (Peter, 2017).

- **Semi-sólidos:**

Según, Leal (2014), explica que se caracterizan por su elevado poder adhesivo.

En este grupo se incluyen las grasas, las cuales son mezclas de aceites minerales con jabones, cuyas características son función del tipo de aceite y jabón, de los porcentajes de los componentes y del método de fabricación. Generalmente se usan cuando la lubricación se hace en presencia de polvo, suciedad o humedad, ya que, por su cohesión, impide que estos factores perjudiquen el proceso.

### **3.3 Propiedades fisicoquímicas de los lubricantes en general:**

#### **3.3.1 Viscosidad:**

La viscosidad se define como la resistencia que un líquido ofrece a fluir o permitir movimiento, debido a la influencia de una fuerza externa, a una

temperatura determinada. Esta propiedad determina la capacidad de un aceite para derramarse, el valor del rozamiento interno es una función que se comporta inversamente proporcional a la temperatura, es decir, a mayor temperatura menor viscosidad, y a menor temperatura mayor viscosidad. (Leal, 2014).

Por otra parte, Normalmente la viscosidad es el criterio más importante en la elección de un aceite lubricante para un uso determinado. Para que la lubricación sea buena conviene que esta característica se seleccione de acuerdo con la velocidad, carga y temperatura de la parte de la máquina que se va a lubricar. Por ejemplo, las altas velocidades, cargas y temperaturas bajas requieren de un aceite de baja viscosidad” (Albarracín, 2015). La tabla 4 explica la viscosidad que tiene un aceite lubricante en función de las condiciones de operación de cada uno.

**Tabla 4** Viscosidad del aceite en función de sus condiciones de operación.

<b>PARÁMETRO</b>	<b>CONDICIÓN DE OPERACIÓN</b>	<b>VISCOSIDAD DEL FLUIDO</b>
Velocidad	Alta velocidad	Baja Viscosidad
	Baja velocidad	Alta Viscosidad
Carga	Alta Carga	Alta Viscosidad
	Baja Carga	Alta Viscosidad
Temperatura	Alta Temperatura	Baja Viscosidad
	Baja Temperatura	Alta Viscosidad

Fuente: tomado de (Shell, 2019).

### **3.3.2 Punto de inflamación y de combustión:**

Como indica Amador (2015), los Puntos de inflamación y de combustión son la temperatura a la cual la presencia de una llama da lugar a la inflamación instantánea de los vapores del aceite y que a continuación se apaga espontáneamente, la principal diferencia entre el punto de inflamación y el punto de combustión, es que el punto de inflamación describe la temperatura más baja a la que se inicia el encendido de una sustancia, mientras que el punto de combustión describe la temperatura más baja a la que el combustible continúa ardiendo durante un corto período de tiempo.

Leal (2014), explica que la inflamabilidad de un aceite da una orientación sobre la volatilidad de este e indica su homogeneidad. Si el valor de la inflamabilidad aumenta con el funcionamiento, esto significa que el aceite se ha oxidado, ocasionando un aumento de la viscosidad del producto, que altera las condiciones del lubricante hasta el punto de que ya no es adecuado para el tipo de servicio que presta. En el caso contrario, si el valor del punto de inflamación disminuye, indica que se ha producido cierta alteración del aceite, lo cual puede ser indicio de contaminación de combustible.

### **3.3.3 Densidad.**

La densidad es una propiedad clave de un fluido y es dada por la razón entre su masa específica y un volumen conocido ( $d = m / V$ ), El agua, es usada como patrón de referencia, tiene una densidad de 1, 000 kg / m<sup>3</sup>. Los aceites varían entre 700 kg / m<sup>3</sup> y 950 kg / m<sup>3</sup>. Esta es la razón por la cual la mayoría de los aceites flotan en el agua: son menos densos que ella (Hernández, 2018).

De acuerdo con esta propiedad descrita anteriormente, cuando hay problemas de exceso de humedad en su sistema de lubricación, el agua decanta en el fondo del tanque y se puede drenar primero cuando la tapa o la válvula están abiertas. El agua flota sobre el lubricante.

### **3.3.4 Número total de ácido TAN (*Total Acid Number*).**

La acidez de un aceite lubricante está expresada por el número de neutralización. Más de 3mg KOH/g de acidez en lubricantes causa corrosión de metales y emulsificación de los aceites a altas temperaturas, en múltiples aplicaciones (compresores, turbinas, hidráulicos, etc.) (Leal, 2014).

En términos generales, el TAN es la medida de los componentes orgánicos ácidos presentes en los lubricantes. En el caso de aceite usado, el TAN puede aumentar como resultado de los procesos de oxidación que ocurren durante el servicio del aceite lubricante. Sin embargo, el TAN se emplea para predecir la tendencia corrosiva de los aceites hacia el metal. (Leal, 2014).

Cuanto mayor es el TAN, mayor es la degradación del aceite.

### **3.3.5 Estabilidad a la Oxidación.**

El aceite en contacto con el aire se oxida y produce sedimentos de carbón y humo en los motores, compresores y máquinas similares. Este efecto es uno de los factores de mayor degradación de los lubricantes, una elevación anormal de la temperatura puede ser considerada como una indicación de la oxidación del aceite. (Leal, 2014).

La estabilidad a la oxidación como indica Noria, (2014), es una reacción química que ocurre cuando se combinan el aceite y el oxígeno. La tasa de oxidación es acelerada por la alta temperatura, el agua, los ácidos y catalizadores como el cobre. La tasa de oxidación incrementa con el tiempo.

### **3.3.6 Aditivos en los Lubricantes.**

Las elevadas temperaturas, presiones y velocidades a las que los lubricantes suelen estar sometidos en los sistemas mecánicos actuales, hacen que rara vez los aceites minerales puros, incluso los más refinados, puedan soportar las exigencias a las que se exponen, sin la incorporación de ciertos productos capaces de modificar sus características o el curso de algunas transformaciones a las que inevitablemente dan lugar las mencionadas condiciones. Para solventar esta situación, generalmente se incorporan en pequeñas cantidades productos químicos conocidos como aditivos, destinados a mejorar las propiedades naturales de los lubricantes. (Rubio, 2016).

### **3.4 Generalidades de los Aceites Lubricantes Usados (ALU):**

Los aceites luego de cumplir el ciclo de operación sufren una descomposición y degradación de sus componentes como son los aditivos, por lo cual, el aceite tiene un tiempo de uso útil y tiene que ser cambiado. El único componente del aceite que no se degrada es la base lubricante, solo se contamina Hernández (2018). Existen diferentes factores que deterioran a los aceites lubricantes como:

***Temperatura de operación.***

A mayor temperatura, mayor es la descomposición de las cadenas de hidrocarburos, lo que provoca que el aceite se oxide. Los productos formados a partir de este proceso son ácidos que se emulsionan cuando están en presencia con agua y que afectan directamente a las piezas metálicas. Mientras mayor es la concentración de estos ácidos, mayor es la formación de lodos insolubles. Cuando el aceite trabaja a temperaturas menores a 50°C, la velocidad de oxidación del aceite es muy baja, lo cual no influye en la duración del aceite. (Hernández, 2018).

***Agua.***

El agua presente en un aceite usado proviene de la condensación de las partículas de agua del ambiente, o también puede provenir de alguna fuga presente en los sistemas de enfriamiento. El agua se mezcla con el aceite en forma de emulsión, provocando un debilitamiento en la película de lubricación, provocando el contacto entre las superficies metálicas y permitiendo el desgaste de estas piezas. Cuando la presencia de agua en el aceite sobrepasa el 0.2 %, se condensa al aceite. (Hernández, 2018).

***Combustibles.***

La presencia de combustible proviene del paso de este hasta la cámara de combustión y hasta el cárter, lo que provoca en el aceite una dilución de este, que afecta de manera brusca a la viscosidad. (Hernández, 2018).

### ***Sólidos y polvo.***

Estos contaminantes provienen del ambiente donde se encuentren las máquinas, y entran en contacto con el aceite por los sellos y empaques en mal estado. Las partículas metálicas provienen del desgaste de piezas y el hollín formado proviene de la mala combustión dentro de la máquina. (Hernández, 2018).

#### **3.4.1 Contaminantes presentes en un (ALU).**

Según, Murzin (2013), se considera un aceite usado, a todo aceite que haya pasado por el proceso de lubricación y ha sido contaminado durante el tiempo de operación, afectando sus propiedades y degradando sus principales componentes. Después de su uso, el aceite lubricante adquiere grandes concentraciones de metales, originados por el propio desgaste metálico del motor y de las piezas lubricantes que estuvo lubricando. Entre estos metales podemos encontrar cadmio, cromo, plomo, magnesio, entre otros. Además de estos contaminantes, también se encuentran compuestos clorados, que provienen del proceso de refinación del crudo.

La siguiente tabla 5 muestra los contaminantes más comunes presentes en los lubricantes usados:

**Tabla 5** Contaminantes en Lubricantes usados.

<b>Contaminante</b>	<b>Aceite usado en motor a Diésel (PPM)</b>	<b>Aceite usado en motor a gasolina (ppm)</b>	<b>Aceite industrial (ppm)</b>
Cadmio	1,1	1,1	6,1

Plomo	29	2,2	217,7
Cromo	2	9,7	36,8
Zinc	332	951	373,3
PCB'S	20,7	20,7	957,2
Cloro Total	3600	3600	6100

Fuente: tomado de (Hernández, 2018).

En términos generales, los aceites de automoción poseen mayor cantidad de plomo y de zinc, que los aceites de procedencia industrial, en la tabla 5 también se indica que, dentro de los procedentes de motores de gasolina, se observa que presentan una mayor cantidad de metales pesados que los de motores diésel. Sin embargo, los aceites usados industriales contienen una mayor cantidad de cadmio, cromo, cloro y PCB's.

### **3.5 Marco legal referente al uso y tratamiento de residuos lubricantes.**

Uno de los propósitos fundamentales para la creación de este trabajo está en lograr un ambiente más libre de contaminación, el cual está consagrado en el Art 79 de la Constitución Política de Colombia al tener como objeto la transformación de los lubricantes usados como producto combustible.

Por otra parte, en la legislación colombiana se expiden los siguientes Decretos, Leyes y Resoluciones.

**Ley 430 de 1998.**

Esta ley permite el aceite usado como combustible para la generación de energía, adicionalmente establece responsabilidades sobre la empresa receptora y emisora de desechos tóxicos, y obliga a la empresa emisora a identificar plenamente las características fisicoquímicas del desecho toxico generado. Esta Ley en nuestro caso se debe aplicar en el sentido de que debemos identificar cada desecho que obtengamos de lubricante usado de las aeronaves para su posterior tratamiento (El Congreso de Colombia, 1998).

**Ley 1252 de 2008.**

Esta ley tiene como objeto regular y velar por la salud humana y del medio ambiente, así mismo como la importación y exportación de residuos peligrosos en todo el territorio nacional. Vela por la disposición adecuada de los residuos peligrosos. Esta ley en nuestro proyecto de investigación es muy importante debido a que como su objetivo es velar por la buena disposición de los residuos peligrosos y vigila que en el territorio nacional se minimice la generación de dichos residuos; es muy pertinente puesto que con nuestra propuesta el Ejército Nacional de Colombia minimizaría la generación de los aceites lubricantes usados y además se convertiría en una institución con énfasis autosostenible (El Congreso de Colombia, 2008).

**Resolución 1446 de 2005.**

En esta resolución se modifica la Resolución 415 del 13 de marzo de 1998 en la cual se establecen los casos en los cuales se permite la combustión de aceites

usados y las condiciones técnicas para realizar la misma. Se permite el uso y tratamiento de aceites usados en el territorio colombiano estableciendo así nuevas alternativas para el aprovechamiento como combustible de los aceites usados en el territorio nacional (La Ministra de Ambiente, 2005).

**Decreto 1220 de 2005.**

El Ministerio de Ambiente, Vivienda y Desarrollo Territorial, obliga a que la construcción y operación de instalaciones cuyo objeto sea el almacenamiento, tratamiento, aprovechamiento, recuperación y/o disposición final de residuos o desechos peligrosos requieren de Licencia Ambiental, así mismo obliga que una vez definida la planta se debe solicitar la licencia ambiental obligatoria para el desarrollo de la operación (Ministerio de Ambiente, Vivienda y Desarrollo Territorial, 2005).

**Decreto 1609 de 2002.**

En este decreto reglamenta el manejo y transporte automotor de mercancías peligrosas por carretera estableciendo los requisitos técnicos y de seguridad para el manejo y transporte de dichos residuos, para así minimizar riesgos, garantizar la seguridad y proteger la vida y el medio ambiente (Colombia P. d., 2002).

**Decreto 4299 de noviembre 25 de 2005.**

Este decreto reglamenta la producción, distribución, transporte y comercialización de combustibles amparado en normatividad previa a la emisión del artículo, en la cual se establece que las actividades de producción, transporte y

comercialización de combustibles son de libre desarrollo siempre y cuando se acaten la normatividad establecida dentro de la legislación Colombiana, en caso de que no se acaten los lineamientos impuestos en la normatividad se aplicaran las sanciones indicadas en la normas infringidas, también establece que aquellas empresas dedicadas a la refinación de combustibles deberán solicitar ante el ministerio de Minas y Energía un permiso para su funcionamiento, adicionalmente establece que la venta de combustibles deberá realizarse utilizando elemento de medida certificados. Este Decreto aplica directamente pues la planta se dedicará a la regeneración de lubricantes usados, lo cual como resultado genera nuevos lubricantes que serán comercializados, por lo cual se deben acatar cada uno de los requisitos impuestos en este Decreto (Ministerio de Minas y Energía, 2005).

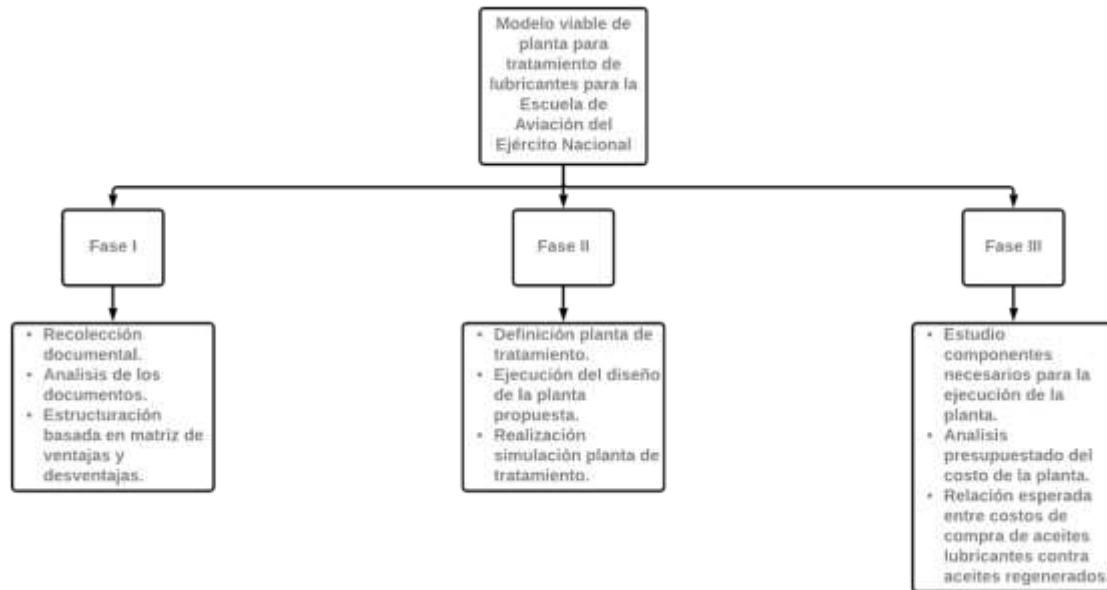
#### **Decreto 4741 de 2005.**

Este decreto tiene como objeto prevenir la generación de residuos y desechos peligrosos, de igual manera regula el manejo de estos residuos como su generación, todo buscando preservar la salud humana y em medio ambiente. Este decreto debido a que enmarca las disposiciones de todas las personas o compañías que generan, manejan o gestionan desechos peligrosos obligando a garantizar una gestión y manejo integral de estos residuos mediante la elaboración de un plan de gestión integral de residuos (Ministerio de Ambiente, Vivienda y Desarrollo Territorial, 2005).

### **3.6 Metodología de la investigación utilizada para el presente proyecto.**

Para la ejecución del presente trabajo se planteó una metodología mixta, entendiéndose que se usa un método descriptivo junto a un método de construcción cualitativo. Se habla de método cualitativo debido a que se tiene una pregunta a resolver en el marco de la investigación que es formulada al inicio donde la principal intención es poder proponer el método más apropiado para la regeneración de aceites lubricantes usados. En el caso del método descriptivo se evidencia en el momento que se definió el objeto de estudio de la investigación el cual se va estudiando y demostrando a lo largo del proyecto, como lo indica (Caballero, 2000), el cual está implícito desde el momento que se definió el objeto de estudio de la investigación que radica en la propuesta de una planta de tratamiento de aceites lubricantes usados para la aviación del Ejército Nacional, apoyándose en normas sobre el manejo de residuos de aceites lubricantes que se comprueban mediante la realización del diseño y simulación de la planta propuesta.

### Ilustración 5 Metodología de Desarrollo del Proyecto.



Fuente: Elaboración propia.

#### Fase I.

La búsqueda por los diferentes sitios educativos virtuales de artículos, revistas científicas permitió establecer los diferentes tipos de procesos que se utilizan para la regeneración de aceites lubricantes usados de acuerdo con unos criterios que se expondrán en el siguiente capítulo tales como eficiencias, características de uso, incidencia con el medio ambiente y calidad de los regenerados obtenidos en cada uno de los procesos.

Se evalúa cada uno de los documentos, para concluir que el método más efectivo para la extracción de impurezas y regeneración eficaz de los lubricantes es aquel en el que se utiliza el propano como elemento principal, así mismo en

trabajos consultados se evalúa su buen comportamiento e impacto positivo con el medio ambiente.

## **Fase II.**

La revisión de material de apoyo en la FASE I, sirvió como soporte para el diseño de la propuesta de planta de tratamiento a través del programa LabView. De igual manera la propuesta de la planta se enfoca en la auto sostenibilidad de la misma y su aporte al Ejército, por lo cual se decidió incluir dentro del diseño de la planta la parte de un oxidador térmico, que tiene como objetivo eliminar por completo cualquier tipo de liberación de partículas contaminantes al medio ambiente, y que, posiblemente se generarían por la misma ejecución de cada una de las etapas de la planta de tratamiento. De igual manera se ejecuta el diseño de la planta de tratamiento en el software LabView para que se pueda observar el posible funcionamiento dinámico de la misma mediante una representación en un entorno de simulación.

## **Fase III.**

Para esta fase se ejecutó un análisis y verificación de cada uno de los componentes que se requieren para llevar a cabo la construcción de la planta de tratamiento. Además, se realiza un comparativo de la relación entre el proceso de compra de aceites lubricantes contra el aporte que se generará con la implementación y puesta en marcha de una planta de tratamiento para estos aceites lubricantes usados en el marco de su viabilidad económica, ambiental y tecnológica.

De igual manera se realiza una profundización en el tema de catalizadores para determinar su aporte al proceso de la planta de tratamiento a partir de los resultados obtenidos del proyecto macro de la ESAVE de donde nació el presente trabajo, contando con el aporte y la experiencia del grupo de investigación de C y T de la escuela , quienes aportaron estos resultados obtenidos, los cuales, mediante su caracterización de viabilidad y aplicación de estos catalizadores ácidos, se determinó su índice de acidez modificada, además, se analizaron algunas propiedades fisicoquímicas para la determinación del empleo en el tratamiento de lubricantes usados. Se ilustra, mediante, difracción de Rayos X- (DRX), las principales características estructurales de los materiales. De otro lado se exponen resultados de evaluación de su potencial ácido mediante TPD de Amoniacó. Se considero a partir de la información analizada de los diferentes métodos de tratamiento actuales, la pertinencia del uso de los catalizadores ácidos obtenidos para el reciclaje de aceites lubricantes usados.

## **CAPÍTULO 4**

### **Resultados y análisis.**

#### **4.1 Evaluación de los procesos de regeneración de aceites lubricantes usados mediante la revisión y comparación bibliográfica.**

En este apartado se expondrán los aspectos importantes y generales de los diferentes métodos que son usados en la actualidad para la regeneración de los

aceites lubricantes usados para así determinar las características de cada método diferenciando las ventajas y desventajas de su implementación y de los cuales se analizó para el presente trabajo, el método más apropiado para contribuir con el desarrollo autosostenible de la aviación del Ejército de Colombia, mediante la implementación de un sistema de tratamiento de Aceites lubricantes usados en la flota de helicópteros UH-60 teniendo en cuenta que es la flota más grande del Ejército.

#### **4.1.1 Método ácido-arcilla.**

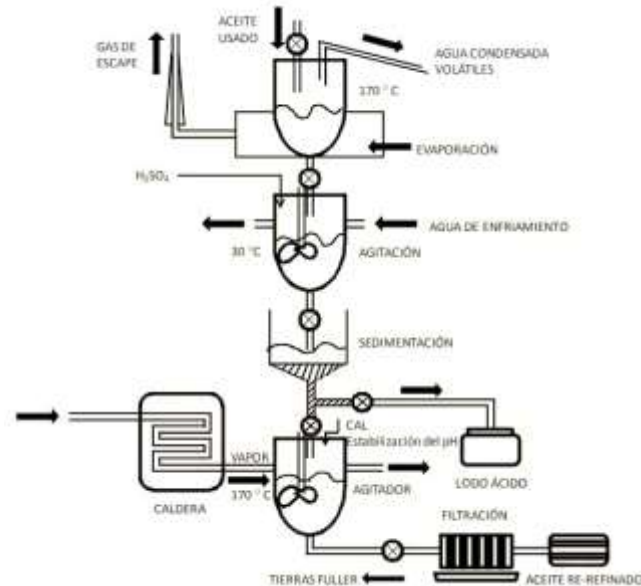
En este método el aceite lubricante usado se hace pasar por un tratamiento con ácido sulfúrico concentrado, el cual reacciona inmediatamente con polímeros, asfaltos, aditivos degradados y demás sustancias que son propias de la degradación del mismo aceite, a partir de esta reacción se forma un residuo tipo lodo que posteriormente se filtra o decanta. Luego se neutraliza el aceite lubricante usado con arcilla activada con ácido sulfúrico ( $H_2SO_4$ ) a alta temperatura con el fin de blanquear el aceite y absorber impurezas que no se lograron remover con el tratamiento del ácido. Finalmente, el aceite es filtrado para extraer las partículas sólidas junto con la arcilla. (Jones, 2007).

El proceso se divide en las siguientes fases:

- **Evaporación:** Se calienta el aceite hasta alcanzar los  $100^{\circ}C$  para evaporar el agua que tenga presente y algunos compuestos orgánicos como la gasolina. (Moya, 2010).

- **Agitación:** Al alcanzar los 170°C de temperatura se pone a enfriar el aceite hasta los 30-40°C para poder agregar una relación del 10% de ácido sulfúrico con respecto a la cantidad de aceite. Se pone en agitación la mezcla de ácido-aceite durante 3 o 4 horas con el fin de conseguir que el ácido reaccione con las impurezas y así conseguir sulfatos (Moya, 2010).
- **Sedimentación:** Se procede a dejar la mezcla de ácido-aceite en un decantador por lo menos por 24 horas para lograr decantar y purgar los sedimentos insolubles. (Moya, 2010).
- **Estabilización del pH:** Se procede a llevar nuevamente la mezcla de ácido-aceite a un agitador donde se le añade cal para reaccionar con el ácido y obtener un pH de 7, esta reacción tiene una duración de 2-4 horas y se realiza con una temperatura de 170°C. (Moya, 2010).
- **Filtración:** Para finalizar con el tratamiento con cal se procede a filtrar el efluente mediante tierras Fuller o diatomácea con el fin de retener las impurezas y los productos de degradación del aceite y así purificar el aceite. Valorando este proceso desde un punto de vista ambiental, vemos que en dicho proceso existen dos puntos clave de generación de nuevos residuos de complicada gestión: lodo ácido por el tratamiento con ácido sulfúrico y arcillas contaminadas con impurezas (tierras Fuller). Además, podemos intuir la generación de emisiones atmosféricas por la presencia del ácido sulfúrico. (Moya, 2010).

### Ilustración 6 Planta de Tratamiento.



Fuente: Tomado de (Chuqui & Romero, 2017).

#### 4.1.2 Extracción por solvente.

Este método de recuperación de aceites lubricantes usados se caracteriza porque es eficiente y es uno de los más económicos. Este método es comparado con relación al método de ácido-arcilla ya que a pesar de que genera un lodo, este no es tóxico sino que es un lodo orgánico útil. Con este método se logra remover alrededor de un 10-14% del aceite usado como contaminante, lo que hace referencia a los aditivos e impurezas presentes en el aceite. Este método tiene como etapa inicial un proceso de sedimentación con el cual se logra sedimentar las partículas más grandes para así poder adicionar un solvente que se encarga de retener los aditivos e impurezas orgánicas presentes en los aceites lubricantes usados. (Cuervo & Valdiri, 2019).

El método de extracción por solvente inicia con una sedimentación de por lo menos 3 días durante los cuales se garantiza que las partículas más grandes se separe, después se adiciona el solvente en cantidades adecuadas con la relación de aceite lubricante usado que se está tratando, luego se procede a agitar la mezcla y se deja sedimentar por un día más aproximadamente y las impurezas se separan por gravedad, posteriormente se lavan los lodos con ayuda de otro solvente lo cual remueve el 95% de aceite presente en estos lodos recuperándolo al igual que el solvente por destilación para su posterior reciclaje. (Hernández & Maldonado, 2020).

**Ilustración 7** Planta por Solvente.



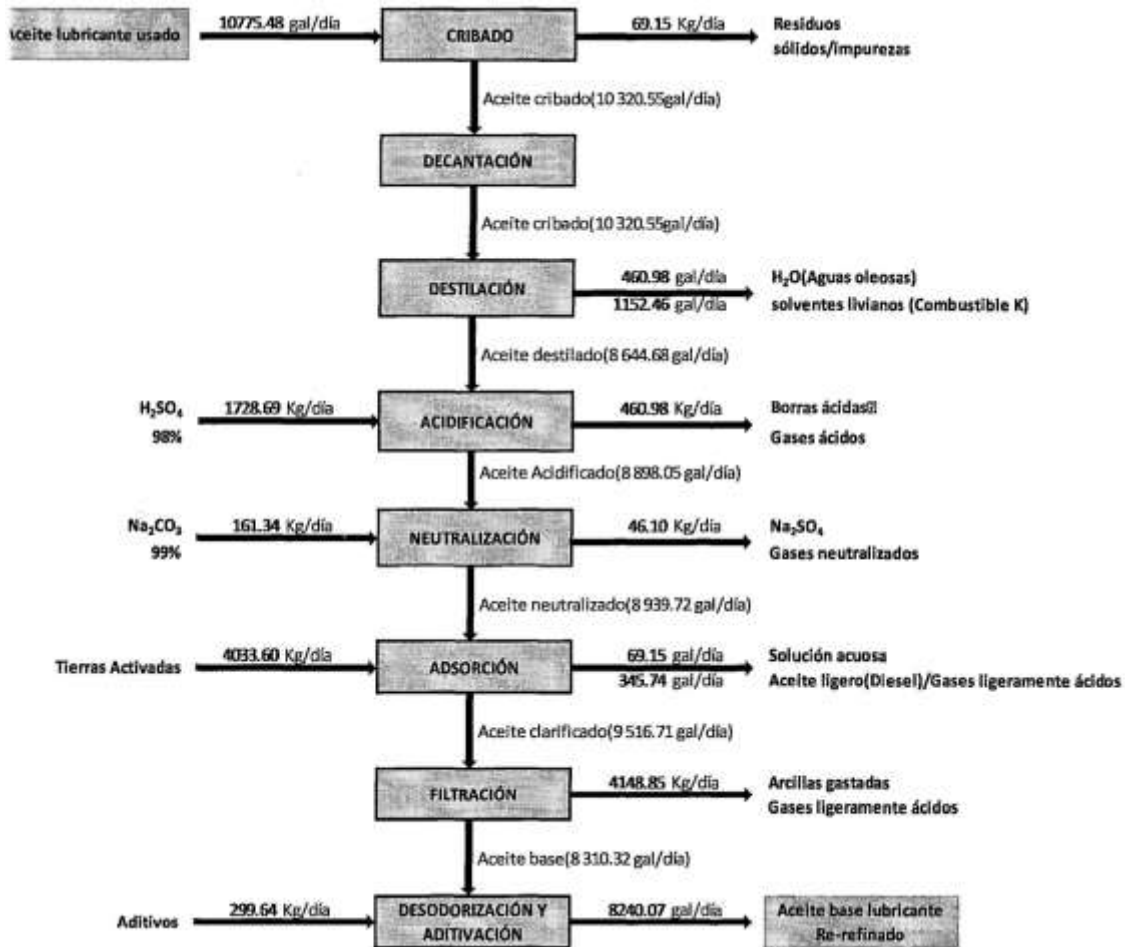
Fuente: tomado de (Hernández & Maldonado, 2020).

#### **4.1.3 Método de Re-refinado del aceite.**

En este método el aceite se somete a un proceso de pretratamiento en el cual se eliminan contaminantes presentes en el aceite lubricante usado, como el agua, lodos, partículas e hidrocarburos ligeros. Después el aceite pasa a unas tolvas para acelerar el proceso de decantación del agua elevando la temperatura cerca de los 50°C por un tiempo de 48 horas. Posteriormente se calienta el aceite para destilarlo y lograr separar los residuos, mediante una evaporación controlada se separa cada producto, los vapores se condensan fuera de las columnas de destilación logrando obtener un aceite en estado líquido. El aceite que no ha sido destilado se conecta a una bomba de vacío para disminuir la presión interna del circuito hasta 70 mm de Hg, se destilan los aceites bases a menor temperatura para obtener un producto con pequeña cantidad de aditivos que luego serán tratados y eliminados. (Chuqui & Romero, 2017).

Finalmente, el producto que se obtiene es un aceite base libre de contaminantes, pero sin la coloración adecuada, entonces este producto es sometido a un tratamiento con ácido sulfúrico, cal y arcillas para eliminar todas las impurezas y aromas, así obteniendo un aceite base con color óptimo. Este producto es enviado a un proceso de filtración para eliminar la cal y arcillas que se utilizaron en el proceso anterior (Chuqui & Romero, 2017).

Ilustración 8 Diagrama planta.



Fuente: tomado de (Sánchez, 2014).

#### 4.1.4 Proceso meinken.

Este método consiste en pasar el aceite lubricante usado por una deshidratación y posterior eliminación de los componentes volátiles presentes. Después se usa un proceso de termo cracking en el cual se eliminan los contaminantes mediante una fase de destilación. El producto que resulta de este proceso se trata con ácido sulfúrico, esta mezcla de aceite ácido pasa por un proceso donde se elimina el gas

oíl, se filtra y se neutraliza. Este método de regeneración tiene un rendimiento del 70%, de este método se obtiene un producto secundario que es el gas oíl, el cual se usa como combustible; pero a pesar de todo esto el proceso meinken es uno de los más costosos del mercado (Morán, 2015).

El proceso meinken se divide en las siguientes etapas:

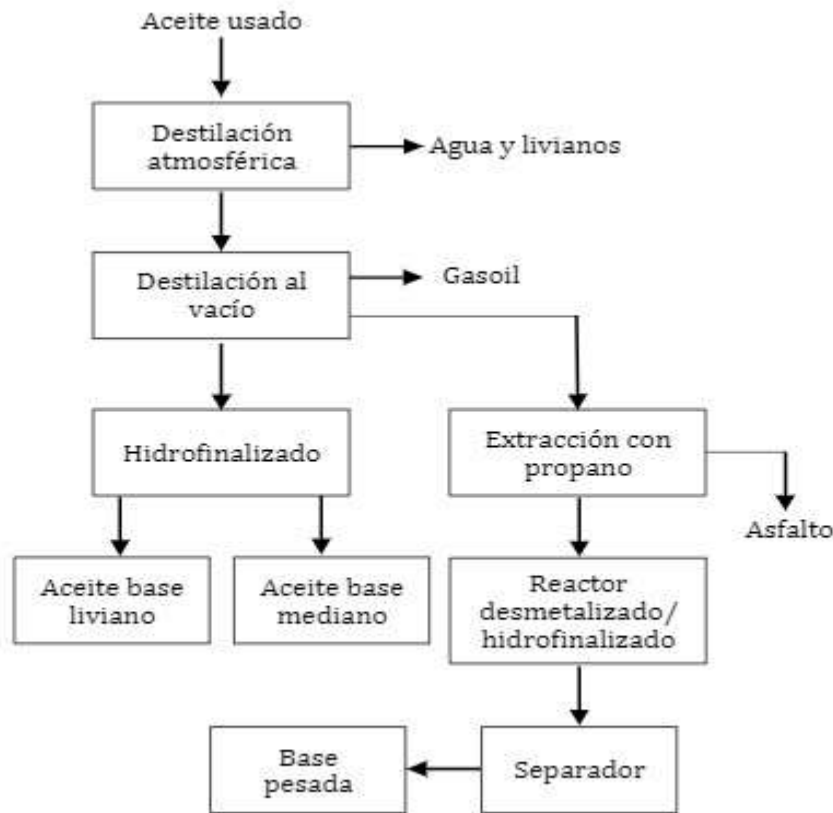
- **Evaporación:** Se calienta hasta los 170°C el aceite lubricante usado, buscando eliminar las partículas de agua, hidrocarburos ligeros y los solventes orgánicos.
- **Tratamiento ácido:** Se procede a enfrían el aceite hasta alcanzar los 30°C y se hace reaccionar con ácido sulfúrico aproximadamente durante un día. Luego, el aceite se mezcla con arcilla y se calienta hasta los 270°C para formar flóculos de aceite y arcilla, que se obtienen de los procesos de oxidación y sulfatación.
- **Filtración y neutralización:** Se pasa el aceite-ácido por un filtro por medio de tierras de Fuller para retener las impurezas presentes en esta mezcla. Se neutraliza con hidróxido de sodio para ya obtener el aceite regenerado (Gutiérrez & Pérez, 2019).

#### **4.1.5 Proceso selecto propano-hidroterminado.**

Este método tiene como finalidad la producción de bases lubricantes de alta calidad, a diferencia del método de propano ácido-arcilla se logra sin dejar desechos. El aceite lubricante usado se pasa por la unidad de pretratamiento en

donde se elimina el agua presente y los hidrocarburos ligeros, después es bombeado a la unidad de selecto propano donde se preparan los destilados con propiedades lubricantes y queda un residuo de hidrocarburos pesados, los cuales se pueden usar como combustible. (Suntaxi & Trujillo, 2009).

Los destilados que se obtienen de la fase anterior pasan a una unidad de hidrotreatmento, donde se hidrogenan las bases que están siendo tratadas. Las bases ya hidrogenadas se destilan, posteriormente se filtran y almacenan. Finalmente, mediante este método se obtienen tres tipos de bases que son de tipo spindle oil, neutral y bright-stock las cuales presentan una relación en peso del 83.2% con relación a la carga inicial, también se obtiene un 6% de gas oil, un 1.5% de gas combustible y por último un 5% de combustible pesado. (Suntaxi & Trujillo, 2009).

**Ilustración 9** Diagrama de Flujo de la planta.

Fuente: Tomado de Freire et, al (2020).

#### 4.1.6 Proceso con arcilla.

Este método de regeneración de aceites lubricantes usados se desarrolló con la intención de darle una mejora al método de ácido-arcilla, este método evita la destilación que genera altos costos y también elimina el uso de disolventes para no generar repercusiones con el medio ambiente. El proceso con arcilla se enfoca en un reactor en el cual se mezclan los aceites lubricantes usados a tratar con una mezcla de arcillas, la cual se lleva a una temperatura de 80°C a 200°C con el fin de no provocar alta presencia de cracking de los aceites lubricantes de la mezcla que se origina a partir de las altas temperaturas. La mezcla de arcilla-aceite se mantiene

dentro del reactor con agitación para favorecer la transferencia de impurezas, especialmente los metales pesados. Después de salir del reactor, la mezcla de arcilla-aceite se envía a una centrífuga para eliminar la mayor cantidad de arcilla que está contaminada con hollín, este hollín está formado por partículas finas de carbón y compuestos orgánicos que son generados por los aditivos de los lubricantes que deben ser eliminados antes de la etapa de filtrado porque son capaces de tapar los poros de los filtros o incluso paralizar el proceso de filtrado. A pesar de que se busca tener mayor empatía con el medio ambiente este método sigue generando arcillas contaminadas como también filtros con arcilla contaminada adherida. Aunque existen alternativas para someter a estos residuos a diferentes tratamientos de recuperación, reciclado o disposición en empresas receptoras de residuos peligrosos autorizadas, de igual modo para solventar un problema se genera una nueva gestión de otros residuos. (Moya, 2010).

#### **4.1.7 Proceso de extracción con propano líquido.**

Este método se enfoca principalmente en la extracción de hidrocarburos provenientes del petróleo que están presentes en el aceite lubricante usado mediante el uso de propano líquido, además mediante la separación por decantación de productos que degradan y otros contaminantes. Este método de regeneración de aceites lubricantes usados se desarrolla mediante 3 etapas. (Moya, 2010).

- **Pretratamiento químico:**

Durante esta etapa lo que se busca es preparar el aceite lubricante usado para las etapas de recuperación. En esta etapa se añaden los reactivos y los catalizadores

que se vayan a usar durante el proceso. Es un proceso continuo que se realiza en caliente para lograr la digestión de la mezcla. (Moya, 2010).

- **Extracción con propano líquido y recuperación posterior del disolvente utilizado.**

El aceite lubricante pretratado se calienta a una temperatura óptima y es mezclado con el propano líquido, el cual es el disolvente de extracción. Todas las bases lubricantes son solubles en el propano líquido, a diferencia de las impurezas y productos no deseados. La mezcla del propano-aceite se envía a un decantador vertical en donde se separa el agua emulsionada presente en el aceite lubricante usado, también se separan los componentes asfálticos que se originan con la degradación y oxidación de los aditivos que contienen los aceites lubricantes. Posteriormente la mezcla de aceite-propano pasa a un decantador horizontal en el cual se eliminan los posibles arrastres de contaminantes que no se lograron eliminar en el decantador vertical. Después de ser decantado 2 veces la mezcla de aceite propano se hace pasar por unos calentadores donde se incrementa la temperatura para producir una evaporación del propano en una columna diseñada para dicha finalidad. El propano que acaba de ser destilado se enfría para luego ser comprimido y almacenado en un tanque de alimentación creando un ciclo de recuperación del propano usado en esta etapa. (Moya, 2010).

- **Destilaciones atmosféricas y a vacío.**

En esta etapa el aceite ya se encuentra libre de propano y a temperatura adecuada, donde pasa a una columna de destilación a presión atmosférica para

eliminar los hidrocarburos ligeros como la nafta que ha sido añadida al aceite lubricante como un contaminante en los cárteres de los motores durante su funcionamiento. Ya en este momento el aceite se encuentra libre de contaminantes y se prosigue a calentarlo a una temperatura de destilación y se pasa a una columna de fraccionamiento al vacío donde ya se obtienen las bases lubricantes que no necesitan de refinados adicionales. (Moya, 2010).

En la realización de esta disertación se evaluaron diferentes trabajos que aportaron el conocimiento necesario para el desarrollo de esta planta de tratamiento, es así que académicos en México, España, Argentina, Ecuador, Chile y Colombia entre otros dieron luces y establecieron condiciones que se tomaron en cuenta en este documento, se evaluaron y luego se adaptaron a las necesidades de la aviación de estado.

Durante el recorrido por las diferentes tesis y sitios especializados en internet, se evidenció que, si bien es cierto que existe el interés de muchas naciones y personas por poner en práctica este tipo de tecnología, son pocos los estudios realizados tendientes a materializar este tipo de plantas en el sector aeronáutico.

Por tal razón y aunando esfuerzos con el Ejército Nacional de Colombia, se estableció la necesidad de implementar un tipo de planta para la regeneración de lubricantes usados en la aviación de la fuerza, con el fin de:

- Mitigar los desperdicios generados por dichas aeronaves con el fin de aportar al medio ambiente y evitar los derrames de lubricantes.

- Convertir al Ejército Nacional de Colombia en la primera fuerza de estado en ser autosostenible y autosustentable en el uso y regeneración de lubricantes utilizados en aviación.
- Según información suministrada por Autoridades Ambientales Colombianas, en el país funcionan alrededor de 18 gestores receptores bajo licencias ambientales que se encargan de recolectar, transportar y aprovechar los aceites usados en Colombia y que se encuentran principalmente en Antioquia, Atlántico, Bolívar, Cundinamarca, Risaralda y Valle del Cauca, desde donde prestan sus servicios a otros departamentos. Sin embargo, se logra evidenciar que estas compañías solo tienen en cuenta los aceites usados del sector industrial, de proceso y automotriz, olvidando el aceite usado que se genera en el sector aeronáutico (Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible, 2014).

Según la consulta bibliográfica se evidenció que en el Ejército Nacional de Colombia no se maneja una planta para el tratamiento de lubricantes usados en la aviación simplemente se logró identificar que se realiza un proceso de recolección y disposición final de estos desechos, por lo cual se evidencia la pertinencia de desarrollar una planta para realizar dicho proceso en Colombia para así contribuir con la conservación del medio ambiente y lograr un incremento en el desarrollo autosostenible del Ejército Nacional de Colombia.

- El desarrollo de este proyecto se enfocó en la flota de aeronaves UH-60 del Ejército Nacional de Colombia debido a que es la flota más grande que posee, no obstante, cabe mencionar que la planta puede realizar este proceso para diferentes tipos de

aceites utilizados en las diferentes flotas de aeronaves y helicópteros aeronaves que posee la fuerza.

De acuerdo con las descripciones expuestas al inicio del capítulo 4 frente a los diversos métodos de tratamiento actuales y pertinentes para esta investigación, en la tabla 6 se muestra una matriz con características, ventajas y desventajas relevantes que se deducen de acuerdo a cada una de las investigaciones expuestas anteriormente; de igual manera se indica el porcentaje de la eficiencia que se genera con cada proceso de la relación del aceite lubricante usado contra el aceite lubricante que se logra regenerar con la implementación de cada uno de los métodos, se realizó esta comparación a partir de los 5 métodos que se consideraron eran los que mayor aporte le podrían aportar al desarrollo de este modelo de planta de tratamiento, en la cual se exponen sus características más relevantes, así como también se evaluó la casilla de costos del 1 a 5, siendo 1 el método más costoso en cuestión de operación y ejecución.

**Tabla 6** Comparación métodos.

<b>Proceso</b>	<b>Eficiencia</b>	<b>Ventajas</b>	<b>Impacto medioambiental</b>	<b>Costos</b>	<b>Desventajas</b>
Proceso selecto propano-hidroterminado.	85%	Se descarta el proceso de destilación. Generación de bases lubricantes de alta calidad. Elimina la mayoría de los residuos contaminantes.	Emisiones atmosféricas.	1	Implementación torre especial de hidrotatamiento.

Método ácido-arcilla.	70%	Se realiza a temperaturas moderadas.	Generación de lodos ácidos. Generación de emisiones. Arcillas contaminadas.	3	Uso de ácidos concentrados. Proceso lento.
Proceso de extracción con propano líquido.	85%	Proceso versátil. Se realiza en caliente, pero sin producir craqueo. Productos regenerados de alta calidad.	Emisiones atmosféricas. Filtros contaminados.	5	Uso de ácido.
Proceso con arcilla.	70%	Base lubricante de mayor calidad. No produce lodos contaminantes. Mejora del método ácido-arcilla. Elimina fase de destilación que es costosa. No utiliza disolventes contaminantes.	Arcilla contaminada con hollín. Filtros contaminados con arcillas.	4	Proceso a altas temperaturas que alcanza a generar cracking.
Proceso meinken.	75%	Evita uso de disolventes contaminantes.	Generación de arcillas contaminadas. Generación de filtros contaminados.	2	Uso de ácidos. Se realiza a temperaturas elevadas.

Fuente: Elaboración Propia.

De acuerdo con los análisis y las descripciones anteriores frente a los métodos de tratamiento actuales y pertinentes para esta investigación, se determinó que no se maneja una planta para la regeneración de aceites lubricantes usados en aviación, sin embargo, se encontraron desarrollos referentes a los procesos y métodos de reciclaje de aceites en la parte automotriz.

Dentro de la elaboración de este proyecto, parte fundamental fue la evaluación y posterior clasificación para luego escoger que tipo de método es más benéfico para la implementación de la planta de tratamiento por parte del Ejército Nacional de Colombia, es así, que la siguiente tabla 7 muestra los parámetros para dicha elección, la cual se basa en 5 de los métodos más usados para la regeneración de aceites lubricantes usados en donde se comparan entre sí, evaluando factores como lo es la calidad del aceite regenerado contra los aceites lubricantes vírgenes, se evalúa también el costo que generan estos métodos para poder llevar a cabo el proceso de regeneración y finalmente el impacto ambiental que generan cada uno de los procesos, incluyendo tanto el factor de emisiones a la atmosfera como la cantidad y tipo de residuos que se generan en cada una de las etapas de estos métodos.

**Tabla 7** Elección del Proceso de Extracción.

#	Método	Aspectos de análisis				Total
		Calidad del producto	Factor económico	Impacto ambiental	Residuos	
1	Ácido-Arcilla	3	3	2	2	10
2	Re-refinada de aceite	4	3	3	3	13
3	Extracción por disolvente	3	4	3	3	13
4	Hidrotratamiento	4	2	3	3	12
5	Extracción por propano líquido	5	5	4	4	18

Fuente: Tomada de (Chuqui & Romero, 2017).

Cómo se puede evidenciar en la tabla 7; el método de extracción por propano líquido es el que mejor calificación tiene en cuanto a la calidad del aceite regenerado frente a un aceite comercial nuevo, de igual manera en el factor económico sobresale puesto que no requiere de diversos tratamiento o solventes ya que el propano logra purificar en gran medida el aceite usado y teniendo en cuenta que el propano se puede contener en un tanque posteriormente de su utilización para ser reutilizado y la cantidad de este producto que se pierde en cada fase es mínima. También un factor vital del ahorro económico se evidencia con respecto a los métodos que utilizan un tanque de hidrotatamiento, ya que la construcción y mantenimiento de este tipo de tanques es costoso así como también la compra de Hidrogeno eleva sus costos de operación, de igual manera como se evita el uso de la arcilla y otros aditivos altamente contaminantes se elimina la generación excesiva de contaminantes tanto para el suelo como para el medio ambiente, por cada una de estas razones se determinó que el método de extracción por propano líquido es el que más se ajusta con los objetivos de esta investigación ya que logra regenerar el aceite usado con características similares al aceite lubricante nuevo, de igual manera la operación de este método no es tan costosa y elimina varios problemas de residuos y emisiones contaminantes que se evidencian en otros métodos de regeneración; con esto se lograría avanzar en el ámbito autosostenible del Ejército Nacional de Colombia.

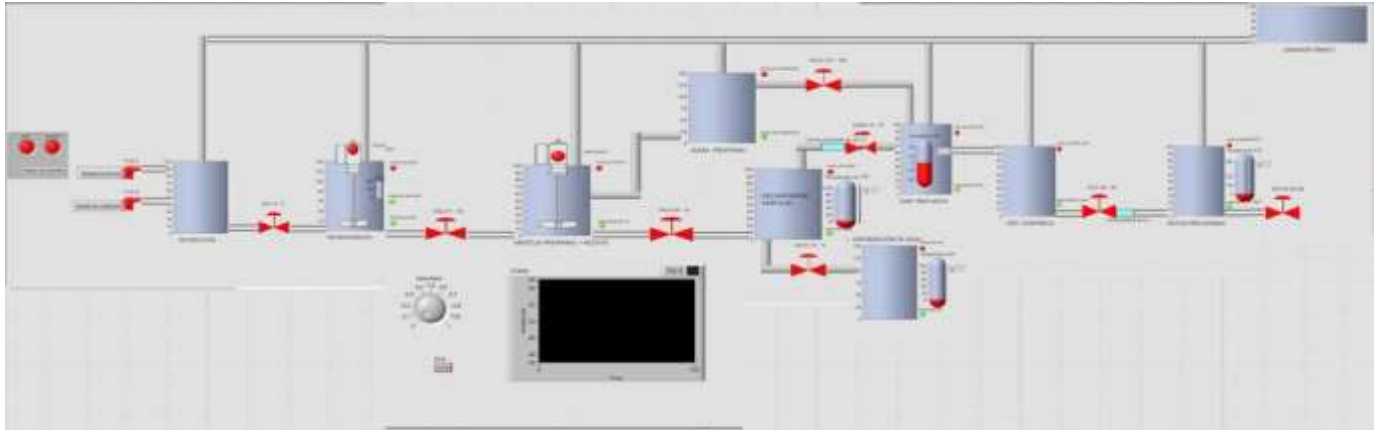
## **4.2 Diseño del plano de la planta de tratamiento propuesta de acuerdo con el método evaluado en la primera fase de investigación.**

La elaboración del plano de la planta de tratamiento indicado en la Figura 1 es una recopilación de diferentes plantas evaluadas y comprobadas en varios procesos.

En esta planta propuesta cuenta con 10 tanques por donde se prevé el lubricante va a ser transportado por tuberías con especificación ASTM a106b, la cual es utilizada para transportar crudo y por ende es especial para dicha labor. Por otro lado, se propone el uso de termómetros en partes especiales de la planta, pues son sitios en donde se debe controlar esta variable con el fin de optimizar el proceso.

Por último, a la salida de la evaporación propano aceite, y tomando en cuenta la investigación de (Castro, 2019), y lo expuesto mediante la revisión bibliográfica sobre los catalizadores utilizados para tratar este tipo de aceites, indica que son los mismos que se usan en hidrocraqueo, reacciones de hidrosulfurización (HDS), hidrogenación (HDN) e hidrosaromatización (HDA) y podría ser viable de estos catalizadores en esta sección.

**Fig. 1** Diseño propuesto de planta de tratamiento de (ALU).



Fuente: Elaboración propia.

### **Descripción general del funcionamiento de la planta de tratamiento de (ALU) propuesta.**

La descripción del proceso de funcionamiento de la planta de tratamiento de regeneración de lubricantes propuesta se estableció en referencia al método de tratamiento evaluado a partir de la revisión bibliográfica y sus estándares de control y funcionamiento por medio del método de propano líquido.

Para esta planta propuesta se debe comenzar con un proceso de acopio bajo los estándares de gestión y seguridad de los lubricantes residuales obtenidos de los helicópteros UH-60 para posteriormente ser llevados a la planta y ser recolectados en un tanque con capacidad para 15.000 litros como lo indica Chuqui & Romero (2017), estos tanques estarán regidos bajo la norma API 650 la cual emite lineamientos para los tanques utilizados en el tratamiento del crudo, como son la presión y la temperatura, estos no deben ser sometidos a más de 15 Psi (103421 Pa) y 90°C, cabe recalcar que la utilización de este tipo de almacenamiento está

consagrado en el capítulo II del Decreto 0283 de 1990 del ministerio de comercio, Decreto 353 de 1991, y el 1521 de 1998 del Ministerio de Minas y Energía.

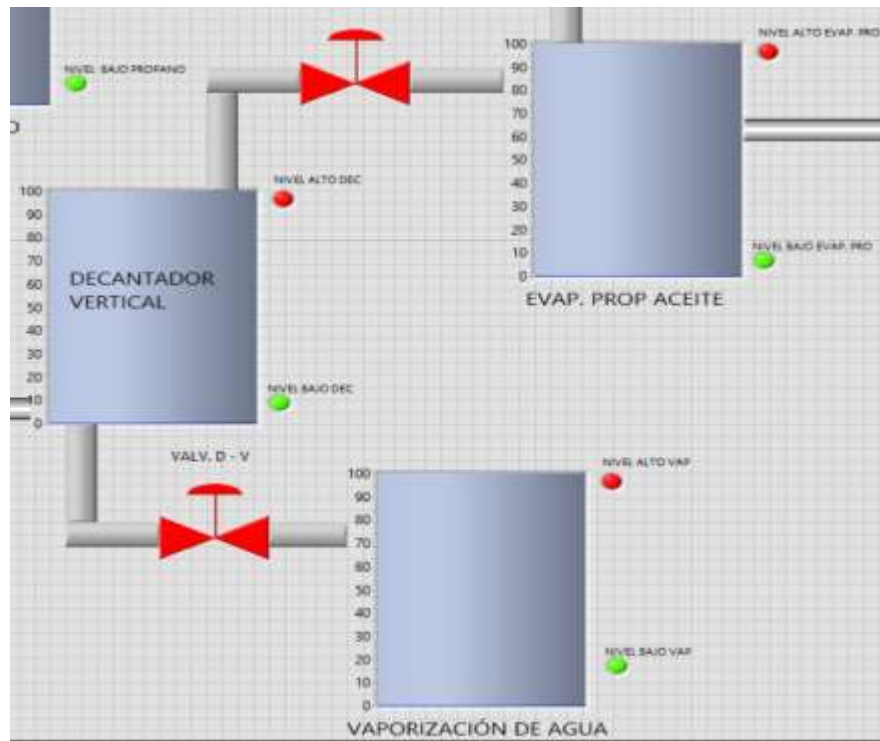
Luego, el lubricante usado es pasado por una tubería de acero inoxidable el cual estará regulado por válvulas que permitirán el bombeo de aceites usados y cuya salida tendrá una trampa de tamaño de celda de  $(15\mu)$  micras, la cual cumple la función de atrapar la suciedad y material solido presente en el lubricante, se debe mantener un flujo constante que garantice la retención efectiva de todas la limallas y residuos de sílice, metales y demás presentes como resultado de la combustión y contaminación.

Luego de someter el fluido a la primera filtración, éste pasa a un contenedor de pretratamiento químico, en donde le serán adicionados KOH (Hidróxido de Potasio) y NaOH (Hidróxido de Sodio), el cual es utilizado con el fin de ajustar el pH, para así obtener reactivos de flotación que pueden ser separados fácilmente, esto con el fin de facilitar una segunda filtración antes de pasar a la mezcla propano-lubricante con el fin de incorporar el aceite más descontaminado y favorecer la obtención de un producto más limpio.

La adición del propano al lubricante obedece a que todos los componentes de las bases son solubles en dicho disolvente, pero las impurezas y productos no deseados no los son, es por esta razón que luego de pasar por este proceso el lubricante se enviará a una serie de tanques donde comenzaremos la separación.

## Separador de fases:

**Fig. 2** Separador de Fases.



Fuente: Elaboración Propia.

Como se puede observar en la Figura 2, la mezcla propano–aceite llega a un tanque separador Trifásico, en la cual se separan tres fases, las cuales son:

La mezcla propano-aceite, los asfaltos y el agua que se encontraba en esta mezcla anteriormente incorporada al proceso, también este proceso es conocido como separador de agua libre, porque su uso principal es separar el agua que podría causar problemas en el aceite, como la corrosión y formación de hidratos de carbono en la mezcla, los cuales son difíciles de descomponer; ya que principalmente están compuestos por carbono, hidrogeno y oxígeno. Una de las principales propiedades del hidrato de carbono es la cristalización, esta se da ya que es soluble en agua, por tal motivo cuando parte de la sacarosa disuelta se

cristaliza, esto forma unos cristales los cuales afectarían al producto durante todo su proceso (Nova Nordisk, 2018).

Cuando se logra todo el proceso anterior en la parte inferior del tanque se encuentran el agua y los asfaltos o hidrocarburos pesados; denominados hidrocarburos pesados porque su densidad o peso específico es superior al de los hidrocarburos ligeros, también se pueden identificar porque su densidad relativa es superior a  $0,933 \text{ gr/cm}^3$ ; estos hidrocarburos pesados se forman principalmente por estar expuestos a las bacterias, el agua o el aire, por tal motivo se encuentran en la parte inferior del separador de fases, la mezcla propano aceite se separa de los demás y se encuentra en la parte superior del tanque ya que su densidad es inferior a la del agua y los asfaltos; después de estos procesos pasan a tanques distintos. (Requena & Rodríguez, 2006).

### **Evaporación mezcla propano-aceite:**

La evaporación es una transición de fase donde la fase líquida cambia a su fase gaseosa en su punto de ebullición, esta evaporación es independiente de la temperatura, pero si depende de la presión atmosférica, por tal motivo la presión del vapor de esta mezcla propano-aceite, debe ser igual a la presión externa para que esta mezcla comience a ebullición. La temperatura a la cual se debe encontrar esta mezcla propano-aceite debe ser de  $-42 \text{ }^\circ\text{C}$ , ya que esta es la temperatura de ebullición del propano, para que así se pueda separar el propano del aceite. (OIT, 2003).

Después del proceso anterior el propano gaseoso pasa a una fase de licuefacción en la cual el gas producido en la separación de los hidrocarburos pesados en la destilación sigue a la caja de enfriamiento para su refrigeración, esta caja fundamentalmente es un intercambiador de calor que funciona como un refrigerador.

El preenfriamiento se produce en intercambiadores de platos, mientras que la licuefacción y subenfriamiento se realiza en intercambiadores en espiral.

Estos son los pasos necesarios para realizar la licuefacción que se sugiere utilizar:

- El gas entra al sistema a través del compresor, donde se le aplica trabajo. Tras el compresor el gas se encuentra comprimido y a temperatura ambiente.
- El gas pasa por un intercambiador de calor donde se enfría.
- El gas frío y comprimido se expande a través de una válvula hasta la presión ambiente, en esta expansión el gas se enfría aún más debido al efecto Joule Thomson (al disminuir la presión, disminuye la temperatura) y pasa a la cámara de licuación, en esta cámara parte del gas entra en estado de líquido saturado y se extrae.
- El gas frío que no ha sido licuado se manda otra vez al intercambiador de calor situado antes de la válvula. El gas que sale del separador sale como vapor saturado, por lo que éste puede estar mucho más frío que el gas que sale del compresor, por lo que se puede utilizar para enfriar la corriente gaseosa que pasa del compresor hacia la válvula de estrangulamiento.

- El gas que se utiliza en el intercambiador después se añade a la corriente que entra al compresor y el ciclo se repite. (Moreno, 2018).

Se estima que en esta sección puede hacerse uso de catalizadores con propiedades ácidas. Estos catalizadores generalmente están compuestos por un soporte amorfo (sílice alúmina o zeolita) y una función metálica NiMo (20-25 %), y deben presentar una alta capacidad tanto hidrogenante como de aperturas de anillo para la formación de naftenos y parafinas. Estas similitudes entre los catalizadores de hidrocrqueo e HDN nos indica que sistemas tipo (NiMo / CoMo/ Sílice-Alúmina y/o Zeolita) son los predominantes, pero que, por sus características y funcionalidad, permite proponer catalizadores basados en minerales de arcilla (como es conocido, las arcillas presentan características ácidas las cuales pueden ser modificadas como se ha logrado en estudios encaminados a la pilarización de arcillas.

### **Vaporización del agua:**

La vaporización del agua es la conversión del líquido a su vapor, en este caso se va a vaporar el agua que obtuvimos en el proceso anterior de separación de fases; la velocidad de la vaporización aumenta a medida que aumenta la temperatura; también esta vaporización depende de factores externos como la humedad, la temperatura, la velocidad del viento y la superficie del líquido; para el caso de la planta propuesta se buscó que estos factores no afecten, ya que este proceso se encuentra cerrado en un tanque, por lo cual solo afectaría la superficie del líquido.

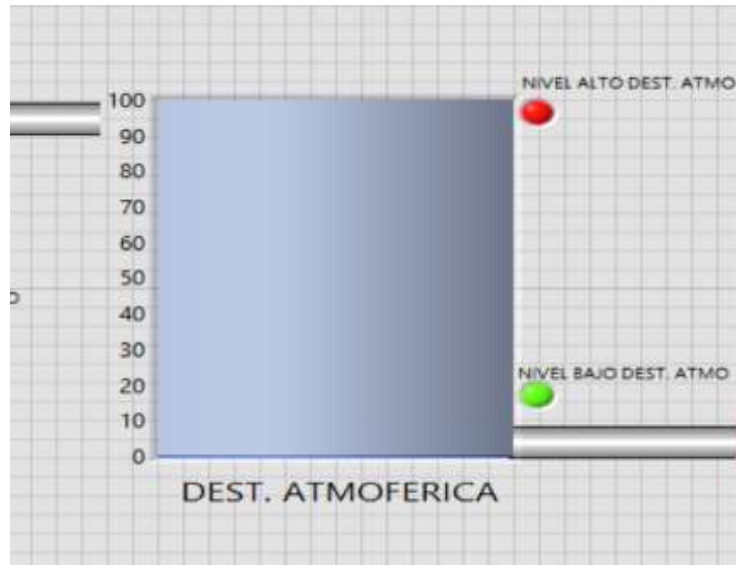
Después de este proceso de vaporización en el tanque, en la parte de arriba sale el agua en su estado gaseoso y en la parte de abajo obtenemos los asfaltos ya separados del agua por medio de este proceso. (UB, 2018).

### **Destilación.**

Después el vapor pasa por un condensador para tomar nuevamente el estado líquido, este líquido que ha sido destilado logra purificarse, pero aun así necesita de otros tratamientos para poder ser reutilizado. Este proceso se realiza para darle un tratamiento térmico al aceite lubricante usado como lo indican Mallqui, J. & Tenazoa, G. (2017). La destilación es un proceso de re-refinación del cual se pueden obtener diferentes resultados como lo es la remoción de sedimentos en fondos, agua, impurezas, hidrocarburos ligeros y para acondicionar las bases lubricantes tratadas. (Hernández et al,2020). La destilación como lo indica la Figura 3, busca separar mediante condensación y vaporización, cada uno de los componentes líquidos y sólidos disueltos en líquidos o los gases que salen licuados en una mezcla, con el fin de aprovechar las diferentes temperaturas de ebullición de los diversos componentes al ser una propiedad intensiva de estas sustancias debido a que no varía con el cambio de masa o volumen. (Trujillo, 2015).

## Destilación atmosférica.

**Fig. 3** Fase Destilación Atmosférica.



Fuente: Elaboración propia.

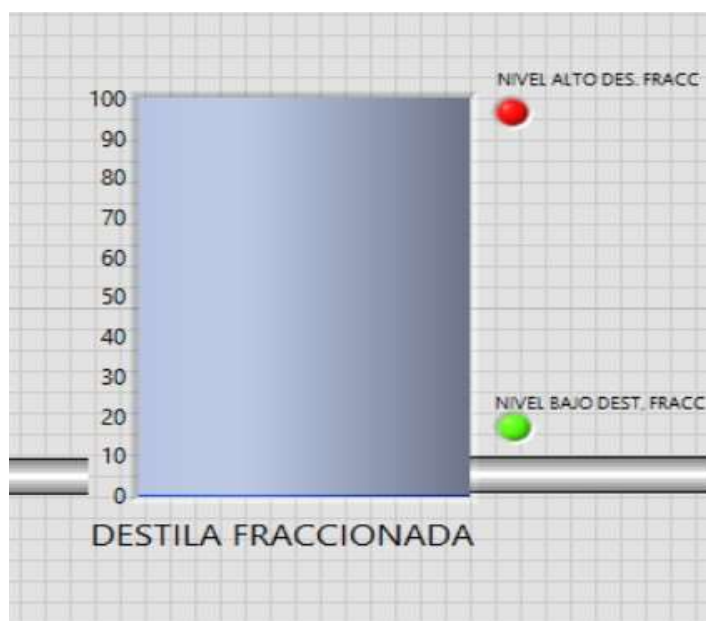
Este tipo de destilación logra eliminar el agua y los hidrocarburos ligeros contenidos en el aceite lubricante usado. (Hernández et al, 2020), la destilación atmosférica también es conocida como destilación primaria en la cual, al calentar la mezcla de diferentes líquidos, se alcanza el punto de ebullición de cada uno de los componentes de la mezcla que se obtiene a diferentes temperaturas, de acuerdo con esto esta mezcla se convierte en vapor lo cual permite que se produzca una separación de forma más sencilla iniciando con los productos ligeros que tienen un punto de ebullición más bajo (Trujillo, 2015).

En la etapa de la destilación atmosférica con el aceite ya libre de propano y a una temperatura adecuada, se pasa a una columna de destilación, donde se eliminan los hidrocarburos ligeros (nafta) que han contaminado al aceite durante su funcionamiento en los motores. En este momento el aceite se encuentra libre de

contaminantes. Se calienta a temperatura de destilación y se hace pasar a una columna de fraccionamiento de alto vacío, donde se obtienen unas bases lubricantes que no precisan de refinado posterior.

### Destilación fraccionada.

**Fig. 4** Fase Destilación Fraccionada.



Fuente: Elaboración propia.

En el caso de los aceites lubricantes para evitar la pérdida de moléculas de hidrocarburos importantes para el fin de la lubricación se debe manejar una destilación al vacío con límite de unos 350°C (Figura 4), esto para lograr disminuir fuertemente la zona de vaporización y dar como resultado unos aceites aptos para fines lubricantes. (Mallqui, J. & Tenazoa, G. 2017).

En el sector automotriz se ha logrado comprobar que con una segunda destilación o destilación fraccionada se recupera desde un 87% aceite

lubricante o Diesel (Aguirre et al, 2010) hasta la obtención de un 90%-95% del aceite lubricante usado (Mallqui, J. & Tenazoa, G. 2017).

En esta etapa de destilación teniendo en cuenta que ya se realizó la destilación atmosférica permite separar de forma sencilla cada una de las fracciones de bases lubricantes obtenidas que poseen características diferentes (Trujillo, 2015).

Con la destilación al vacío lo que se busca es separar las impurezas y productos propios del deterioro y uso que están presentes en los aceites lubricantes usados mediante presiones bajas para lograr llegar a un craqueo térmico y conservar la composición del aceite lubricante (Aguirre, 2010).

Como es el caso de esta investigación el uso de propano para la recuperación de los aceites lubricantes usados hay estudios como el de (Awaja et al, 2006), que han demostrado que la destilación al vacío puede ser aplicada en aceites sin pretratamiento y en aceites que han sido tratados con extracción por solvente.

### **Oxidador térmico.**

**Fig. 5** Oxidador Térmico.



Fuente: Elaboración Propia.

Un oxidador térmico es un dispositivo para el control de la contaminación atmosférica generado en el sector industrial el cual está diseñado para romper los contaminantes peligrosos, compuestos orgánicos volátiles, vapor de agua y demás emisiones contaminantes para la atmósfera a través del aumento de la temperatura sobre los 750°C. (LDX Solutions, 2017).

Entendiendo que la planta propuesta en este trabajo busca lograr la mayor contribución con el medio ambiente, se propone incluir en la planta un oxidador térmico el cual estará conectado con cada una de las etapas y columnas de la planta con el fin de purificar los gases emitidos en cada una y liberar aire puro a la atmósfera.

#### **4. 3 Simulación del proceso de la planta de tratamiento (ALU) mediante el programa de LabView.**

Debido al imprevisto generado en el presente año 2020 por motivos de la pandemia de la enfermedad Covid-19, se estimaba hacer una representación a escala experimental en laboratorio del proceso donde se evidenciará su eficiencia, sin embargo, en la connotación de este trabajo se determinó realizar una simulación del proceso mediante el software de LabView ya que permite simular y visualizar las posibles características del proceso. Una ventaja de esto es que LabView permite mediante la implementación tecnológica desarrollar estas interfaces para demostrar el paso a paso de cada una de las fases de la planta.

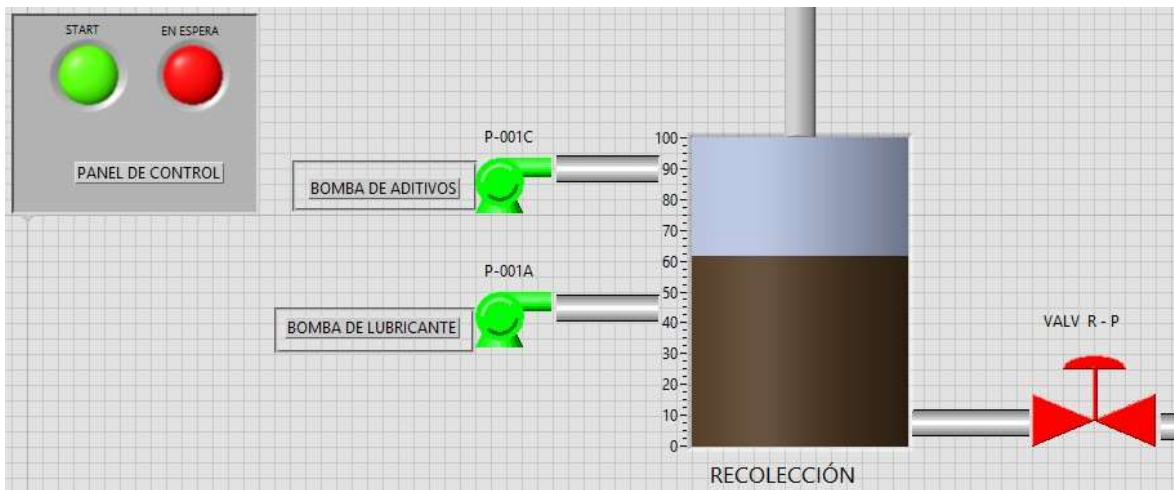
Otro punto importante en la elaboración y en la consecución de los resultados propuestos para este trabajo es la elaboración de la programación que simule el

proceso y muestre cómo sería posiblemente el funcionamiento de la planta de procesamiento en la vida real.

La elaboración de esta simulación fue adelantada en el programa LabView, programa que es trabajado en el Ejército Nacional, y hace parte de la preparación académica en la ingeniería aeronáutica. Es así que a continuación se mostrará a partir de las ilustraciones la parte gráfica y luego se procederá a enseñar la parte de programación.

#### 4.3.1 Parte Gráfica:

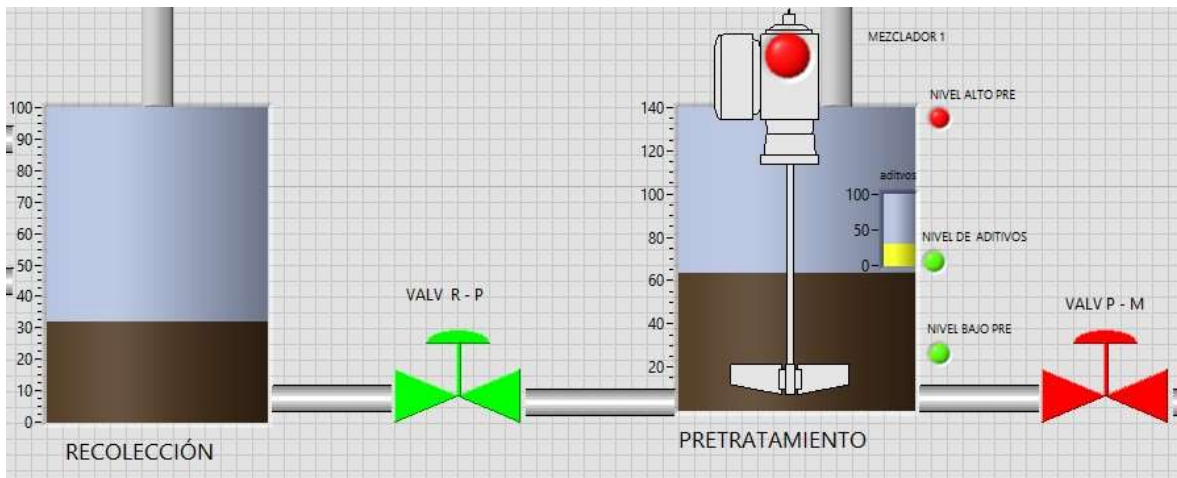
**Fig. 6** Ingreso de Lubricante Usado.



Fuente: Elaboración propia.

En esta primera parte se puede observar un panel de control, el cual es el que va a manejar todo el funcionamiento de la planta de tratamiento Figura 6, este panel de control está conformado por dos luces led, que en el programa se conocen como booleanos, específicamente como “*Round LED*”.

El proceso de la planta de tratamiento iniciaría con la recolección del lubricante usado que fue previamente traído hasta la planta.

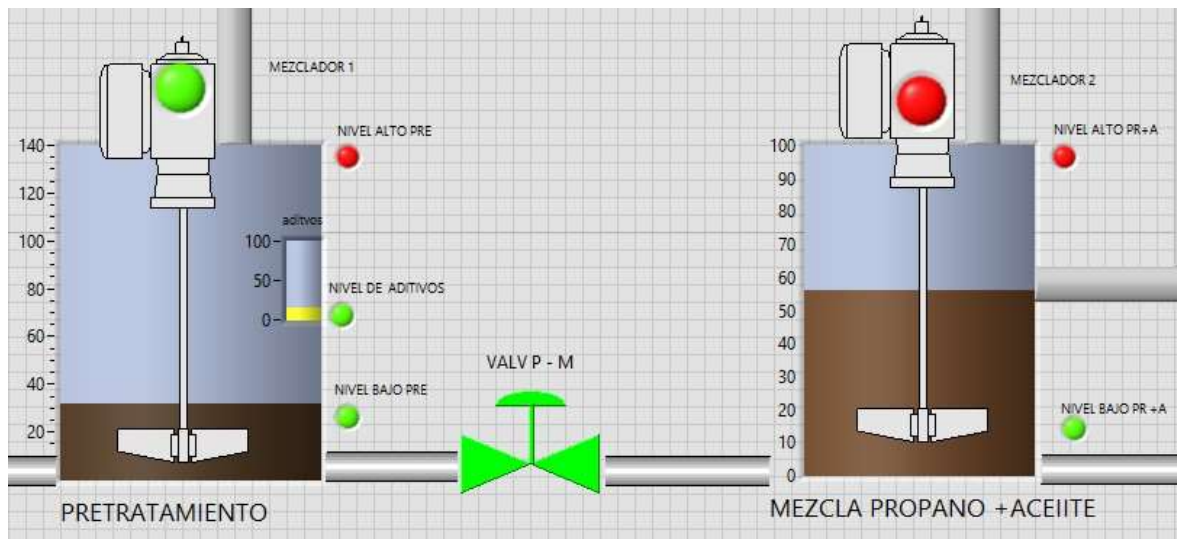
**Fig. 7** Mezcla de Aditivos.

Fuente: Elaboración propia.

Cuando el tanque de la recolección está completamente lleno, pasa el fluido por la válvula denominada R-P, la cual conduce el fluido hasta el tanque del pretratamiento Figura 7, en este tanque se verifican cuanta cantidad de aditivos se añadió a la mezcla inicialmente y posteriormente cuando se termina de vaciar el tanque de la recolección, se procede a la mezcla con la ayuda del mezclador # 1; este proceso lleva un poco más de tiempo, debido a que se tienen que incorporar bien el lubricante y los aditivos.

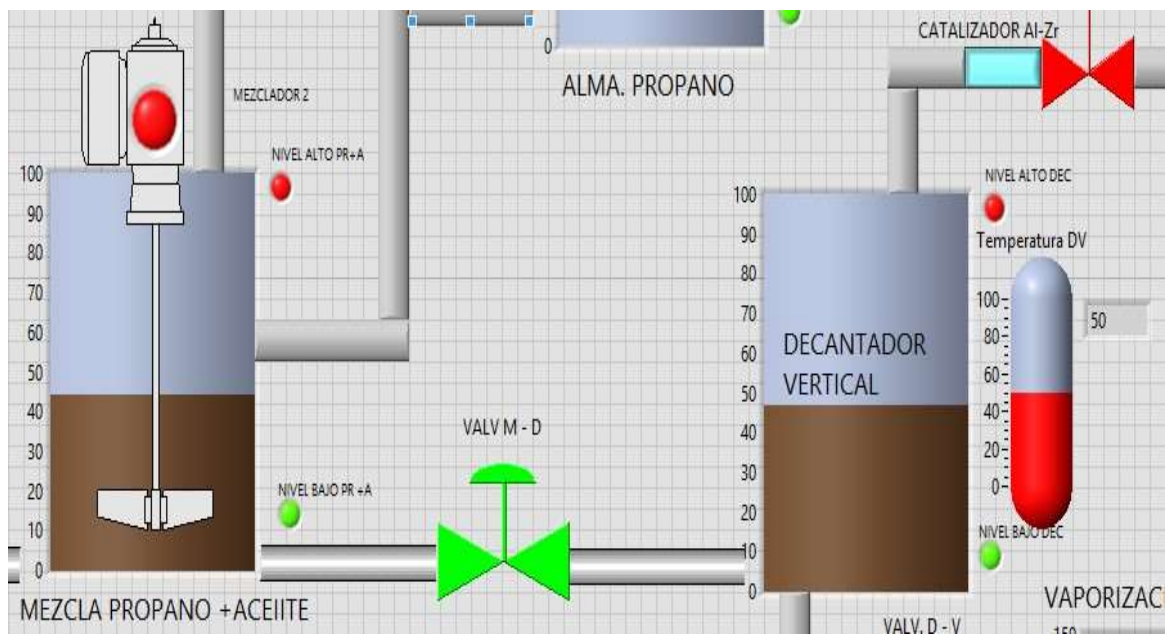
Posteriormente cuando ya se hallan incorporado bien las dos sustancias, se procede a pasar la mezcla al siguiente tanque el cual es el de la mezcla propano-aceite Figura 8; la mezcla pasa por la válvula denominada P-M, llenando así al tanque de dicha mezcla, en este tanque se procede a incorporarle el propano a la mezcla anteriormente realizada con la ayuda del mezclador # 2, en el cual este proceso tomará un poco más de tiempo, ya que es necesario que se mezclen bien todas las partes.

**Fig. 8 Mezcla Propano Aceite.**



Fuente: Elaboración propia.

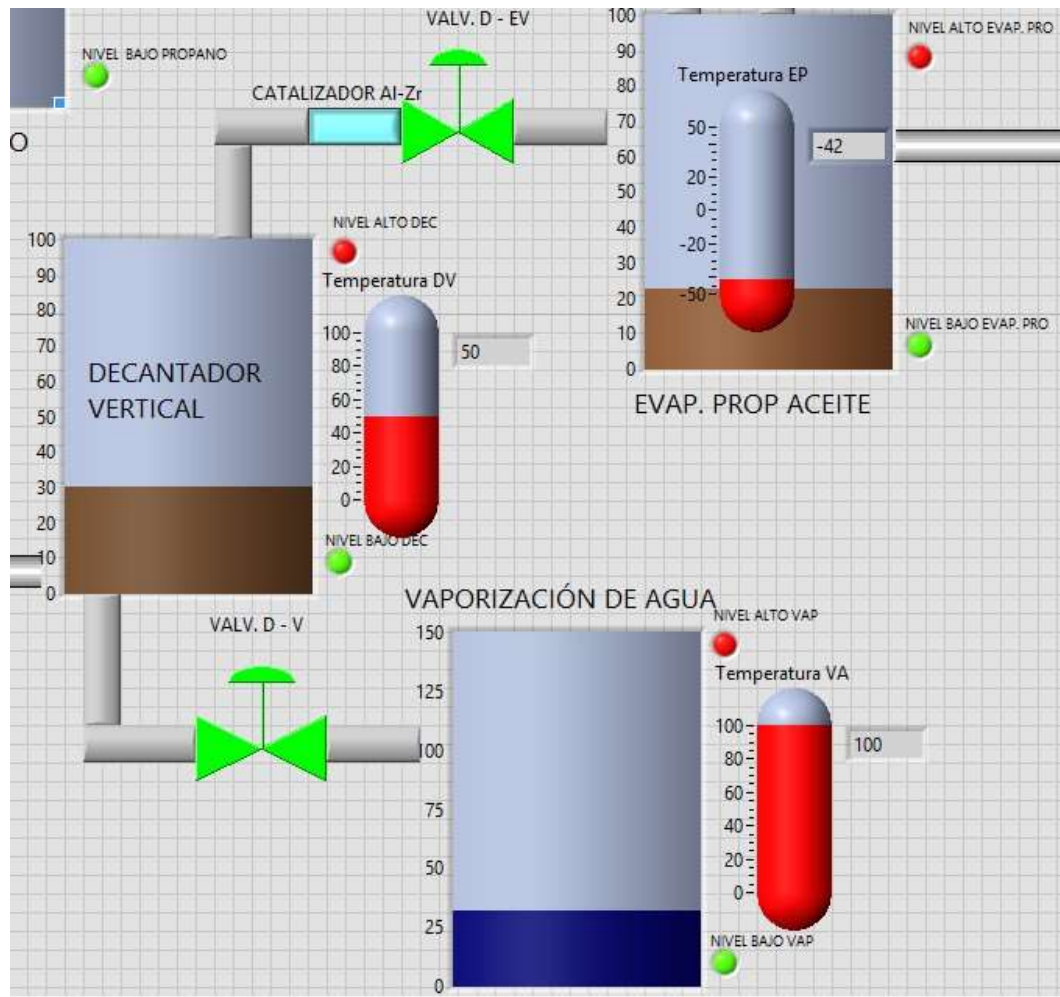
**Fig. 9 Inicio Decantadores.**



Fuente: Elaboración propia.

A continuación, la nueva mezcla, pasara por la válvula denominada M-D, dirigiéndose por la tubería hacia el tanque del decantador vertical Figura. 9, llenándose al mismo tiempo que el tanque de la mezcla de propano aceite se va desocupando.

**Fig. 10** Fase Evaporación y Vaporación.



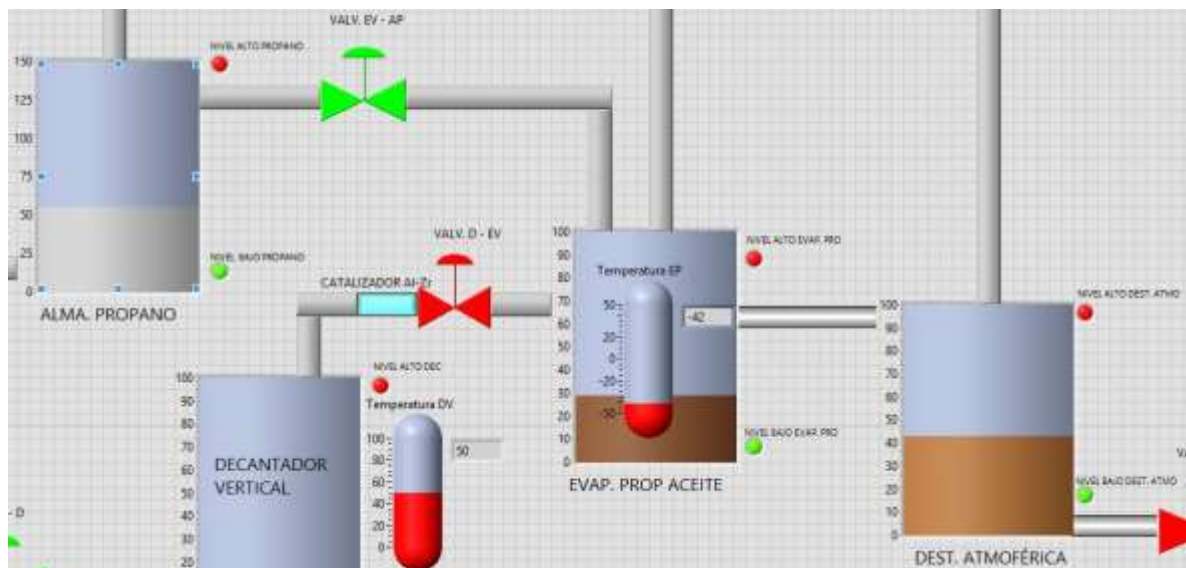
Fuente: Elaboración propia.

Como indica la Figura 10, en esta parte del decantador vertical salen dos productos, uno de estos productos que es el agua y los asfaltos o los hidrocarburos

más pesados, los cuales pasarían por la parte de abajo del tanque del decantador vertical, hacia el tanque de la vaporación de agua, esta primera parte del producto resultante pasaría a través de la válvula denominada D-V, el siguiente producto resultante que es más ligero pasará por la parte de arriba del tanque del decantador vertical, hacia el tanque de la evaporación propano-aceite, por la válvula denominada D-EV.

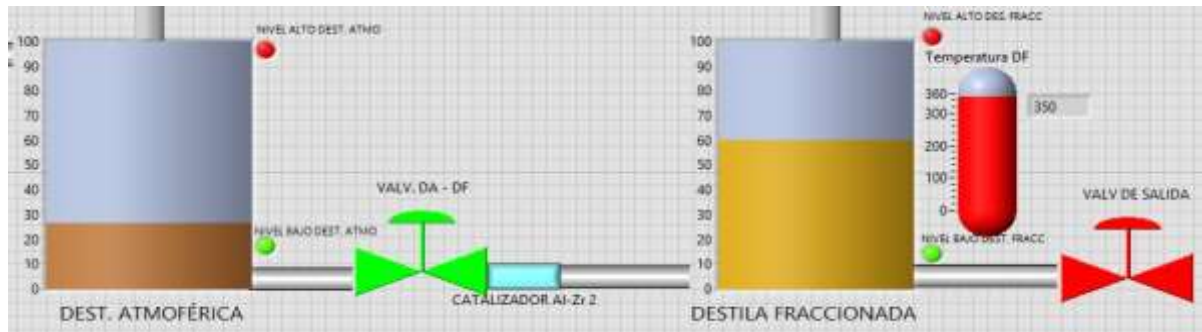
A parte de esto, estos tres tanques llevarían cada uno su termómetro, para así poder controlar las temperaturas internas de cada uno de estos tanques.

**Fig. 11** Destilación.



Fuente: Elaboración propia.

Cuando se llega al proceso del tanque de la evaporación propano-aceite Figura 11, una parte del producto final de este proceso se va a ir hacia el tanque del almacenamiento del propano, específicamente el propano que se separa de la mezcla, el cual pasa por la válvula denominada EV-AP; la otra parte del producto de este proceso pasa hacia el tanque de la destilación atmosférica.

**Fig. 12** Finalización del Proceso.

Fuente: Elaboración propia.

Por último, cuando el proceso del tanque de la destilación atmosférica concluya Figura 12, el producto final de este proceso pasará por la válvula denominada DA-DF hacia el tanque de la destilación fraccionada, obteniendo así ya cuando el proceso del tanque de la destilación fraccionada concluya, los productos finales de todo el proceso de la planta de tratamiento, indicando también la temperatura interna del tanque con un termómetro. Aclarando que cada uno de los tanques cuenta con un indicador de cuando el tanque está lleno o vacío respectivamente, estos son unos booleanos o leds que se encuentran en este programa los cuales indicaran cuando esté lleno el tanque o se encuentre vacío.

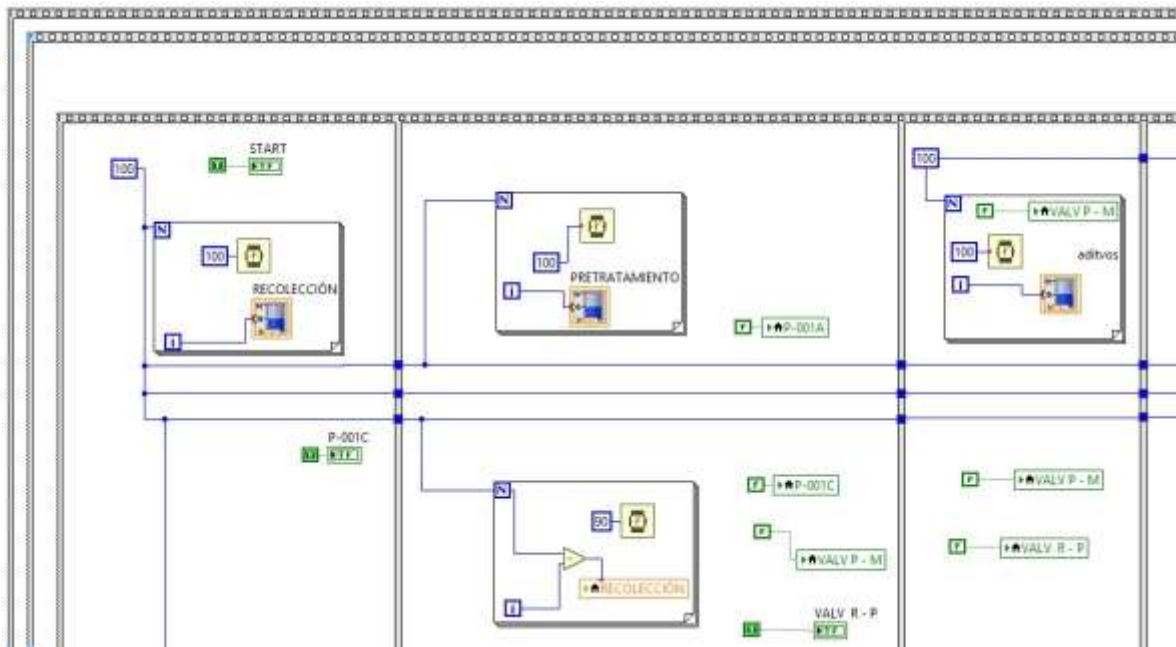
**Fig. 13** Eliminación de Vapores.

Fuente: Elaboración propia.

La Figura 13, indica la acumulación de los vapores resultante de cada uno de los procesos vistos anteriormente, este oxidador térmico se convierte en un valor agregado y un plus que se ha querido brindar teniendo en cuenta, que el proceso de regeneración por propano si bien es cierto que brinda un 80% de lubricantes regenerados, también aporta una cantidad de aguas residuales y unos vapores dañinos, es por esta razón que los autores evaluaron la posibilidad de mitigar aún más los efectos nocivos de dichos procesos y es así que se propone la implementación de un oxidador térmico que purifique los vapores de cada proceso.

#### 4.3.2 Programación utilizada para la simulación por LabView de la Planta de (ALU) propuesta:

Fig. 14 Estructura Fase Inicial.



Fuente: Elaboración propia.

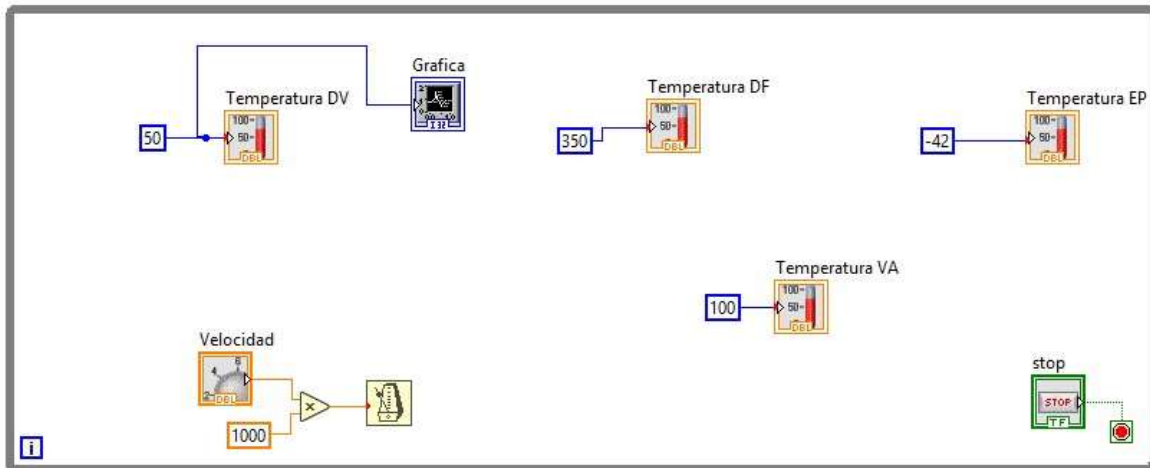
La Figura 14, indica la primera parte de la programación, allí se puede observar que se trabajó principalmente cada uno de los componentes o cada uno de los tanques, con la estructura “*For Loop*”, los cuales están dentro de la estructura “*Flat Sequence*”; la estructura “*For Loop*”, sirve para que se cumplan todas las operaciones que se encuentran en cada uno, en otras palabras, el llenado y el vacío del tanque respectivamente, con la ayuda de las iteraciones que facilita esta estructura para poder utilizarla, por otra parte la estructura “*Flat Sequence*”, ayuda a llevar de forma correcta diferentes secuencias, para que se vayan cumpliendo de izquierda a derecha. También se puede observar que se utilizaron unas variables locales con sus respectivos indicadores los cuales son las válvulas mencionadas anteriormente, cada uno con una con una “*Constant Boolean*”, las cuales deben estar en verdadero o falso respectivamente como se esté utilizando cada una.

También se utilizó un “*Wait Timing*”, para poder controlar la velocidad de llenado y vacío de los tanques.





**Fig. 18** Estructura Termómetros.



Fuente: Elaboración propia.

Por último, la Figura 18, muestra la programación de los termómetros que tienen diversos tanques, la cual está dentro de una estructura “*While Loop*”, la cual ayuda a llevar una secuencia constante de la programación de los termómetros, en esta programación se observan diferentes termómetros con unos “*Numeric Constant*”; también hay un “*Waveform Chart*”, el cual se utilizó para monitorear el cambio en la temperatura de los termómetros, por último, se implementó un “*Knob Numeric*”, que es el que da la posibilidad de ajustar la velocidad de los termómetros, si se quieren ajustar o cambiar la velocidad de cada uno.

#### **4.4 Diagnóstico de la viabilidad sostenible de la planta de tratamiento de (ALU) y sus impactos ambientales.**

No obstante, con la propuesta de este modelo viable de planta de tratamiento para aceites usados en la aviación Ejército, se contribuye con el conjunto de objetivos globales de sostenibilidad para erradicar la pobreza, proteger el planeta y asegurar la prosperidad para todas las naciones que se adoptaron en la

Organización de Naciones Unidas (ONU) como parte de un desarrollo sostenible.

Gámez (2015).

Se determinó que con la elección del método de extracción por propano líquido para regenerar los aceites usados en la aviación del Ejército se contribuye de manera directa con los siguientes objetivos de desarrollo sostenible:

- **Objetivo 6** Agua limpia y saneamiento: Este objetivo al buscar la garantía de disponibilidad de agua, la gestión sostenible y el saneamiento de dicho recurso; con el desarrollo de este proyecto se estaría impidiendo la posible contaminación del agua con posibles derrames o disposición final inadecuada del aceite lubricante usado. Gámez (2015).
- **Objetivo 9** Industria, innovación e infraestructuras: La ONU busca promover el desarrollo industrial de manera sostenible y fomenta la innovación para la creación o aplicación de tecnologías nuevas que faciliten el comercio internacional; con la implementación de la planta se contribuye a la hora de implementar este proceso de regeneración que vuelve a la industria sostenible permitiendo el uso eficiente de los recursos. Gámez (2015).
- **Objetivo 11** Ciudades y comunidades sostenibles: Con este objetivo se busca conseguir que más ciudades, empresas y organizaciones sean inclusivas, seguras, resilientes y sostenibles; a esto mismo se apunta con la implementación de un método de regeneración de aceites lubricantes usados puesto a que a pesar que la industrialización promueve el desarrollo de la economía, también representa gran parte de los responsables de emisiones de carbono y el uso de recursos, con el

método de extracción por propano líquido se logra regenerar aceites lubricantes usados con una mínima emisiones hacia la atmosfera. Gámez (2015).

- **Objetivo 12** Producción y consumo responsables: Se garantiza la implementación de modalidades de consumo y producción sostenibles; como se sabe es un hecho que el consumo y la producción del mundo impulsan de manera amplia y positiva la economía, sin embargo, también es cierto que este progreso es uno de los principales degradantes del medio ambiente y los recursos naturales. Con la implementación de este método de regeneración se busca contribuir al consumo y producción sostenible que consiste en aumentar la eficiencia de los recursos y promover estilos de vida sostenibles. Gámez (2015).
- **Objetivo 13** Acción por el clima: La intención de este objetivo es adoptar medidas para combatir el cambio climático actual, como todos sus efectos sobre la humanidad y el planeta. Teniendo en cuenta el elevado cambio climático que se está presentando en los últimos años, la necesidad de mitigar las emisiones atmosféricas contaminantes crece, con la implementación de la planta se contribuye debido a que se evita que el aceite lubricante en su disposición final sea incinerado o vertido, generando contaminaciones tanto para el agua, suelo y aire, mejor se reaprovecha este componente y se reduce la contaminación que estos presentan al convertirse en residuos. Gámez (2015).

Dentro del análisis expuesto en los apartados anteriores y donde se definió que el proceso por solvente con propano era más viable, tanto económicamente como ambientalmente, se procede a desarrollar una tabla de valores sugeridos para la puesta en marcha de la planta de tratamiento, es así que se deriva la siguiente tabla

8.

**Tabla 8** Costo para la Implementación de la Planta de Tratamiento.

ESTIMACIÓN COSTOS IMPLEMENTACIÓN PLANTA DE TRATAMIENTO		
Equipo	Cantidad/unidad	Costo (COP)
Bombas	1	\$ 11.724.531
Tanques	9	\$ 25.488.652
Extractores	1	\$ 15.546.821
Intercambiadores	1	\$ 18.399.204
Decantadores	1	\$ 5.175.195
Filtro	500	\$ 4.826.565
Mezclador	2	\$ 3.709.200
Coste equipos instalados	-	\$ 405.129.771
Tuberías astm a106b	1.500m	\$ 40.512.969
Instrumentación	-	\$ 20.256.504
Licencia ambiental	1	\$ 150.000.000
Total		\$ 700.769.412

Fuente: Tomada de Ruiz (2019).

Como se puede observar en la tabla anterior, la cual está basada en la tesis de Ruiz (2019) estos valores son un aproximado de los gastos que tendría el Ejército Nacional si pretendiera ponerla en marcha, cabe aclarar que son precios internacionales manejados con la moneda euro y efectuado la conversión a la tasa de cambio actual. se expuso una estimación del presupuesto que se requiere para cada uno de los suministros e implementos necesarios para la ejecución y puesta en marcha de la planta de tratamiento al igual que la solicitud y expedición de la licencia ambiental necesaria para el permiso de operación debido a que se van a tratar los aceites lubricantes usados que son considerados como un desecho toxico., el costo total que el Ejército Nacional de Colombia debe invertir para implementar

la planta de tratamiento es de Setecientos Millones Setecientos Sesenta y Nueve mil Cuatrocientos Doce pesos M/cte. (\$ 700.769.412 COP).

Para determinar la viabilidad de este proyecto, es necesario acudir a términos económicas que explicaran si es eficiente este tipo de proyecto, es así que se ahondaran en términos como inversiones fijas, inversiones diferidas, capital de trabajo, entre otros que se explicaran a continuación:

- Inversiones Fijas:

Son todas aquellas adquisiciones de activos fijos, como, lo son edificios, vehículos entre otros cuya vida útil es superior a un año.

- Inversiones Diferidas:

Estos gastos son todos aquellos que son causados en la etapa preoperativa de la compañía, en este caso la etapa mediante la cual el ejército nacional, a través de la escuela de aviación del ejército comienza a invertir recursos en la puesta en marcha de la planta de tratamiento.

- Capital de Trabajo:

Es el recurso que se destina para garantizar el dinero necesario para la operación de la empresa.

Para el caso de la escuela de aviación del ejército, y la puesta en marcha de la planta de tratamiento, las inversiones fijas se mostrarán en la siguiente tabla 9.

**Tabla 9** Inversiones Fijas

Equipo	Cantidad/unidad	Costo (COP)
Bombas	1	\$ 11.724.531
Tanques	9	\$ 25.488.652

Extractores	1	\$ 15.546.821
Intercambiadores	1	\$ 18.399.204
Decantadores	1	\$ 5.175.195
Filtro	500	\$ 4.826.565
Mezclador	2	\$ 3.709.200
Tuberías astm a106b	1.500m	\$ 40.512.969
Instrumentación	-	\$ 20.256.504
Total		\$ 145.639.641

Fuente: Tomado de Ruiz (2019)

Y para entender mejor las inversiones diferidas, estas se muestran a continuación en la siguiente tabla 10.

**Tabla 10** Inversiones Diferidas

Equipo	Cantidad/unidad	Costo (COP)
Coste equipos instalados	-	\$ 405.129.771
Licencia ambiental	1	\$ 150.000.000
Total		\$ 555.129.771

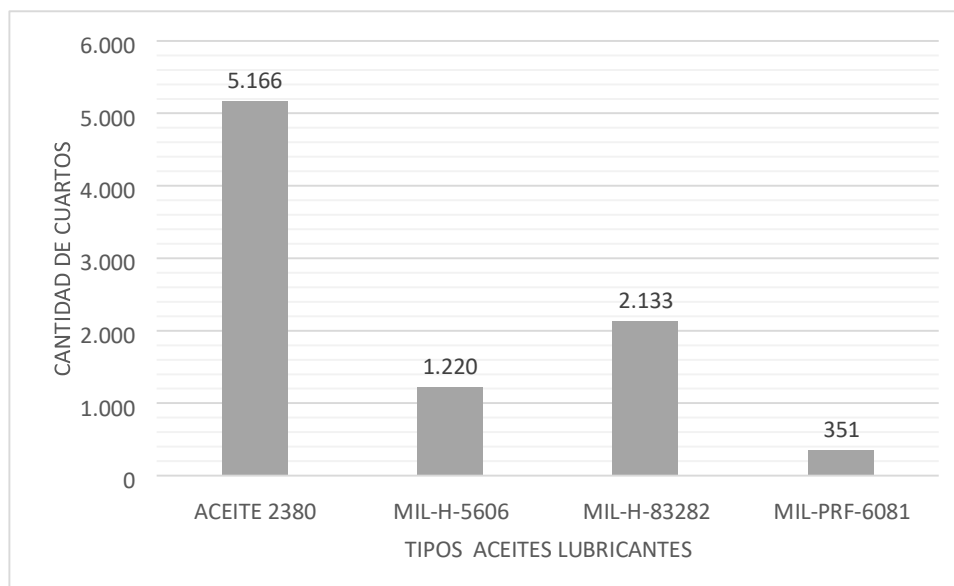
Fuente: Tomado de Ruiz (2019)

Sumando los resultados de las anteriores tablas y tal como se muestra en la tabla 8, la escuela de aviación del ejército necesitaría invertir la suma de Setecientos Millones Setecientos Sesenta y Nueve mil Cuatrocientos Doce pesos M/cte. (\$ 700.769.412 COP) para la puesta en marcha de la planta de tratamiento.

Con lo anteriormente expuesto, se puede inferir que la inversión inicial será la suma arriba mencionada, la cual será casi que recuperada con los primeros \$ 545.970.240,01 los cuales representan la eficiencia que la planta de tratamiento espera tener en la primera regeneración de los lubricantes de las aeronaves.

En las siguientes tablas 11 y 12 se mostrará la pertinencia ambiental y económica además de lo ya expresado anteriormente, en la ilustración 10 se muestra la cantidad de lubricantes que se lograría reutilizar y así evitar que haga una mala disposición de estos.

**Ilustración 10** Consumo lubricantes UH-60 2019.



Fuente: Tomado de (Ejército, 2019).

A partir de la ilustración anterior basada en el informe del Ejército Nacional de Colombia sobre el plan de mantenimiento 2019 de la flota UH-60 y debido a que el tema de gastos económicos y presupuesto de una fuerza como lo es el Ejército Nacional de Colombia, y haciendo claridad de que son temas restringidos, se

determinó que lo más pertinente era realizar una estimación de costos basados en precios comerciales de cada uno los elementos de aceites lubricantes que se gastaron durante el año 2019 en la flota de UH-60 y que se evidencia en la siguiente tabla 11.

**Tabla 11** Estimación costos lubricantes UH-60 2019.

ESTIMACIÓN DE COSTOS 2019				
Elementos	Cantidad	Unidad de Medida	Precio unidad	Gasto total
Aceite 2380	5.166	cuartos	\$ 97.792,21	\$ 505.194.556,86
Mil-h-5606	1.220	cuartos	\$ 33.380,03	\$ 40.723.636,60
Mil-h-83282	2.133	cuartos	\$ 54.123,33	\$ 115.445.062,89
Mil-prf-6081	351	cuartos	\$ 60.112,66	\$ 21.099.543,66
Total				\$ 682.462.800,01

Fuente: Tomado de Ejército (2019), Mercaereo (2018)

Como se puede evidenciar en la tabla anterior el costo estimado que se pudo haber gastado el Ejército Nacional de Colombia durante el año 2019 en la obtención de los aceites lubricantes requeridos por la flota de helicópteros UH-60 es de seiscientos ochenta y dos millones cuatrocientos sesenta y dos mil ochocientos pesos M/cte. (682.462.800,01 COP). Teniendo en cuenta esta información se procedió a realizar una estimación del ahorro que se hubiera logrado en el Ejército Nacional de Colombia si la planta de tratamiento se encontrara en funcionamiento como se puede observar en la siguiente tabla 12.

**Tabla 12** Estimación posible ahorro 2019.

Elementos	Cantidad	Unidad de medida	Precio unidad	Gasto total	Gasto con planta	Ahorro planta (eficiencia 80%)
Aceite 2380	5.166	cuartos	\$ 97.792,21	\$ 505.194.556,86	\$ 101.038.911,37	\$ 404.155.645,49
Mil-h-5606	1.220	cuartos	\$ 33.380,03	\$ 40.723.636,60	\$ 8.144.727,32	\$ 32.578.909,28
Mil-h-83282	2.133	cuartos	\$ 54.123,33	\$ 115.445.062,89	\$ 23.089.012,58	\$ 92.356.050,31
Mil-prf-6081	351	cuartos	\$ 60.112,66	\$ 21.099.543,66	\$ 4.219.908,73	\$ 16.879.634,93
Total				\$ 682.462.800,01	\$ 136.492.560,00	\$ 545.970.240,01

Fuente: Tomado de Ejército (2019), Mercaereo (2018)

Como se explicó en el apartado anterior, la tabla 12 explica el gasto total por consumo de lubricantes en el año 2019 según fuentes del ejército nacional, así mismo en la casilla gasto con planta explica lo que se gastaría en lubricantes si el proyecto fuera una realidad, y en la casilla ahorro planta, se evidencia la diferencia que existe en millones de pesos al reutilizar los lubricantes desechados de las aeronaves.

Por último, se puede determinar que con un posible ahorro de entre quinientos y seiscientos millones de pesos colombianos al año en costos de adquisición de aceites lubricantes con la implementación de la planta de tratamiento, el Ejército Nacional de Colombia solventaría los costos de la puesta en marcha del proyecto que están estimados en Setecientos Millones Setecientos Sesenta y Nueve mil Cuatrocientos Doce pesos M/cte. (700.769.412 COP) con cerca de dos años de

funcionamiento de la planta de tratamiento convirtiéndose en una fuerza que le apunta a la autosostenibilidad y a la preservación del medio ambiente y la salud humana.

#### **4.5 Catalizadores modificados para optimizar el proceso de purificación del modelo de planta propuesto de (ALU).**

##### **Arcillas como catalizadores.**

Los primeros usos de arcillas como catalizadores se evidenciaron en el proceso de craqueo hacia los años 30's. En los años 60's las arcillas fueron reemplazadas por las zeolitas sintéticas debido a que estas últimas, mostraron una mejor actividad y selectividad hacia el craqueo, sin embargo, las PILC's llegaron a ser competitivas con las zeolitas en los años 70's. Pinnavaia et al (1996).

En este sentido, las arcillas se han usado como catalizadores en diferentes procesos químicos, destacándose el uso de estas en las reacciones de (HDA, HDN, HDS) Castro (2019) y Amaya et al, (2020), las cuales son reacciones fundamentales para el mejoramiento de la calidad de los aceites lubricantes.

Sin embargo, uno de los factores críticos para diferentes reacciones es la naturaleza del mineral Amaya et al, (2020). En este contexto, las bentonitas han sido los minerales mayormente estudiados. Una característica muy importante de esta clase de materiales es su facilidad de incrementar el espaciado interplanar  $d_{(001)}$ , haciéndolas susceptibles de modificación por manipulación química en la interlámina. (Castro, 2019).

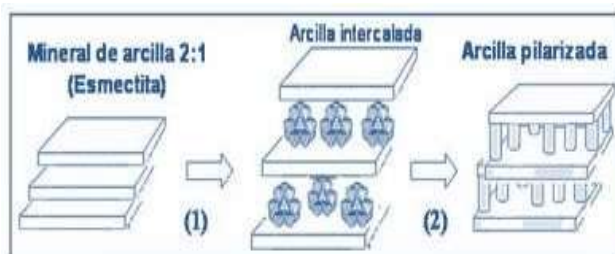
En este sentido, uno de los principales procesos de modificación de los minerales de arcilla es la pilarización, la cual ha surgido como una alternativa viable para prevenir la pérdida de la actividad catalítica del material natural y se caracterizan por un ordenamiento laminar regular tipo cara-cara donde la microporosidad es predominante. El proceso consiste básicamente en la inserción de especies polihidroxocatiónicas en el espaciado interlaminar de la arcilla, vía intercambio catiónico que luego de un proceso de calcinación, se transforman en óxidos estables formando columnas fuertemente ancladas a las láminas Amaya et al, (2020), generando principalmente materiales con mayores características ácidas, que los minerales sin modificar.

#### **4.5.1 Pilarización de arcillas.**

La pilarización de arcillas fue propuesta en los años 50, pero su desarrollo extensivo comenzó a finales de la década del 70. (Bergaya,2006) y se ha optimizado pasando del medio líquido al medio concentrado (Sanabria ,2009). El interés generado por estos materiales ha dado origen a toda un área de investigación fuente de nuevos conocimientos y aplicaciones como se ha evidenciado en los trabajos de Gil et al. (2005), Binitha et al. (2006) y Centi et al. (2008). Este proceso consiste en la introducción mediante intercambio iónico de especies inorgánicas polihidroxocatiónicas en los espacios interlaminares del mineral de arcilla (intercalación), que luego de ser lavado, secado, y calcinado, se convierte en un material pilarizado tal y como se describe la figura 19 (Carriazo,2008). La modificación con pilares mixtos (adición de un segundo metal) tales como Al-Zr se emplea con el objetivo de incrementar la acidez del material

final. Se ha reportado la pilarización exitosa de arcillas con el sistema sencillo Al y los sistemas mixtos Al-Zr, donde su potencial catalítico, fue evaluado en las reacciones de hidroconversión de decano (Castro, 2019).

**Fig. 19** Esquema del proceso de intercalación-pilarización:(1) Intercalación mediante intercambio iónico con los iones kegggin, (2) formación de pilares (nanopartículas de óxido de aluminio) mediante calcinación.



Fuente: Tomado de (Carriazo, 2008).

Por otra parte, cuando el zirconio hace parte de un pilar mixto, promueve no sólo un incremento del carácter ácido del sólido, sino que mejora las propiedades de estabilidad térmica del mismo (Castro,2019).

Permitiendo proponer estos materiales con características acidas en el refinamiento de lubricantes y de diferentes tipos de aceites como n-Decane, n-Heptane, Jatropha oil, Bithumen de Athabasca Squalene (C30) como se ha reportado (Amaya et al, 2020).

## 4.5.2 Etapas desarrolladas.

### 4.5.2.1 Preparación y obtención de catalizadores ácidos.

Los catalizadores bifuncionales expuestos en este trabajo se obtuvieron bajo la asesoría del investigador del grupo C y T y líder del semillero de desarrollo y sostenibilidad ambiental de la ESAVE, M.Sc. Anderson Castro Carreño, experto en el campo de la catálisis heterogénea, en los laboratorios departamento de química

de la Universidad Nacional de Colombia. Para la preparación y caracterización de los catalizadores se llevó a cabo el procedimiento desarrollado por (Castro, 2019).

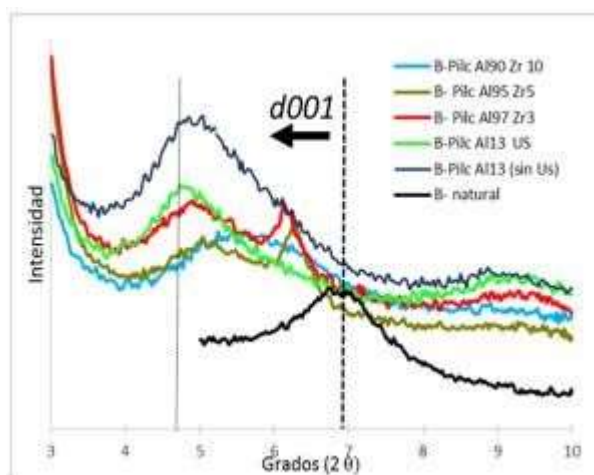
#### **4.5.2.2 Caracterización de los catalizadores ácidos obtenidos.**

Para el análisis por difracción de rayos X (DRX) se empleó un difractorómetro X'Pert PRO MPD PANalytical equipado con un ánodo de cobre ( $\lambda = 1,5406 \text{ \AA}$ ). Los análisis de acidez total se realizaron en un equipo TPD, micromeritics AutoChem el cual utiliza un TCD como detector. Los ensayos catalíticos de los sólidos bifuncionales se realizaron en un sistema que opera en un reactor de lecho fijo a presión atmosférica y el análisis de los productos se llevó a cabo en un Cromatógrafo de gases GC-17 A SHIMADZU, conectado en línea con el reactor y empleando una columna capilar ZB-1, 100% dimetilpolisiloxano de (60 m x 0.53 mm, 3  $\mu\text{m}$ ) y un detector FID el cual fue diseñado por Castro, (2019).

#### **4.5.2.3 Preparación y obtención de catalizadores ácidos.**

Para los resultados por DRX de las arcillas modificadas por pilarización, se muestra el corrimiento del espaciado basal ( $d001$ ), el cual es el principal indicativo de que existió una modificación entre las láminas de la arcilla (Castro, 2019). Las arcillas modificadas, muestran el corrimiento del espaciado basal del plano  $d001$  hacia menores valores grados  $2\theta$ , (figura 20) confirmando la inserción efectiva de las especies polioxocatiónicas en el espacio interlaminar de la arcilla. En cuanto a los espaciados interlaminares del mineral de arcilla pilarizada con las especies polioxocatiónicas de Al-Zr, se verifica igualmente una pilarización exitosa.

**Fig. 20** Patrones de difracción de rayos X para la arcilla natural y modificada por pilarización Al<sub>13</sub>, y Al-Zr.



Fuente propia desarrollado con base a los resultados obtenidos.

En la tabla 13, los resultados obtenidos revelan la inserción efectiva de las especies polioxocatiónicas en el espacio interlamilar de la arcilla, con respecto al material de partida.

**Tabla 13** Espaciados *d001* de los sólidos pilarizados.

Sólido	Espaciado <i>d001</i> (Å)
B-natural	12.8
B-Pilc Al <sub>13</sub> US	18.6
B-Pilc Al <sub>13</sub> (sin US)	17.0
B-Pilc Al <sub>97</sub> Zr <sub>3</sub>	17.7
B-Pilc Al <sub>95</sub> Zr <sub>5</sub>	17.5
Ben pil Al <sub>90</sub> Zr <sub>10</sub>	16.0

Fuente propia. Basado en los resultados obtenidos.

#### **4.5.2.4 Caracterización de Acidez.**

En términos generales, no existe una técnica que suministre toda la información de interés en relación con las propiedades ácidas de los sólidos. Sin embargo, existen una gran variedad de técnicas que son necesarias correlacionar para obtener un análisis completo con información sobre la acidez en el estado sólido en términos de la fuerza, el número y la naturaleza de los sitios ácidos. En este sentido, los métodos térmicos que son los más frecuentemente empleados para determinar la acidez total (desorción de una base pre-adsorbida en función de la temperatura TPD (Temperature Programmed Desorption)). Estas caracterizaciones permitieron observar cambios en cuanto a la acidez de los materiales, revelan un incremento de esta propiedad con respecto al material de partida. Los resultados de la desorción de amoníaco de la bentonita pilarizada registra varias diferencias respecto a la bentonita natural, como puede observarse en la tabla 14.

Uno de los aspectos más relevantes es el marcado incremento en el contenido ácido respecto al material de partida, atribuido posiblemente a la generación de nuevos centros ácidos tanto Lewis como Brönsted.

**Tabla 14** Acidez total por TPD-NH<sub>3</sub>.

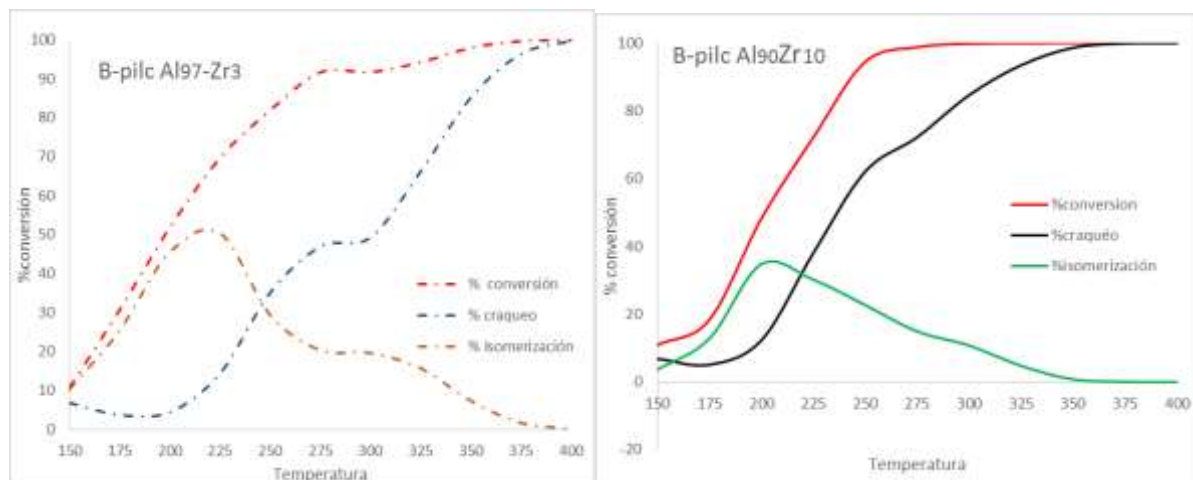
SÓLIDO	T° Máx. (°C)	Acidez total (μmol/g)
B-natural	143.4	55.7
B Al13 (sin US)	125.0	155.0
B Al13 Us	131.0	154.9
B Pilc Al <sub>97</sub> -Zr <sub>3</sub>	125.6	125.0
B Pilc Al <sub>95</sub> -Zr <sub>5</sub>	118.4	126.0
B Pilc Al <sub>90</sub> -Zr <sub>10</sub>	122.5	142.0

\*T Max: (temperatura a la cual se obtuvo el máximo de desorción de NH<sub>3</sub>).

#### 4.5.3.5 Evaluación de las propiedades ácidas, usando la prueba de decano.

La adición de Zr al polímero sólido de Al, mejora las propiedades ácidas de los materiales y los catalizadores son más activos en la reacción de hidroconversión de decano. Finalmente como trabajo previo, se realizó la evaluación de las propiedades ácidas de los materiales empleado la reacción de hidroconversión de n-decano (teniendo en cuenta que esta técnica nos permite evaluar las propiedades ácidas de los materiales, las cuales, como se ha insinuado antes, son de vital importancia a la hora de obtener aceites lubricantes de mejor calidad) (Figura 21) además, fueron las muestras que antes de la contingencia por COVID19, se alcanzaron a testear en el cromatógrafo por parte del grupo de investigadores del Ejército y bajo la asesoría del investigador Anderson Castro.

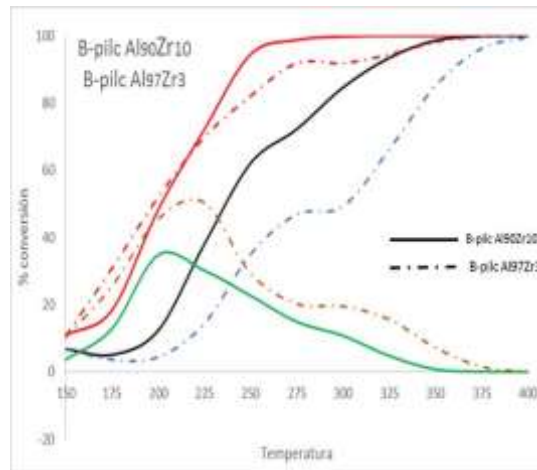
**Fig. 21** Test Catalítico - % conversión - % craqueo - % isomerización.



Fuente: Tomado de (Castro, 2019).

Dentro de los resultados es evidente que el material pilarizado con Al-Zr sigue un comportamiento de reacción consecutiva en donde se forman primero los isómeros del decano y luego se dan los productos de craqueo. Es importante mencionar que hasta ahora solo se lograron testear 2 arcillas modificadas dentro del proyecto a cual está vinculada esta investigación (Figura 22), y que revelan que cuando se adiciona cantidades crecientes de Zr la selectividad hacia los productos de craqueo aumenta, lo cual muy probablemente está asociado a un aumento en la acidez, (medidas que están en progreso en el proyecto macro), lo cual confirma que si estas especies catalíticas son implementadas en procesos de purificación de lubricantes su potencial mejoraría la reacción de conversión y además por su carácter ácido permitiría el rompimiento de moléculas pesadas y favorecería la limpieza del lubricante de una forma más efectiva.

**Fig. 22** Comparación de los resultados de selectividad, % conversión - % craqueo



% isomerización.

Fuente: Elaboración propia de acuerdo con los resultados obtenidos por cromatografía.

## CAPÍTULO 5.

### Conclusiones.

La investigación permite identificar que este tipo de estudios pueden favorecer al ejército en 4 aspectos fundamentales, el ambiental, mediante el aprovechamiento de materias primas y de recursos naturales, el económico, porque permite una reducción de costos en sus procesos, el tecnológico, porque incentiva la creación de plantas de procesamiento para promover la auto sostenibilidad y calidad ambiental, y científico porque favorece el conocimiento de este tipo de alternativas que pueden escalarse desde el laboratorio a lo industrial.

Este trabajo permitió identificar que no existe un monitoreo o supervisión en todo el Ejército Nacional, respecto a la disposición final adecuada de los (ALU), de

acuerdo con la Ley 430 de 1998 (Por la cual se dictan normas prohibitivas en materia ambiental, referentes a los desechos peligrosos) y la Ley 253 de 1996 (Por medio de la cual se aprueba el convenio de Basilea en Colombia).

La evaluación de catalizadores de bentonita en polvo con polímeros de Al y de Al-Zr sólidos, permiten identificar sus propiedades acidas que apuntan a una mejor eficiencia en el proceso de reutilización y purificación de lubricantes en el Ejército conforme con lo expuesto en el análisis bibliográfico.

El Ejército Nacional no cuenta con una planta de tratamiento de los residuos de aceites y lubricantes, para su procesamiento y reutilización, los procesos de reutilización deben ser estandarizados y regulados, conforme al manejo de los residuos y el transporte de los insumos desde diferentes puntos del país, para obtener un producto amigablemente con el medio ambiente.

Esta investigación, permitió evidenciar la falta de voluntad del gobierno nacional con respecto a la reutilización de los lubricantes usados a nivel no solo aeronáutico, sino también a nivel automotriz e industrial, provocando así día a día la generación de más desechos eliminados no de la mejor manera, que terminan perjudicando la vida y la salud de los más vulnerables.

Otra conclusión derivada de este trabajo es la falta de regulación aeronáutica para la reutilización de lubricantes utilizados en aviación, si bien es cierto que se cuenta con el RAC 216 el cual dicta los lineamientos para la disposición final de estos elementos, en ninguno se insta a las **OMA** antiguas **TAR** a velar por la recuperación, regeneración y reutilización de estos desechos.

Por ultimo y como conclusión general se puede decir que la puesta en marcha de esta planta de tratamiento y regeneración de lubricantes usados para el Ejército Nacional es un beneficio que no solo será de utilidad a esta fuerza armada, sino que será la punta de lanza para la innovación a nivel nacional y además sentará un precedente que indicará que cuando existe voluntad y compromiso se puede generar dinero protegiendo el medio ambiente.

## **Recomendaciones.**

Realizar capacitaciones para crear conciencia en cada uno de los batallones o talleres aeronáuticos donde se generen aceites lubricantes usados para que se cumplan los requisitos que exige la normatividad vigente de residuos o desechos peligrosos.

Implementar un oxidador térmico en la planta de tratamiento para evitar emisiones atmosféricas contaminantes y preservar la calidad del aire y medio ambiente. Es una recomendación emanada de la realización de este trabajo la apertura de nuevos cursos en la ESAVE tendientes a la capacitación para el buen manejo y manipulación de los lubricantes usados en las diferentes bases y batallones que operen aeronaves.

Se recomienda la puesta en marcha de lugares al aire libre, libre de contaminantes y agentes externos que puedan contaminar para la implementación de canecas que sean depositarias de los lubricantes que se desechan en los diferentes mantenimientos con el fin de comenzar el cambio de conciencia al interior de bases y unidades militares.

Por último, se hace necesario recomendar la inserción de una materia en la malla curricular de la carrera ingeniería aeronáutica que sea la encargada de adelantar proyectos encaminados a la economía verde, que genere cambios dentro de las organizaciones y que propenda por idear políticas que lleven a manejar la aviación de una manera responsable y amigable con el medio ambiente.

## Bibliografía

- Aguirre, B., Almeida, D., & Jativa, F. (2010). *Universidad San Francisco de Quito*.  
Obtenido de <https://docplayer.es/18686935-Conversion-de-aceite-lubricante-usado-de-automoviles-adiesel-2.html>.
- Aguirre, B. (2010). *Obtención de diésel #2 sintético a partir de aceites lubricantes usados*.  
Repositorio UFSQ. Obtenido de [http://repositorio.usfq.edu.ec/bitstream/23000/6639/1/9425\\_5.pdf](http://repositorio.usfq.edu.ec/bitstream/23000/6639/1/9425_5.pdf).
- Albarracín, P. (2015). *Tribología y lubricación industrial y automotriz, ingenieros de lubricación*. Obtenido de [https://www.academia.edu/21854728/TRIBOLOG%C3%8DA\\_Y\\_LUBRICACI%C3%93N\\_Dictado\\_a\\_Servicio\\_Nacional\\_de\\_Aprendizaje\\_SENA](https://www.academia.edu/21854728/TRIBOLOG%C3%8DA_Y_LUBRICACI%C3%93N_Dictado_a_Servicio_Nacional_de_Aprendizaje_SENA).
- Álvarez, C. & Betancur, A. (2015). *Estudio de Factibilidad para la Creación de una Empresa de Reciclaje de Aceite Lubricante Usado de Motor en el Eje Cafetero* (Pregrado). Universidad Tecnológica de Pereira. Obtenido de <http://repositorio.utp.edu.co/dspace/bitstream/handle/11059/5653/65811A473es.pdf?sequence=1&isAllowed=y>.
- Álvaro, M., Cuneo, S., Cusi, R., Escate, E., Flores, A. & Massa, L. (2019). *La regeneración de los aceites usados de los motores de combustión disminuye el impacto ambiental en la ciudad de Ica*. *Revista de Investigación Científica*, 1(4), 81-85.
- Amador, F. (06 de 12 de 2015). *Composición química del petróleo*. Obtenido de <http://la-quimica-organica.blogspot.com/2015/12/composicion-quimica-delpetroleo>.
- Amaya, J., Moreno, S., Molina, R.(2020). *Natural Clay Minerals for Hydrocracking Reactions*. Thomas R and Jose Odriozola. Royal society of chemistry. pag 16-38.
- Andrade, C. (2015). *Propuesta de un Plan de Manejo Sustentable de los Aceites Usados Provenientes de los Talleres Automotrices y Lubricadoras del Cantón Cañar* (Pregrado). Universidad Politécnica Salesiana. Obtenido de [https://dspace.ups.edu.ec/bitstream/1234567\\_89/7683/1/UPS-CT004544.pdf](https://dspace.ups.edu.ec/bitstream/1234567_89/7683/1/UPS-CT004544.pdf).
- Awaja, F., & Pavel, D. (2006). *Design Aspects of Used Lubricating Oil Re-Refining*. ScienceDirect. Obtenido de <https://www.sciencedirect.com/book/9780444522283/design-aspects-of-usedlubricating-oil-re-refining?via=ihub=>.
- Benlloch, J. (1997). *Los lubricantes: características, propiedades y aplicaciones*. Barcelona. Obtenido de <https://dialnet.unirioja.es/servlet/libro?codigo=219093>.
- Bergaya, F., Aouad, A. & Mandalia, T. (2006). Chapter 7.5 Pillared Clays and Clay Minerals. *Developments in Clay Science* 1, 393–421.
- Bernal, C. (29 de 02 de 2016). *Clasificación aceites y lubricantes*. Obtenido de <https://comp.ralubricantes.com/blog/clasificacion-de-los-aceites-y-lubricantes-paramotor/>.

- Caballero, A. (2000). *Metodología de la Investigación Científica. Diseños con Hipótesis Explicativas*. Lima: Udegraf. Obtenido de [https://books.google.com.co/books/about/Metodolog%C3%ADa\\_de\\_la\\_investigaci%C3%B3n\\_cient.html?hl=es&id=D8jQYgEACAAJ&redir\\_esc=y](https://books.google.com.co/books/about/Metodolog%C3%ADa_de_la_investigaci%C3%B3n_cient.html?hl=es&id=D8jQYgEACAAJ&redir_esc=y).
- Carrazo. (2020). *Bardahl Industria*. Obtenido de <https://www.bardahlindustria.com/funciona-miento-de-los-aceites-lubricantes-enmaquinaria-industrial/>.
- Carriazo, J. G. (2008). *XRD study on the intercalation-pillaring of a 2:1 clay mineral with aluminum polyoxocationic species*. Rev. Mex. Ing. Quím.
- Castro, A., Amaya, J., Molina, R., & Moreno, S. (2019). *Pillarization in concentrated media with solid Al and Al-Zr polymers to obtain acid catalysts*. *Catalysis Today*. Obtenido de <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0920586119301580>.
- Chandak, N (2016). *Optimization of hydrocracker pilot plant operation for Base Oil production*. *Catalysis Today*. Vol.271. Pag.199-206. Obtenido de <https://doi.org/10.1016/j.cattod.2015.09.052>. <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0920586115006689>.
- Chang, S. y Robinson, P. (2007). *Practical advances in petroleum processing*. Vol. 1. New York, NY :Springer Science & Business Media.
- Chuqui, M., & Romero, J. (2017). *Universidad Politécnica Salesiana sede Matriz Cuenca*. Obtenido de <https://dspace.ups.edu.ec/bitstream/123456789/14195/1/UPS-CT006977.pdf>.
- Clough, M. Keeley, C. Komvokis, V. O'berry, B. Shackleford, A. Srikantharajah, S. & Yilmaz, B, (2017). *Boron based nickel passivation enables refiners to reduce contaminant hydrogen and coke production and improve FCC yields*. *Ptq Petroleum technology quarterly*.29-35.
- Colombia, P. d. (31 de Julio de 2002). *Función Pública*. Obtenido de <https://www.funcionpublica.gov.co/eva/gestornormativo/norma.php?i=6101#:~:text=El%20presente%20decreto%20tiene%20por,y%20el%20medio%20ambiente%2C%20de>.
- Cubillos. (14 de 10 de 2010). *Los aceites y su clasificación*. Obtenido de <http://lubritec.hdr.ov-er-blog.es/article-los-aceites-y-su-clasificacion59051484.html>.
- Cuervo, A., & Valdiri, J. (2019). *Fundación Universidad de América*. Obtenido de <http://repository.uamerica.edu.co/bitstream/20.500%20.11839/7376/1/6141220-2019-1IQ.pdf>.
- Dik, P. I.G. Danilova, I.S. Golubev, M.O. Kazakov, K.A. Nadeina, S.V. Budukva, V.Yu. Pereyma, O.V. Klimov, I.P. Prosvirin, E.Yu. Gerasimov, T.O. Bok, I.V. Dobryakova, E.E. Knyazeva, I.I. Ivanova, A.S. Noskov (2019). *Hydrocracking of vacuum gas oil over NiMo/zeolite-Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>: Influence of zeolite properties*. *Fuel*. Vol. 237Pag.178-190. Obtenido de <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2018.10.012>. <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0016236118317253>.

- EE. UU, A. (01 de 02 de 2017). *Agencia de protección ambiental de los EE.UU.* Indiana University. Obtenido de [https://webapp1.dlib.indiana.edu/virtual\\_disk\\_library/index.cgi/4928837/FID305](https://webapp1.dlib.indiana.edu/virtual_disk_library/index.cgi/4928837/FID305).
- Ejército Nacional de Colombia. (2019). *Informe plan de mantenimiento 2019*. Fuerte Militar Tolemaida.
- El Congreso de Colombia. (16 de 01 de 1998). *Ministerio de Ambiente*. Obtenido de [https://www.minambiente.gov.co/images/normativa/leyes/1998/ley\\_0430\\_1998.pdf](https://www.minambiente.gov.co/images/normativa/leyes/1998/ley_0430_1998.pdf)
- El Congreso de Colombia. (27 de 11 de 2008). *Ministerio de Ambiente*. Obtenido de [https://www.minambiente.gov.co/images/BosquesBiodiversidadyServiciosEcosistemas/pdf/Normativa/Leyes\\_ley\\_1252\\_271108.pdf](https://www.minambiente.gov.co/images/BosquesBiodiversidadyServiciosEcosistemas/pdf/Normativa/Leyes_ley_1252_271108.pdf).
- Esquivel, R. (16 de 08 de 2018). *Revista Ferrepat*. Obtenido de <https://www.revista.Ferrepat.com/ferreteria/tipos-de-aceites-lubricantes-paramaquinas-herramientas-y-mucho-mas/>.
- Freire, R., Ramos, J., Bravo, W., & Padilla, C. (30 de Julio de 2020). *Polo del conocimiento*. Obtenido de <https://polodelconocimiento.com/ojs/index.php/es/article/view/1641/3108#>.
- Gámez, M. (2020). *Objetivos y metas de desarrollo sostenible*. Desarrollo Sostenible Retrieved 25 November 2020, from <https://www.un.org/sustainabledevelopment/es/objetivos-de-desarrollo-sostenible/>.
- Gutiérrez, D., & Pérez, J. (2019). *Repositorio U América*. Obtenido de <https://repository.uamerica.edu.co/bitstream/20.500.11839/7382/1/6131051-2019-1IQ.pdf>.
- Haldor Topsoe A/S (2020). *Hydrocracking*. <https://www.topsoe.com/processes/hydrocracking>.
- Hernández, J., & Maldonado, A. (2020). *Evaluación de un proceso para la recuperación de Bases lubricantes contenidas en los aceites lubricantes usados*. Obtenido de <https://repository.uamerica.edu.co/bitstream/20.500.11839/7801/1/6122857-2020-1IQ.pdf>.
- Hernández, P. (04 de 09 de 2018). *Oil Fuel And Coolant Analysis*. Obtenido de <https://www.alsglobal.com/%2Fes-co%2Fnews%2Farticulos%2F2018%2F09%2Fanalisis-de-la-densidad-del-aceite-cundo-y-por-qu-hacer>.
- Jeong, H & Lee, Y. (2019). *Comparison of unsupported WS<sub>2</sub> and MoS<sub>2</sub> catalysts for slurry phase hydrocracking of vacuum residue*. Applied Catalysis. Vol. 572, Pag. 90-96. Obtenido de <https://doi.org/10.1016/j.apcata.2018.12.019>. (<http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0926860X1830615X>).
- Jones, J. (2007). *Diseño de un Sistema de Reciclaje de Aceite Lubricante Usado* (Pregrado). Universidad Austral de Chile. Obtenido de [https://www.academia.edu/28625079/DISE%C3%91O\\_DE\\_UN\\_SISTEMA\\_DE\\_RECICLAJE\\_DE\\_ACEITE\\_LUBRICANTE\\_USADO](https://www.academia.edu/28625079/DISE%C3%91O_DE_UN_SISTEMA_DE_RECICLAJE_DE_ACEITE_LUBRICANTE_USADO).

- Jurado, A. (2017). *Contaminación y manejo de aceites lubricantes usados*. *Ecovalores*, (54), 12-15. Retrieved 24 November 2020. Obtenido de [https://issuu.com/valoresonline/docs/valores\\_agosto2017](https://issuu.com/valoresonline/docs/valores_agosto2017).
- Kuchling, H. (16 de 08 de 1996). *Flottweg Wiki*. Obtenido de <https://www.flottweg.com/es/wiki/tecnica-de-separacion/viscosidad-dinamica/>.
- La Ministra de Ambiente, V. y. (9 de Octubre de 2005). *Minambiente*. Obtenido de <https://www.minambiente.gov.co/images/normativa/app/resoluciones/b0Resoluci%C3%B3n%201446%20de%202005%20%20Modifica%20Resoluci%C3%B3n%20415%20de%201998.pdf>.
- LDX Solutions. (2017). *LDX Solutions*. Obtenido de <https://www.ldxsolutionses.com/tecnologias/geotherm-rto-and-geocat-rco/>.
- Leal, B. (11 de 2014). *Universidad Politécnica de València*. Obtenido de Tesis Doctoral: <https://riunet.upv.es/bitstream/handle/10251/48468/LEAL%20Metodologia%20para%20la%20caracterizacion%20de%20aceites%20usados%20en%20aviacion%20pdf?sequence=1>.
- Mallqui, J. & Tenazoa, G., (2017). *Caracterización de Productos (Diesel, Turbo) Derivados del Tratamiento Térmico (Destilación) de Aceites Lubricantes Usados, en Iquitos* (Pregrado). Universidad Nacional de la Amazonía Peruana. Obtenido de [repositorio.unapiquitos.edu.pe/bitstream/handle/UNAP/5011/Geiner\\_Tesis\\_Titulo\\_2017.pdf?sequence=1&isAllowed=y](https://repositorio.unapiquitos.edu.pe/bitstream/handle/UNAP/5011/Geiner_Tesis_Titulo_2017.pdf?sequence=1&isAllowed=y).
- Mercaereo. (12 de 02 de 2018). *Partes E Insumos Para Aviación*. Obtenido de <https://www.mercaereo.com.co/producto/aero-xpd100-18ltssae-50-sae-j-1899-grade-50/>.
- Milán. (22 de 02 de 2017). *Clasificación lubricantes*. Obtenido de <https://cronaser.com/blog/como-clasifican-lubricantes-industriales/>.
- Ministerio de Ambiente, Vivienda y Desarrollo Territorial. (25 de 04 de 2005). *RedJurista*. Obtenido de [https://www.redjurista.com/Documents/decreto\\_1220\\_de\\_2005\\_ministerio\\_de\\_ambiente,\\_vivienda\\_y\\_desarrollo\\_territorial.aspx#/](https://www.redjurista.com/Documents/decreto_1220_de_2005_ministerio_de_ambiente,_vivienda_y_desarrollo_territorial.aspx#/).
- Ministerio de Ambiente, Vivienda y Desarrollo Territorial. (30 de 12 de 2005). *IDEAM*. Obtenido de <http://www.ideam.gov.co/documents/51310/526371/Decreto+4741+2005+PREVENCION+Y+MANEJO+DE+REIDUOS+PELIGROSOS+GENERADOS+EN+GESTION+INTEGRAL.pdf/491df435-061e-4d27-b40f-c8b3afe25705>.
- Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible. (2014). *Asociación Colombiana del Petróleo*. Obtenido de <https://acp.com.co/web2017/es/informes-estadistico-detaladros/maunales/276-manual-tecnico-para-el-manejo-de-aceites-usados/file>.
- Ministerio de Minas y Energía. (25 de 11 de 2005). *SICOM*. Obtenido de <http://www.sicom.gov.co/vigentes.shtml?apc=c1d1--&x=190>.

- Morán, K. (2015). *Re-refinación de Aceites Lubricantes Usados mediante procesos físico-químicos*. Escuela superior politécnica del Litoral. Obtenido de <http://www.dspace.esp ol. edu.ec/xmlui/bitstream/handle/123456789/38267/DCD102093.pdf?sequence=1&isAllowed=y>.
- Moreno , C. (2018). *Determinación de la Pre-Factibilidad de Obtención de Isobutano y Propano, Usando Gases de Extracción Petrlifera en Colombia*. Fundación Universidad América. Obtenido de <http://repository.uamerica.edu.co/handle/20.500.11839/6948>.
- Moreno, L., (2019). *Propuesta de un plan de gestión para disposición final de los aceites de lubricantes procedentes de talleres automotriz del distrito Pillco marca-Huánuco*. Universidad de Huánuco, México. Obtenido de <http://repositorio.udh.edu.pe/bitstream/handle/123456789/2102/MORENO%20TELLO%2c%20Leonardo%20Daniel.pdf?sequence=1&isAllowed=y>.
- Moya, L. (2010). *Escuela de Organización Industrial*. Obtenido de <https://www.eoi.es/es/sa vi%20a/publicaciones/19424/proyecto-fin-de-master-desde-elaceite-lubricante-usado-hasta-su-puesta-en-el-mercado-tras-su-regeneracion>.
- Murzin, D. (07 de 06 de 2013). *Technology for rerefining used lube oils applied in Europe: a review*. Obtenido de <https://onlinelibrary.wiley.com/doi/abs/10.1002/jctb.4137>.
- Nielsen, M. (2016). *Análisis de rentabilidad de “Planta de regeneración de aceites lubricantes”* (Pregrado). Universidad Nacional de Cuyo. Obtenido de [https://bdigital.uncu.edu.ar/objetos\\_digitaes/8274/nielsen-cingel-melanie-fce.pdf](https://bdigital.uncu.edu.ar/objetos_digitaes/8274/nielsen-cingel-melanie-fce.pdf).
- Noria. (1 de 09 de 2014). *Noriawebmanager*. Obtenido de <https://noria.mx/lublearn/laimportancia-de-la-estabilidad-a-la-oxidacion/#:~:text=La%20estabilidad%20a%20la%20oxidaci%C3%B3n%20es%20una%20reacci%C3%B3n%20qu%C3%ADmica%20que,el%20aceite%20y%20el%20ox%C3%ADgeno.&text=Generalmente%20la%20oxidaci%C3%B3n%2>.
- Nova Nordisk. (2018). *Fundación para la Diabetes Nova Nordisk*. Obtenido de <https://www.fundaciondiabetes.org/sabercomer/391/los-hidratos-de-carbono>.
- Organización internacional del trabajo. (2003). Propano. Obtenido de [https://www.ilo.org/dyn/icsc/showcard.display?p\\_lang=es&p\\_card\\_id=0319&p\\_version=2](https://www.ilo.org/dyn/icsc/showcard.display?p_lang=es&p_card_id=0319&p_version=2).
- Peter, J. (2017). *Friction, Lubrication, and Wear Technology*. ASM International. Obtenido de ASM Handbook, Volume 18: Friction, Lubrication, and Wear Technology - ASM International.
- Porcuna, J. (11 de 2011). *Agroecologia.net*. Obtenido de [https://www.agroecologia.net/recur sos/Revista\\_Ae/Ae\\_a\\_la\\_Practica/fichas/n6/ficha-revista-ae-6-aceites-minerales.pdf](https://www.agroecologia.net/recur sos/Revista_Ae/Ae_a_la_Practica/fichas/n6/ficha-revista-ae-6-aceites-minerales.pdf).
- Ramírez. (09 de 09 de 2020). *Lubricantes sintéticos*. Obtenido de <https://reliabilityweb.com/sp/articles/entry/los-lubricantes-sinteticos/>.

- Requena, J., & Rodríguez, M. (2006). *Universidad Central de Venezuela*. Obtenido de <http://oilproduction.net/cms3/files/Separadores%20Bifasicos%20y%20Trifasico.pdf>.
- Rodríguez (2015). *Historia de los lubricantes*. Obtenido de <http://www.oil7.com/esp/knowledge/basic/history.jsp>.
- Rubio, H. (29 de 02 de 2016). *Compralubricantes.com*. Obtenido de <https://compralubricantes.com/blog/aditivos-de-lubricantes-que-tipos-hay/>.
- Ruiz Galán, J. (2019). *Ingeniería Básica de una Planta de Extracción de Aceite Esencial de "Mentha arvensis L." por Destilación de Arrastre con Vapor (Pregrado)*. Universidad de Sevilla.
- Sánchez, L. (2014). *Diseño de una planta industrial para la re-refinación de aceites lubricantes usados en el distrito de chilca*. Repositorio UNAC. Obtenido de [http://repositorio.unac.edu.pe/bitstream/handle/UNAC/407/LuisAlberto\\_Tesis\\_titulo\\_profesional\\_2014.pdf?sequence=3&isAllowed=y](http://repositorio.unac.edu.pe/bitstream/handle/UNAC/407/LuisAlberto_Tesis_titulo_profesional_2014.pdf?sequence=3&isAllowed=y).
- Shell. (16 de 06 de 2019). *Shell Global Solutions*. Obtenido de <https://www.shell.com/motorist/oils-lubricants/helix-for-cars/pureplus.html>.
- Suntaxi, R., & Trujillo, J. (2009). *Levantamiento del catastro de generadores, diseño de un plan de recolección y alternativas para la disposición final de los aceites usados en el cantón rumiñahui-provincia de pichincha* Escuela politécnica nacional. Obtenido de <https://bibdigital.epn.edu.ec/bitstream/15000/1165/1/CD-2003.pdf>.
- Trujillo, F. (09 de 2015). *Guía para el montaje de una planta piloto para refinación y transformación de aceite usado de motor de combustión interna en nafta, diésel y cutter*. Repositorio USAC. Obtenido de <http://www.repositorio.usac.edu.gt/3100/1/Fabio%20Alberto%20Trujillo%20Vargas.pdf>.
- Universidad de Barcelona. (2018). Evaporación. Tomado de [http://www.ub.edu/oblq/oblq%20castellano/evaporacio\\_fona.html#](http://www.ub.edu/oblq/oblq%20castellano/evaporacio_fona.html#).
- Vidal, R. (10 de 04 de 2010). *Volar, Asoc. Pasión por volar*. Obtenido de <http://www.pasionporvolar.com/historia-de-los-aceites-para-la-aviacion/>.