

**EVALUACIÓN DE LA OBTENCIÓN DE LUBRICANTES A PARTIR DE LA  
PIRÓLISIS DEL CAUCHO DE LLANTAS A ESCALA DE LABORATORIO.**

**AYLEEN JULIANA ACELAS MARTÍNEZ**

**CAROL JULIANA NIÑO RODRIGUEZ**

**UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER  
FACULTAD DE INGENIERÍA FISICOMECÁNICAS  
ESCUELA DE INGENIERÍA MECÁNICA  
BUCARAMANGA**

**2024**

**CREACIÓN DE LUBRICANTES A PARTIR DE LA PIRÓLISIS DEL CAUCHO  
DE LLANTAS A NIVEL DE LABORATORIO.**

**AYLEEN JULIANA ACELAS MARTÍNEZ**

**CAROL JULIANA NIÑO RODRÍGUEZ**

**Trabajo de grado presentado como requisito para optar por el título de:  
INGENIERO MECÁNICO**

**Director:**

**Yesid Javier Rueda Ordoñez**

**PhD en Ingeniería Mecánica**

**Codirector:**

**Edinson Lizarazo Sánchez**

**Ingeniero Mecánico**

**UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER  
FACULTAD DE INGENIERÍA FISICOMECAÑICAS  
ESCUELA DE INGENIERÍA MECÁNICA  
BUCARAMANGA**

**2024**

## **Dedicado a,**

A Dios, por impulsarme a seguir adelante en los momentos difíciles y darme la sabiduría y resiliencia para alcanzar este logro.

A mis padres, gracias por ser mi mayor inspiración y apoyo incondicional, por sus sacrificios, por sus palabras de aliento y motivación en los momentos difíciles y por su alegría en mis triunfos. Hoy puedo decir con orgullo que he alcanzado una de mis metas más importantes, y no lo habría logrado sin su amor y apoyo incondicional. Este logro es tan suyo como mío y lo dedico a ustedes con todo mi amor y agradecimiento.

A mis amigas, Jherys y Katrin, gracias por ser parte fundamental de mi camino, mi apoyo incondicional y fuente de alegría. Gracias por estar siempre ahí para escucharme, animarme y celebrar mis triunfos. Este logro no habría sido posible sin su amistad y apoyo.

A Maibry, gracias por ser mi cómplice de vida a pesar del tiempo y la distancia. Hemos compartido alegrías, tristezas, sueños y metas desde que éramos niñas, y hoy celebro este logro juntas. Gracias por estar en cada paso, animándome y creyendo en mí.

A mi familia, gracias por su apoyo y amor incondicional, y por creer siempre en mí.

Agradezco profundamente a todas aquellas personas que han formado parte de este trayecto y que, con su presencia, apoyo y palabras de aliento, han hecho posible la consecución de este sueño.

**AYLEEN JULIANA ACELAS**

## **Dedicado a,**

A Dios por darme salud y permitirme conseguir un logro más en la vida.

A mi abuela, Sixta por su apoyo incondicional, por la motivación que me brindo día a día por creer en mí, por todo el amor que me diste sin ti nada de esto sería posible, este triunfo te lo dedico a ti con todo mi amor y cariño.

A mi abuelo, Rigoberto quien con sabiduría y amor guía mi camino, por todas tus enseñanzas y tu amor incondicional.

A mi madre, Amparo por todos los sacrificios que hiciste durante estos años para que pudiera cumplir mis sueños, infinitas gracias por todo.

Gracias a todas esas personas importantes en mi vida que contribuyeron a hacer realidad este sueño.

**CAROL JULIANA NIÑO**

## **AGRADECIMIENTOS**

Al profesor Yesid Rueda, por la oportunidad de desarrollar este proyecto y así mismo por su apoyo incondicional, por compartir sus conocimientos, acompañamiento, orientación y dedicación que nos brindó en el desarrollo de este proyecto.

Al Ingeniero Edinson Lizarazo, por todo su acompañamiento, paciencia, asesoría colaboración, apoyo incondicional y dedicación en todas y cada una de las etapas que nos llevaron a culminar exitosamente este proyecto.

A nuestras familias por su apoyo incondicional y a nuestros amigos que nos acompañaron a lo largo de nuestro proceso de formación e hicieron inolvidable nuestro paso por la universidad.

Por último, a la Universidad Industrial de Santander, y en especial a la Escuela de Ingeniería Mecánica, por permitir formarnos como profesionales y brindarnos las mejores experiencias y recuerdos que quedarán en nuestros corazones.

## CONTENIDO

1. Introducción .....	12
1.1. Pregunta De Investigación .....	14
2. Objetivos .....	14
2.1. Objetivo General: .....	14
2.2. Objetivos Específicos: .....	14
3. Marco Teórico .....	14
3.1. Glosario .....	15
4. Metodología .....	15
4.1. Descripción De La Unidad De Pirólisis: .....	16
4.2. Actividades Preliminares .....	17
4.2.1. Caracterización De La Materia Prima .....	17
4.2. Desarrollo Experimental .....	19
4.2.1. Procesamiento De La Muestra Mediante El Proceso De Pirólisis Para La Obtención Del Aceite. ....	19
4.3. Análisis Experimental .....	18
4.3.1. Análisis Próximo .....	18
4.3.2. Análisis De Las Propiedades Del Aceite Obtenido .....	20
5. Análisis De Resultados.....	25
5.1. Pruebas Experimentales .....	25
5.2. Análisis De La Viscosidad.....	26
5.3. Análisis De La Densidad .....	28
5.4. Cálculo Del Poder Calorífico .....	29
5.5. Viabilidad Económica.....	30
Conclusiones .....	33
Referencias .....	35

## LISTA DE FIGURAS

Figura 1. Metodología Realizada para el desarrollo de este proyecto.....	16
Figura 2. Unidad de Pirólisis Utilizada .....	17
Figura 3. Muestra de Ceniza obtenidas en el análisis próximo .....	19
Figura 4. Fracción líquida y sólida obtenida en las pruebas experimentales iniciales a las temperaturas de 500°C, 550°C, 600°C y 650°C.....	20
Figura 5. Baño de Viscosidad Cinemática .....	21
Figura 6. Viscosímetro CANNON 75X- 250 .....	22
Figura 7. Proceso de Filtrado del Aceite.....	22
Figura 8. Medición de la densidad a través de método del Picnómetro .....	23
Figura 9. Gráfico 4.1 ASTM D341 Viscosidad-Temperatura (Tomado de Albarracín, P. R. (2015). Tribología y Lubricación.5a ed. Tomo 1 p.225) .....	24
Figura 10. Temperatura vs viscosidad cinemática de la fracción líquida .....	27
Figura 11. Temperatura vs densidad de la fracción líquida .....	28
Figura 12. Temperatura vs poder calorífico de la fracción líquida .....	30
Figura 13. Presupuesto pirolisis industrial .....	31
Figura 14. Presupuesto pirolisis a escala de laboratorio.....	32

## LISTA DE TABLAS

Tabla 1. Condiciones de Operación.....	20
Tabla 2. Tabla de análisis próximo.....	19
Tabla 3. Tabla de porcentaje de subproductos obtenidos de la pirolisis .....	25
Tabla 4. Densidad cinemática de la fracción líquida .....	27
Tabla 5. Densidad de la fracción líquida .....	28
Tabla 6. Poder calorífico de la fracción líquida .....	30

## **LISTA DE ANEXOS**

Anexo A. Análisis Próximo .....	33
Anexo B. Pirolisis De Caucho De Llanta .....	34
Anexo C. Viscocidad.....	34
Anexo D. Desviacion Estandar De La Densidad.....	35

## RESUMEN

**TÍTULO:** EVALUACIÓN DE LA OBTENCIÓN DE LUBRICANTES A PARTIR DE LA PIRÓLISIS DEL CAUCHO DE LLANTAS A ESCALA DE LABORATORIO\*

**AUTOR:** AYLEEN JULIANA ACELAS MARTÍNEZ, CAROL JULIANA NIÑO RODRIGUEZ\*\*

**PALABRAS CLAVES:** Pirólisis, aceite lubricante, llanta usada, análisis tribológico

### **DESCRIPCIÓN:**

Las llantas representan un desafío ambiental debido a su difícil reciclaje y su impacto medioambiental. Los contaminantes plásticos más comunes en el mundo son los neumáticos, según un informe de 2017 de la Unión Internacional para la Conservación de la Naturaleza (UICN), las llantas representan el 28% de los residuos micro plásticos en los océanos. No obstante, hay procesos como la pirólisis, en el cual las llantas se procesan para aprovechar los productos obtenidos en ese proceso, obteniendo aceites y lubricantes de esta manera. Este proyecto tiene como objetivo evaluar la producción de lubricantes a partir de pirólisis del caucho de llantas residuales a escala de laboratorio con el fin de mitigar el impacto ambiental producido por estas; lo anterior mediante la realización del proceso de pirólisis a 4 diferentes temperatura (500°C, 550°C, 600°C y 650°C), encontrando que el mayor rendimiento de la fracción líquida, es decir, la fracción cuyas propiedades se examinaron para determinar su potencial como lubricante industrial, se obtuvo a una temperatura de 500°C, también los cambios en las mencionadas propiedades del aceite después de someterlos a diversas temperaturas. Para la caracterización del aceite obtenido se realizó un análisis tribológico del mismo, determinando las propiedades de viscosidad bajo la normativa ASTM D445 y densidad bajo la normativa ASTM 4052-11, al realizar la desviación estándar de la densidad se obtuvo que la densidad se mantiene constante en todas las temperaturas. Finalmente, se determinó la viabilidad técnico – económica de la obtención de este lubricante para su uso industrial. Se determinó que, aunque los valores de viscosidad y densidad de los aceites obtenidos difieren, los aceites producidos a diferentes temperaturas de pirólisis entran en la clasificación ISO 10. Sin embargo, otros factores como la temperatura de operación, los materiales y el tiempo de funcionamiento deben tenerse en cuenta al decidir qué tipo de aceite lubricante utilizar. Además, las normas utilizadas como guía para el análisis de los resultados están establecidos para derivados del petróleo, por lo que es imposible decir con precisión qué tan bien este marco normativo se ajusta a nuestras necesidades investigativas.

## ABSTRACT

**TITLE:** EVALUATION OF THE OBTAINING OF LUBRICANTS FROM THE PYROLYSIS OF TIRE RUBBER ON A LABORATORY SCALE\*

**AUTHOR:** AYLEEN JULIANA ACELAS MARTÍNEZ, CAROL JULIANA NIÑO RODRIGUEZ\*\*

**KEYWORDS:** Pyrolysis, lubricating oil, used tire, tribological análisis

### **DESCRIPTION:**

Tires represent an environmental challenge due to their difficult recycling and environmental impact. According to a 2017 report by the International Union for Conservation of Nature (IUCN), tires are the most common plastic pollutants in the world, representing 28% of microplastic waste in the oceans. However, there are processes such as pyrolysis, in which tires are processed to take advantage of the products obtained from this process, obtaining oils and lubricants in this way.

This project aims to evaluate the production of lubricants from the pyrolysis of residual tire rubber on a laboratory scale in order to mitigate the environmental impact caused by these; this was done by carrying out the pyrolysis process at four different temperatures (500°C, 550°C, 600°C, and 650°C), finding that the highest yield of the liquid fraction, i.e., the fraction whose properties were examined to determine its potential as an industrial lubricant, was obtained at a temperature of 500°C. The changes in the mentioned oil properties after subjecting them to various temperatures were also examined. For the characterization of the obtained oil, a tribological analysis was performed, determining the viscosity properties under ASTM D445 standards and density under ASTM 4052-11 standards. The standard deviation of the density was found to remain constant at all temperatures. Finally, the technical-economic viability of obtaining this lubricant for industrial use was determined. It was found that although the viscosity and density values of the obtained oils differ, the oils produced at different pyrolysis temperatures fall under the ISO 10 classification. However, other factors such as operating temperature, materials, and operating time must be considered when deciding which type of lubricating oil to use. Additionally, the standards used as a guide for the analysis of the results are established for petroleum derivatives, making it impossible to say precisely how well this regulatory framework fits our research needs.

## 1. INTRODUCCIÓN

La composición de las llantas presenta diversos desafíos, lo que complica la separación de estas en materiales aprovechables. Además, las llantas están diseñadas para ser duraderas y resistentes, lo que hace que sea difícil descomponerlas mecánicamente sin equipos apropiados para ello, lo que también resulta costoso. Los procesos de reciclaje pueden producir contaminantes como polvo o gases. Sin embargo, aunque se pretende incorporarlo en productos útiles, el mercado para éstos es pequeño e inestable, lo que dificulta su viabilidad económica.

La causa fundamental del problema de la contaminación del caucho es el cultivo del caucho, que ha provocado una deforestación generalizada en todo el mundo. El primer caucho sintético comercial fue creado por Fritz Hofmann en 1909, pero aún los neumáticos actuales comprenden aproximadamente un 24% de caucho sintético y un 19% de caucho natural. A pesar de ello, la fabricación de productos neumáticos sigue teniendo importantes efectos ambientales negativos como la continua deforestación, el uso de combustibles fósiles nocivos en la producción de caucho sintético y en el proceso de ensamblaje, lo anterior, según datos proporcionados por Tik Root, en el artículo científico “Los neumáticos son una gran fuente de contaminación por plástico” publicado en National Geographic en 2019.

Tik Root (2019) relata que, según el informe Gestión de Neumáticos al Final de su Vida Útil realizado por el Consejo Empresarial Mundial para el Desarrollo Sostenible, a nivel mundial se genera 1.000 millones de neumáticos al año y existen 4.000 millones en vertederos por la fabricación de un neumático moderno consumido en torno a 32 litros de petróleo. No obstante, no se deterioran en los vertederos; según datos proporcionados por la Revista SLT Caucho - Edición N°18 (2017), el tiempo de vida en estos últimos se considera entre los 80 y 100 años

Cómo inicio de un posible proceso de reciclaje, en una planta de procesamiento se recogen las llantas cortadas en pedazos pequeños; a pesar de que las llantas son altamente contaminantes y tardan en descomponerse. Posteriormente, se separa el alambre del caucho y las barras de hierro se fusionan para formar hierro nuevo, mientras que el caucho restante se puede vender como aglutinante de caucho. El reencauche, el aprovechamiento y el reciclaje son favorecidos por la devolución de las llantas a los productores mediante mecanismos de recolección, evitando así su quema en espacios abiertos o como combustible en actividades informales. De esta manera, se puede disminuir el daño ambiental que resulta de las tierras utilizadas y fomentar un uso más responsable de los recursos.

A nivel nacional, según estadísticas de la DIAN, en 2020 se importaron a Colombia 1,35 millones de llantas, de las cuales solo el 29% fueron recauchutadas. En total, 958.500 unidades de llantas terminaron en calles y rellenos sanitarios (Revista Semana, 2021). Conforme a ello, según la Resolución 1457 de 2010 del Ministerio de Ambiente, Vivienda y Desarrollo Territorial, además de provocar problemas en los rellenos sanitarios, muchas llantas se utilizan de manera inadecuada en depósitos clandestinos y espacios públicos en Colombia y

adicionalmente, grupos y subsectores utilizan las llantas como combustible de manera inapropiada generando así mayor contaminación.

Actualmente existen varios procesos para aprovechar al máximo las llantas, uno de ellos es el coprocesamiento, que aprovecha el poder calorífico de las mismas para producir energía al tiempo que regula las emisiones atmosféricas. Además, existe el procesamiento mecánico y químico para separar el caucho de los metales y demás componentes; el caucho reciclado se utiliza como componente del asfalto para pavimentos o en productos industriales como losas y recubrimientos antideslizantes. Sin embargo, hay opciones artesanales que requieren poca inversión y mano de obra humana, como soportes para carrocería, macetas, bebederos para ganado, tiras de amarre y suelas para calzado, pero se enfrentan a la tarea de desafiar un mercado inestable y fluctuante (Castiblanco, 2020).

Debido al alto poder calorífico de sus residuos (28–37 MJ/kg), se piensa que la combustión de llantas es un método viable para recuperar energía de las llantas viejas; sin embargo, existen problemas asociados a este proceso debido a las altas concentraciones de contaminantes orgánicos (hidrocarburos policíclicos) encontrados en los gases residuales. No obstante, existen procesos como la pirólisis, en donde los materiales orgánicos se someten a temperaturas elevadas, lo que descompone los enlaces químicos de las moléculas orgánicas y produce gases, líquidos y sólidos carbonosos, conocidos como biocarbón, según información proporcionada por la Revista SLT Caucho - Edición N°18 (2017).

La transformación de residuos orgánicos en productos útiles y de alto valor añadido se realiza mediante el proceso de pirólisis. Generalmente se utiliza para producir biocombustibles a partir de biomasa, producir carbón vegetal a partir de madera, eliminar residuos peligrosos y recuperar materiales valiosos con desechos. La industria siderúrgica, el aceite de pirólisis y el gas de síntesis son otros productos químicos y materiales producidos con ella. Este proceso es una fuente de energía renovable que puede reducir la cantidad de residuos orgánicos enviados a los vertederos, lo que ayuda a reducir las emisiones de gases de efecto invernadero y otros contaminantes ambientales (Revista de Química PUCP, 2012, vol. 26, n° 1-2)

La pirólisis de neumáticos y caucho vulcanizado ha sido objeto de investigación en diversos contextos, con el objetivo de explorar su viabilidad como fuente de combustible y su impacto ambiental. Mediante el proceso de pirólisis del caucho, se obtienen aceites, dichos aceites bajo diferentes estudios y procesos previos se han convertido en Diesel sintético, tal como fue realizado en la Universidad Piloto de Colombia en el año 2019. Adicionalmente, en el Centro Nacional de Investigaciones Metalúrgicas (Cenim-CSIC) en España, se ha desarrollado un método de reciclaje de neumáticos; este método utiliza los aceites generados en el proceso de pirólisis de los neumáticos para la obtención de combustibles líquidos y energía eléctrica.

No obstante, en Colombia y más específicamente en Santander, a pesar de las diversas opciones que hay actualmente para el reciclaje de llantas, este sigue siendo una gran problemática,

debido a la contaminación y/o precio de dichas alternativas, sumado a los pocos estudios e interés de la población en general en resolver dicho problema, sumado a eso, hay pocas investigaciones para la obtención de lubricantes a partir del proceso mencionado.

Por tal motivo se propone generar lubricantes a partir de pirólisis del caucho de llantas a nivel de laboratorio en la Escuela de Ingeniería Mecánica en la Universidad Industrial de Santander sede Bucaramanga, el líquido obtenido se podría usar como lubricante según el análisis tribológico de sus propiedades.

### **1.1. PREGUNTA DE INVESTIGACIÓN**

¿Es viable obtener lubricante en laboratorios de la Escuela de Ingeniería Mecánica en la UIS sede Bucaramanga, a partir de pirólisis del caucho de llantas para mitigar el impacto ambiental producido por éstas?

## **2. OBJETIVOS**

### **2.1. OBJETIVO GENERAL:**

Evaluar la producción de lubricantes a partir de pirólisis del caucho de llantas residuales a escala de laboratorio con el fin de mitigar el impacto ambiental producido por estas.

### **2.2. OBJETIVOS ESPECÍFICOS:**

- Obtener las fracciones sólido, líquido y gaseoso del proceso de pirólisis de manera experimental en laboratorio con el fin de separar el aceite lubricante producto del proceso.
- Determinar las propiedades tribológicas del aceite de pirólisis mediante las normas ASTM D445-12 (viscosidad cinemática), ASTM D1217 (densidad) con el fin de verificar su calidad a través de la comparación con aceites comerciales.
- Determinar la viabilidad técnico - económica del procesamiento de llantas a través de pirólisis para la obtención del lubricante para su uso industrial.

## **3. MARCO TEÓRICO**

En el marco de esta tesis de grado, se aborda la cuestión de la viabilidad de producir lubricantes industriales a partir del caucho de llantas usadas, un tema que involucra una amplia gama de conceptos fundamentales. En primer lugar, se destacan las propiedades cruciales de las llantas de caucho, que no solo son esenciales para la industria automotriz en términos de seguridad y rendimiento, sino que también las hacen valiosas como recurso para productos secundarios como lubricantes industriales. Luego se explora el proceso de pirólisis, que involucra la

evaluación térmica de materiales orgánicos en ausencia de oxígeno a altas temperaturas. En el caso de las llantas usadas, la pirólisis se utiliza para descomponer los compuestos orgánicos presentes en ellas en productos más simples, como aceite, gas y carbón. Este proceso es fundamental para el reciclaje de llantas usadas y la reducción de su impacto ambiental (Miranda et al.,2006). Para conocer la composición de los residuos sólidos de este proceso y así mismo su caracterización, es imprescindible la realización de un análisis próximo, para determinar la composición de cenizas, material volátil y carbono presentes en el material sólido residual del proceso de pirólisis.

En el ámbito de los lubricantes industriales, son sustancias utilizadas para reducir la fricción y el desgaste en máquinas y equipos industriales, garantizando su funcionamiento suave y eficiente. Estos lubricantes son esenciales para el mantenimiento de maquinaria y equipos, ya que aproximadamente el 80% de las averías de las máquinas se deben a problemas de lubricación (SICMA, 2022). La elección del tipo de lubricante depende de la aplicación específica y las características de la maquinaria.

Este enfoque multidisciplinario se apoya en un glosario que define conceptos clave, como el análisis tribológico, la termodinámica aplicada, la gestión de residuos sólidos y el proceso termoquímico, que son esenciales para comprender la complejidad de este proyecto y su potencial impacto en la industria y el medioambiente. considerando que la elección adecuada depende de la aplicación específica.

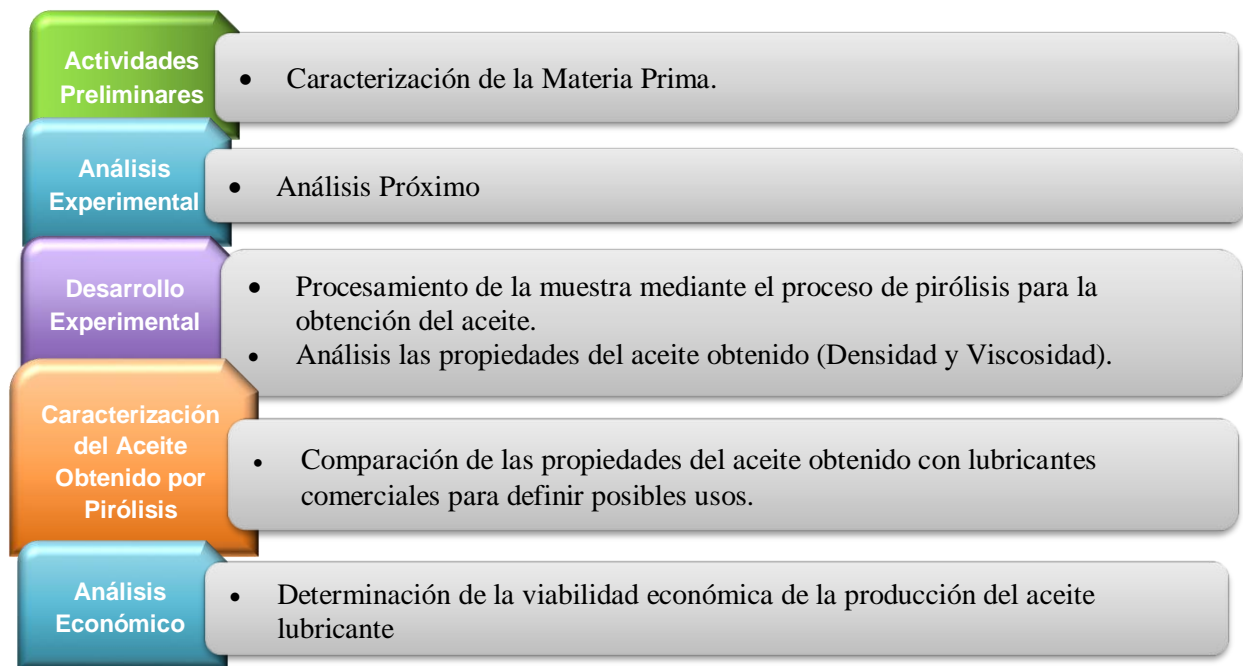
### **3.1. GLOSARIO**

- **Análisis Tribológico:** Estudio de las propiedades lubricantes de los aceites y su capacidad para reducir la fricción y el desgaste en las superficies de contacto, importante para evaluar la calidad de los lubricantes.
- **Combustible Fósil:** Fuentes de energía formadas por procesos geológicos a partir de organismos vivos, como el petróleo, que pueden estar relacionados con la producción de aceites lubricantes.
- **Gestión de Residuos Sólidos:** Proceso de recolección, transporte, tratamiento y disposición de residuos sólidos, relevante para el manejo adecuado de las llantas usadas.
- **Proceso Termoquímico:** Cambio químico que involucra intercambio de calor y energía, como pirólisis, utilizada en el procesamiento de llantas para obtener productos como aceite (Miranda, Segovia, Sosa, 2006).
- **Termodinámica Aplicada:** Aplicación de los principios termodinámicos para resolver problemas prácticos y diseñar sistemas, incluyendo procesos de conversión de energía.

## **4. METODOLOGÍA**

En este capítulo, se describe el procedimiento que se llevó a cabo para el proceso de producción de aceites lubricantes mediante pirólisis de caucho proveniente de llantas usadas

con el fin de mitigar el impacto ambiental producido por éstas. En la Figura 1 se muestran las actividades realizadas para el cumplimiento de los objetivos planteados previamente.

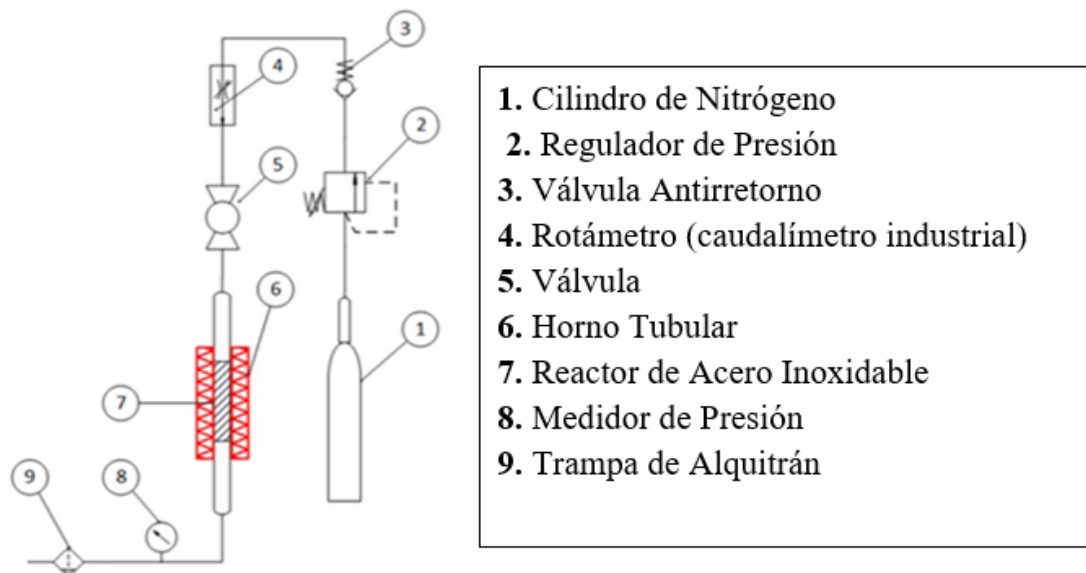


*Figura 1. Metodología Realizada para el desarrollo de este proyecto*

#### **4.1. DESCRIPCIÓN DE LA UNIDAD DE PIRÓLISIS:**

La unidad de pirólisis utilizada en el desarrollo de este proyecto se especifica en la Figura 2. Se usó el banco para descomposición y de degradación térmica de combustibles sólidos (pirolizador) diseñado por Lizarazo E. y Morales N, (2021) Se diseñó con el fin de hacer pirólisis por lecho fijo, cuando el horno alcanza la temperatura deseada se obtienen tres productos; aceite de pirólisis, carbón y gases. El nitrógeno arrastra los gases a través el condensador, donde se suministra agua alrededor del serpentín cumpliendo la función de refringente, para condensar los gases producidos y así obtener el aceite de pirólisis el cual queda depositado en el Erlenmeyer (Lizarazo y Morales, 2021).

Se realizó pirólisis a cuatro temperaturas diferentes (500°C, 550°C, 600°C y 650°C) con un flujo de gas de 150ml/min con un tamaño de partícula de 5 +/- 0.5 mm, con un tiempo de



*Figura 2. Unidad de Pirólisis Utilizada*

El nitrógeno, es usado como gas de arrastre para los gases residuales generados en el proceso de pirólisis, generando de esta manera una atmósfera inerte. Es suministrado en un flujo constante a una presión absoluta de 1 bar el cual es controlado por un rotámetro. El nitrógeno es alimentado desde la parte superior del reactor arrastrando a su paso los gases y vapores liberados en el proceso de pirólisis, hasta llegar al tubo refrigerante ubicado en la parte inferior del reactor, en donde los gases pasan a través del serpentín mientras fluye agua por el tubo refrigerante con la finalidad de condensar dichos gases. Una vez condensados, se genera el aceite pirolítico el cual fluye por acción de la gravedad hasta depositarse en el recipiente, en este caso, el Erlenmeyer.

## 4.2. ACTIVIDADES PRELIMINARES

### 4.2.1. CARACTERIZACIÓN DE LA MATERIA PRIMA

La materia prima utilizada en la presente investigación experimental es caucho de llanta residual triturada con un tamaño de partícula de 5mm,  $\pm 0.5$  mm obtenido en una empresa triturado de llantas residuales ubicado en la ciudad de Bucaramanga. Esa materia prima utilizada ya está separada de los componentes de las llantas (caucho natural, caucho sintético, metales entre otros); solo se usaron los componentes de interés para esta investigación (caucho).

## **4.2. ANÁLISIS EXPERIMENTAL**

### **4.2.1. ANÁLISIS PRÓXIMO**

El análisis próximo o proximal, se realizó siguiendo la norma ASTM D7582 además siguiendo las normas ASTM D3173, D3174, D3175 para medir el contenido de humedad, ceniza, material volátil, es una serie de pruebas usadas para la determinación de la composición de un material; en este caso, la cantidad de contenido en porcentaje de humedad, ceniza y material volátil presentes durante un proceso termoquímico específico, como la pirólisis en el presente caso. Este proceso fue realizado en un horno tipo mufla, ubicado en el laboratorio de combustión de la escuela de ingeniería mecánica.

#### **4.2.1.1. HÚMEDAD**

La humedad se puede definir básicamente cómo la cantidad de agua presente en el material, la cantidad de esta puede afectar o no la eficiencia del proceso y producto. Para su determinación se limpió el crisol de porcelana, se pesó el crisol en la balanza y seguido se taro y se pesó la muestra. Se usó 2 .0129gramos +/- 0,08, seguidamente se precalentó la mufla por 40 minutos hasta alcanzar la temperatura adecuada. Finalmente, se deja la muestra en la mufla durante 3 horas y luego pasado ese tiempo, se deja enfriar la muestra por 30 minutos fuera de horno y es pesado nuevamente, se usó un método que no sigue la norma.

#### **4.2.1.2. MATERIAL VOLÁTIL**

Este proceso se realiza para volatilizar los componentes orgánicos; para ello se colocaron 2 gramos de materia prima en cuatro crisoles tapados de porcelana tapados y se procedió a precalentar la mufla a 950°C. Los crisoles fueron introducidos en el horno durante 7 minutos, para después retirarlos, dejarlos enfriar y finalmente pesarlos nuevamente.

#### **4.2.1.3. CENIZA**

Después, al medir la materia volátil, la muestra se quema en el horno en presencia de oxígeno, hasta que todos los materiales combustibles se hayan oxidado y reste solo el remanente inorgánico. Para llevar a cabo este proceso, se dispusieron 2,0615 gr +/- 0,08 gramos de materia prima en cuatro porta muestras de cristal, seguidamente se precalienta la mufla y durante cuarenta minutos se incorporan las muestras hasta que la mufla alcance la temperatura seleccionada. Seguidamente, se incorpora las cuatro muestras y se dejan en la mufla por tres horas; pasado este tiempo se retiran las muestras y se dejan enfriar para posteriormente ser pesadas nuevamente; en la figura 3 se observa la muestra de ceniza obtenida en el análisis próximo.



**Figura 3. Muestra de Ceniza obtenidas en el análisis próximo**

COMPONENTE	PORCENTAJE
HUMEDAD	0.2980%
CENIZAS	6.59%
MAT. VOLATIL	64.23%

**Tabla 1. Tabla de análisis próximo**

El porcentaje de humedad es de 0.2980% es bajo porque esto indica que la llanta está seca, el contenido de ceniza es de 6.59 %, alto y debido a los aditivos usados en la fabricación de la llanta, el material volátil es de 64.23 %, valores similares a los expuestos por el autor Moncada (2013).

### **4.3. DESARROLLO EXPERIMENTAL**

Antes de dar inicio con el desarrollo experimental, se realizó la distribución de los parámetros experimentales controlables; en este caso solamente es la temperatura de pirólisis, ya que la presión y el tiempo, son variables que están por defecto en el diseño del pirolizador.

La temperatura para pirólisis de caucho de llanta a nivel de laboratorio está en el rango de 300°C a 800°C; sin embargo, la capacidad máxima del horno utilizado es de 650°C; por tanto, se realizó la distribución experimental a las temperaturas de 500°C, 550°C, 600°C y 650°C. Para obtener los productos específicos como aceite pirolítico, el tiempo es de una hora con una presión de 1 bar (100 kPa o 0,1 MPa). El flujo constante de nitrógeno (150ml/min) se utiliza para crear un ambiente sin oxígeno en el reactor, lo que es esencial para evitar la combustión no deseada durante el proceso de pirólisis.

#### **4.3.1. PROCESAMIENTO DE LA MUESTRA MEDIANTE PIRÓLISIS PARA LA OBTENCIÓN DEL ACEITE.**

El proceso de pirólisis se realiza para la descomposición de la materia orgánica a altas temperaturas. En este proceso se obtiene material líquido, sólido y gaseoso; de la fracción gaseosa se condensa una parte para obtener una fracción líquida la cual será analizada. Se usa

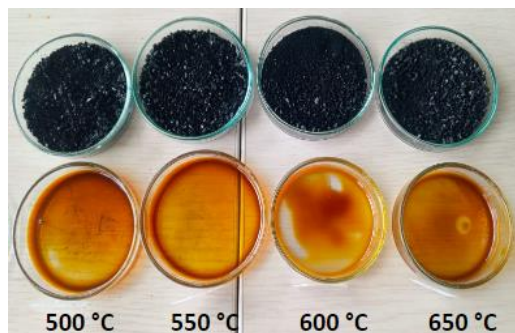
el sistema gas nitrógeno eliminar el oxígeno presente y crear así una atmosfera inerte, a presión de 1 bar y a un flujo de 150 ml/min. En la tabla 2, podemos observar las condiciones de operación (valores de temperatura, tiempo de reacción, tamaño de partícula, presión y flujo de nitrógeno) usados en el proceso de pirólisis.

Antes de iniciar con el desarrollo experimental, fueron realizadas una serie de pruebas iniciales para obtener aceite a las temperaturas de 500°C, 550°C, 600°C, 650°C por triplicado bajo las mismas condiciones de presión, tiempo y flujo de nitrógeno, esto con el fin de conocer un previo comportamiento del caucho de llanta al someterlo a las temperaturas mencionas y así mismo, las posibles variaciones existentes en los aceites obtenidos, y conocer además, el comportamiento de los aceites antes de estar expuestos al medio ambiente.

<b>Variable /Constante</b>	<b>Valor</b>
Temperatura [°C]	500, 550, 600, 650
Tiempo de Reacción [min]	60
Tamaño de Partícula [mm]	5
Presión [bar]	1
Flujo de Nitrógeno [ml/min]	150

**Tabla 2. Condiciones de Operación**

Tras obtener fracciones sólido, líquido y gaseoso del proceso de pirólisis de manera experimental a las temperaturas de, se logra separar el aceite pirolítico producto del proceso que se conserva en frascos sellados para su análisis. El equipo utilizado se encuentra en el laboratorio de combustión de la UIS sede Bucaramanga.



**Figura 4. Fracción líquida y sólida obtenida en las pruebas experimentales iniciales a las temperaturas de 500°C, 550°C, 600°C y 650°C**

#### **4.3.2. ANÁLISIS DE LAS PROPIEDADES DEL ACEITE OBTENIDO**

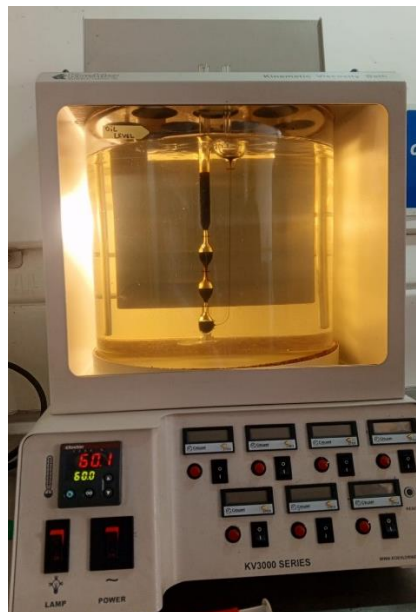
En esta etapa, se buscó determinar las propiedades tribológicas del aceite de pirólisis mediante las normas ASTM D445-12 la cual determina la viscosidad cinemática y la norma ASTM 4052-11 que determina la densidad, con el fin de verificar su calidad a través de la comparación con aceites comerciales; para ello se recolectó una muestra representativa de alrededor de 15ml de los diversos aceites obtenidos a las diferentes temperaturas de pirólisis realizadas (500°C, 550°C, 600°C y 650°C).

Se realizó la prueba ASTM D445-12, la cuál es un estándar utilizado para determinar la viscosidad cinemática de los líquidos incluidos aceites. La instrumentación y materiales usados fueron un baño de viscosidad Cinemática viscosímetro capilar, termostato o baño de agua controlado a la temperatura deseada, aceite de calibración con viscosidad conocida, cronómetro y tubos de vidrio capilares de viscosidad.

#### 4.3.2.1. CÁLCULO DE LA VISCOSIDAD

Para la determinación de la viscosidad fue utilizado un baño de viscosidad cinemática y un viscosímetro calibrado tipo Ostwald, ubicado en el laboratorio de análisis petrofísicos en la sede UIS – Guatiguará. Un baño de viscosidad cinemática es un artefacto utilizado para conservar una temperatura constante controlada para la medición de viscosidad cinemática en líquidos, proporcionando un ambiente térmico estable y controlado con el fin de asegurar precisión y reproducibilidad en las mediciones de la viscosidad.

Su principio de funcionamiento es a través de un sistema de control de temperatura del líquido que contiene el baño (en este caso aceite mineral) el cual debe circular constantemente para asegurar la distribución uniforme de temperatura, creando un ambiente de temperatura controlada y constante; lo que es fundamental en mediciones de viscosidad ya que esta misma varía con la temperatura. En parte superior del baño (tapa) se encuentra un soporte para sostener el tubo capilar, para nuestro caso un viscosímetro tipo capilar de Oswald de referencia CANNON 75X – 250. El viscosímetro de Oswald es un tubo capilar usado para determinar la viscosidad de fluidos mediante la observación del tiempo que un volumen de líquido tarda en desplazarse de un bulbo a otro en el tubo capilar bajo la influencia de la gravedad.



*Figura 5. Baño de Viscosidad Cinemática*



**Figura 6. Viscosímetro CANNON 75X- 250**

Primeramente, antes de realizar la medición de la viscosidad se realizó un filtrado de los aceites a través de filtro tipo malla No.100; esto con el fin de eliminar cualquier suciedad o sedimento en los aceites y que pudiesen generar una obstrucción en el tubo capilar. El filtrado fue realizado dos veces a través de una malla No.100 hasta obtener un líquido sin impurezas ni sedimentos, este procedimiento se realizó con todos los aceites.



**Figura 7. Proceso de Filtrado del Aceite**

Después de filtrado, el aceite es ingresado al tubo capilar por un extremo de este y posteriormente es colocado en el baño de viscosidad cinemática. Una vez puesto el viscosímetro, se succiona el líquido con una bomba manual para llevarlo hasta el otro extremo del tubo y posteriormente, se debe esperar a que el líquido fluya de un extremo a otro y una vez posicionado; se mide el tiempo que tarda el líquido en pasar entre las dos marcas centrales

del tubo capilar. Dicho tiempo, junto con la constante del del tubo capilar (0,005751 a 40°C y 0,007600 a 100°C) se usa para determinar la viscosidad del aceite.

Este procedimiento se repitió con todos los aceites obtenidos a diferentes temperaturas de pirólisis (500°C, 550°C, 600°C y 650°C) y se realizó con baño de viscosidad cinemática a las temperaturas a 30°C, 40°C y 60°C, que son temperaturas permitidas por el equipo usado.

#### 4.3.2.2. CÁLCULO DE LA DENSIDAD

Para realizar la prueba de densidad se usó un picnómetro en de 10 ml; un picnómetro en un instrumento de laboratorio diseñado para medir la densidad de líquidos con alta precisión. Es un recipiente hecho de vidrio que contiene un tapón hermético en su parte superior que contiene una abertura capilar para permitir la entrada y salida de aire y asegurar así un volumen constante del líquido a medir. Se procede a llenar el picnómetro con el líquido de prueba para medir su masa y calcular así su densidad.



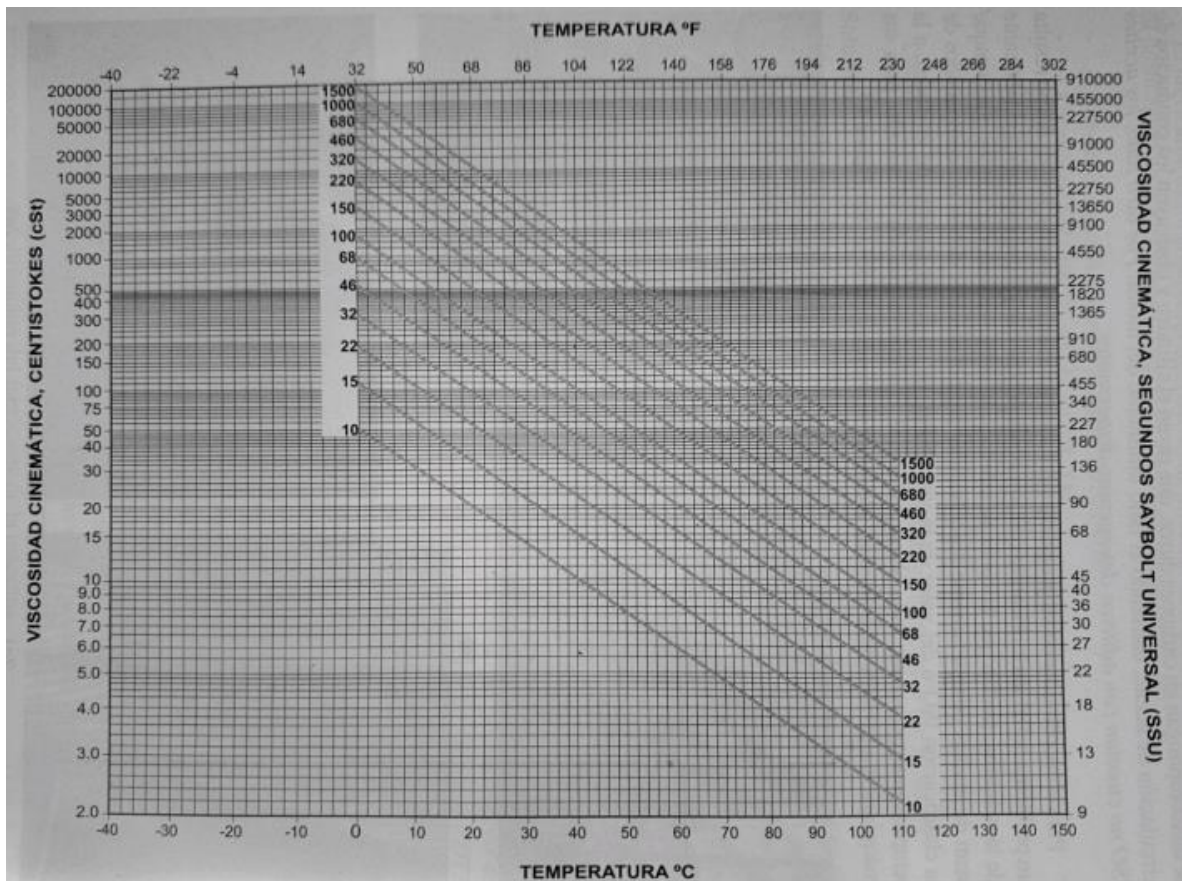
*Figura 8. Medición de la densidad a través de método del Picnómetro*

#### 4.4. CARACTERIZACIÓN DEL ACEITE OBTENIDO POR PIRÓLISIS.

Para la determinación de posibles usos de los aceites obtenidos, se compararon las propiedades obtenidas (Densidad y Viscosidad) con aceites lubricantes comerciales; para hacer la comparación, se halló el grado ISO del aceite según la clasificación de la viscosidad de los aceites industriales en el sistema ISO. Algunos aspectos para tener en cuenta con la clasificación ISO es que únicamente clasifica aceites industriales y lo hace en cSt a 40°C, adicionalmente solamente relaciona la viscosidad del aceite y no tiene nada que ver con su calidad [Albarracín, P. R. (2015). *Tribología y Lubricación* (5a ed. Tomo 1)].

A partir del Gráfico 4.1 ASTM D431 Viscosidad-Temperatura tomado del libro ***Tribología y Lubricación, Tomo 1 5ª Edición (Albarracín, 2015)***. Se halló el grado ISO los aceites

pirolíticos producidos. En la escala vertical de la derecha se observa la viscosidad del aceite en cSt y en la escala horizontal inferior, la temperatura en °C y °F respectivamente. El gráfico es empleado para determinar el grado ISO de un aceite cuando solamente conocemos su viscosidad a cierta temperatura; con este fin, se ubica la viscosidad en la escala respectiva y se traza una línea horizontal que corte con la vertical correspondiente a la temperatura dada. El punto de intersección entre esas dos líneas puede coincidir o no con alguna de las curvas observadas en el gráfico. En caso de no intercepte ninguna de las curvas, se selecciona la curva más cercana al punto, la cual indicaría el grado ISO del aceite [Albarracín, P. R. (2015). *Tribología y Lubricación* (5a ed. Tomo 1)].



**Figura 9. Gráfico 4.1 ASTM D341 Viscosidad-Temperatura (Tomado de Albarracín, P. R. (2015). *Tribología y Lubricación*.5a ed. Tomo 1 p.225)**

## 4.5. ANÁLISIS ECONÓMICO

### 4.5.1. DETERMINACIÓN DE LA VIABILIDAD ECONÓMICA DE LA PRODUCCIÓN DEL ACEITE LUBRICANTE.

Se analizó la viabilidad técnico-económica industrial, se consideraron los costos de equipos, materiales, recursos humanos, mantenimiento, energía, gas, agua y otros costos operativos, especificaciones técnicas, requerimientos del equipo, para realizar proceso de producción, estos costos se proyectaron a un año y se calculó el valor de venta del aceite, seguido de la viabilidad

técnico-económica a escala de laboratorio considerando los costos de recursos humanos, materiales y recursos para obtener el valor del aceite obtenido por prueba.

## 5. ANÁLISIS DE RESULTADOS

### 5.1. PRUEBAS EXPERIMENTALES

En el proceso de pirolisis de llanta se realizaron 12 experimentos a las temperaturas de 500°C ,550°C ,600°C ,650°C por triplicado, posteriormente se realizó el respectivo porcentaje de los subproductos obtenidos en el proceso de pirolisis.

TEMPERATURA	LIQUIDO	SOLIDO	GAS
500	57.77%	35.49%	6.74%
	58.43%	34.33%	7.24%
	56.58%	34.74%	8.69%
550	56.19%	31.64%	12.17%
	55.69%	33.09%	11.21%
	55.73%	32.44%	11.83%
600	52.75%	34.80%	12.45%
	54.67%	34.75%	10.58%
	55.31%	33.93%	10.76%
650	59.37%	34.42%	6.21%
	57.88%	34.38%	7.74%
	56.00%	35.94%	8.06%
TEMPERATURA	LIQUIDO	SOLIDO	GAS
500	57.60%	34.85%	7.56%
550	55.87%	32.39%	11.74%
600	54.24%	34.49%	11.27%
650	57.75%	34.91%	7.34%

*Tabla 3. Tabla de porcentaje de subproductos obtenidos de la pirolisis*

Se observa el comportamiento de la fracción líquida obtenida en el proceso de pirolisis, a la temperatura de 500°C aumenta, a la temperatura de 550°C a 600°C disminuye y vuelve a aumentar la fracción líquida en la temperatura de 650, se obtuvo un porcentaje más alto de fracción líquida en la temperatura de 500°C. Y el más bajo es la temperatura de 600°C, la desviación estándar en la fracción Líquida es de 1.43%, fracción sólida de 1.03% y fracción de gas de 2.04%

Para maximizar el rendimiento de aceite se determinan las mejores condiciones para la producción de aceite están a la temperatura de (502°C) y en un tiempo de reacción de (192 min) Rolando A, Moncada j, Gauthier-Maradei p, Nabarlatz, D. (2013). Estudio preliminar de la producción de aceite y carbón mediante pirólisis intermedia de caucho de llantas usadas, grupo de Investigación interfase, Escuela de Ingeniería Química. Bucaramanga, Santander, Colombia

según (Leung , islam). “a la temperatura de 500°C (1bar) se pueden obtener los mejores rendimientos de aceite debido a que a esta temperatura, los componentes principales del caucho de llanta (NR, SBR y BR) se descomponen casi completamente.” (como se cita en Sánchez, Villamizar (2014).

Según Arteaga, (2012), “el rendimiento de la fracción líquida obtenida en proceso de pirólisis al aumentar la temperatura la fracción líquida aumenta hasta alcanzar su máximo rendimiento cerca de los 600°C. Después de esa temperatura el rendimiento de la fracción líquida disminuye, además al aumentar la temperatura también aumenta la producción de gas no condensables esto se debe a que las altas temperaturas provocan reacciones secundarias de craqueo de los volátiles liberados inicialmente en el pirólisis, lo que favorece la formación de hidrocarburos gaseosos de bajo peso molecular.” (como se cita en Sánchez, Villamizar (2014).

En el estudio realizado por Rofiqul Islam (2008), “se determinó que se obtiene un mayor rendimiento de la fracción sólida en un rango de temperatura de 475-575°C, debido a que este intervalo la descomposición de los neumáticos se completa, formando material carbonáceo, a una temperatura mayor a 475°C, el rendimiento de la fracción líquida disminuye y aumenta el rendimiento de gas es debido a las reacciones de descomposición y carbonización ,por lo tanto, a mayores temperaturas, los rendimientos de gas aumentan “(como se cita en Ochoa ,Mechada , 2018).

## **5.2. ANÁLISIS DE LA VISCOSIDAD**

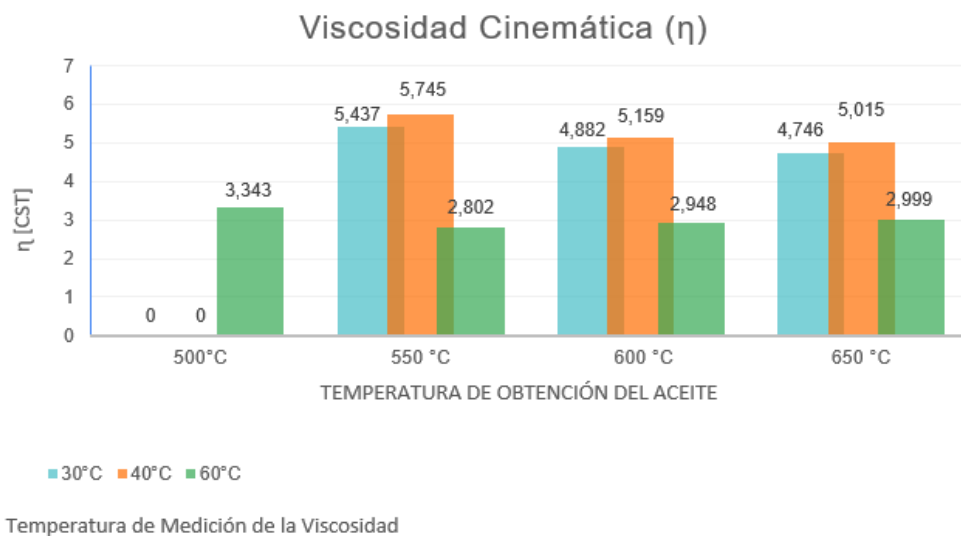
El análisis de la viscosidad se realizó a las temperaturas de 30°C, 40°C y 60°C; las son las temperaturas de operación permitidas por el baño de viscosidad cinemática utilizada en este proceso. Se escogió el calibre del tubo capilar para realizar la prueba según la fluidez del aceite por el mismo, sin embargo, para el aceite obtenido a 500°C no se pudo obtener el valor de la viscosidad ya que, al hacerlo fluir por los tubos capilares, se determinó que no se cuenta con un tubo capilar apto para el mismo, ya que se salía del rango de tiempo establecido (máximo 2000 segundos y mínimo 200 segundos) para el viscosímetro de Oswald según lo establecido por la norma ASTM D445; no obstante, dicha norma está establecida para derivados del petróleo, por lo tanto no podemos saber con exactitud, que tan bien se adapta dicha normatividad a nuestros aceites.

El procedimiento para la determinación de la viscosidad se realizó según lo establecido por la norma ASTM D445, la cual indica que “el tiempo se mide para un volumen fijo de líquido fluya por gravedad a través del capilar de un viscosímetro calibrado en una cabeza de conducción reproducible y a una temperatura estrechamente controlado y conocido. La viscosidad cinemática (valor determinado) es el producto del tiempo de flujo medido y la constante del viscosímetro de calibración. Se necesitan dos de tales determinaciones que para calcular un resultado viscosidad cinemática que es el promedio de dos valores determinados aceptables” [ASTM International. (2017). *Standard test method for kinematic viscosity of transparent and opaque liquids (and calculation of dynamic viscosity)*. (ASTM D445)].

Los valores obtenidos de viscosidad cinemática en cSt para cada aceite a las diferentes temperaturas de viscosidad determinadas se muestran en la **Tabla 4**.

Viscosidad [Cst]			
Aceite	30°C	40°C	60°C
500°C	Fuera de Rango	Fuera de Rango	3.34285
550 °C	5.43739	5.74525	2.80163
600 °C	4.88222	5.15865	2.94808
650 °C	4.74615	5.01487	2.99901

**Tabla 4. Viscosidad cinemática de la fracción líquida**



**Figura 10. Temperatura vs viscosidad cinemática de la fracción líquida**

A partir del Gráfico 4.1 ASTM D431 Viscosidad-Temperatura tomado del libro **Tribología y Lubricación, Tomo 1 5ª Edición (Albarracín, 2015 p.225)** se **halló el grado ISO** los aceites pirolíticos producidos; a pesar de que los valores de la viscosidad y así mismo de las densidades de los obtenidos son diferentes, según el análisis del gráfico mencionado anteriormente, se determinó que los aceites producidos a las diferentes temperaturas se encuentran en la clasificación del grado ISO 10. No es posible hacer la equivalencia de este grado ISO entre los diferentes sistemas de medición de la viscosidad ya que para dicho grado no existe equivalencia en los demás sistemas de medición.

Un aceite de grado ISO 10 se cataloga como un aceite de baja viscosidad, cuyos posibles usos son sistemas hidráulicos de baja presión (prensas hidráulicas de baja presión, gatos hidráulicos entre otros), circuitos de lubricación de baja carga (bombas de vacío, turbinas de baja velocidad entre otras) y husos de hiladoras hidráulicas; no obstante, para la selección de aceite adecuado, es necesario considerar otros factores cómo lo son la temperatura de operación, carga, material de la maquinaria, tiempo de operación entre otros; solamente con el grado ISO y viscosidad de un aceite, no es posible saber con exactitud los posibles usos del mismo.

### 5.2.1. COMPARACIÓN TEÓRICA CON ACEITES COMERCIALES.

Se realizó una comparación teórica teniendo ya los valores de la densidad y la viscosidad de los aceites se encontraron dos aceites comerciales que presentan valores similares a los obtenidos en el presente proyecto; se concluyó que es parecido al aceite Mobil DTE 21, usado en sistemas hidráulicos, en sistemas con engranajes y cojinetes. Este tiene una densidad de 0.87 g/cm<sup>3</sup> y una viscosidad cinemática de 10 cts. a 40°C.

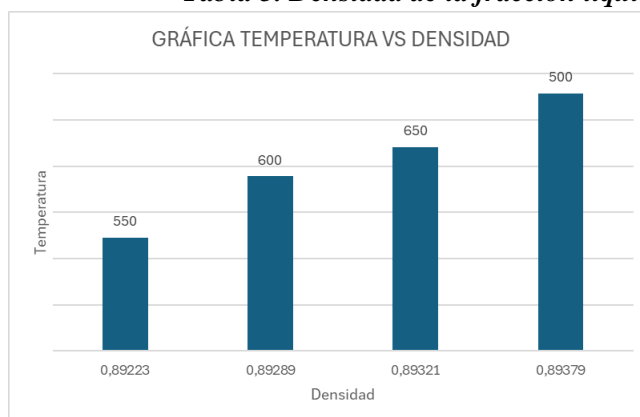
Así mismo, se encontró similitudes con el aceite Castrol Hyspin VG 10, el cual se usa en sistemas hidráulicos, Su viscosidad cinemática es de 10 cSt a 40°C y su la densidad es 0.87 g/cm<sup>3</sup>. Castrol. (s.f.). Hyspin VG 32.

### 5.3. ANÁLISIS DE LA DENSIDAD

Para realizar la prueba de densidad se utilizó la norma ASTM D1217, usamos un picnómetro en de 10 ml ,el picnómetro se lava y seca ,se procede a pesar el picnómetro vacío en una balanza y se toma el dato , se llena el picnómetro con 10 ml de muestra de la fracción líquida ,una vez el picnómetro se llenó se pesa nuevamente en la balanza y se toma el dato este proceso se realizó con las fracciones líquidas a las temperaturas de 500°C ,550°C ,600°C y 650°C obtenidas a través del proceso de pirolisis ,para hallar la densidad se le resto al peso del picnómetro lleno, el peso del picnómetro vacío y se dividido sobre el volumen el picnómetro.

Temp. de Obtención del Aceite [°C]	$\rho@10\text{ml}$ [g/cm <sup>3</sup> ]
500	0.89379
550	0.89223
600	0.89289
650	0.89321

*Tabla 5. Densidad de la fracción líquida*



*Figura 11. Temperatura vs densidad de la fracción líquida*

La densidad de la fracción líquida obtenida a la temperatura de 500,550,600y 650 es similar, al realizar la desviación estándar se obtiene una variación mínima de 0.00065 g/cm<sup>3</sup>, es decir,

se mantiene constante la densidad de la fracción líquida a 500,550,600,650 grados. Según Sánchez, Villamizar (2014) “Las densidades de la fracción líquida obtenida no varía respecto al flujo de nitrógeno ni a los cambios de temperatura.”

La densidad es un indicador de la energía térmica y del funcionamiento del combustible, una mayor densidad de biodiesel genera problemas al ser usados en los motores. Espitia, Delgado, Camargo. (2019). Estimación teórica del efecto de la temperatura en la densidad, viscosidad, poder calorífico, capacidad calorífica y gravedad API de biocombustibles. *Scientia Et Technica*, vol. 24, núm. 2, pp.

Staffell, (2011).” menciona que la densidad del aceite no está relacionada con las variables de las condiciones de operación, la fracción líquida obtenida tiene una densidad promedio de  $948.19 \text{ kg/m}^3$ , el valor de la densidad del diésel comercial es de  $837 \text{ kg/m}^3$ ” (como se cita en Moncada ,2013). La densidad obtenida de la fracción líquida a la temperatura de 500 es de  $893.79 \text{ kg/m}^3$ , similar al valor de la densidad del diésel comercial el cual es  $837 \text{ kg/m}^3$ .

#### 5.4. CÁLCULO DEL PODER CALORÍFICO

Se utilizo una bomba calorimétrica de oxígeno, siguiendo la norma ASTM D240, el poder calorífico obtenido de la fracción líquida a la temperatura de 500 es de  $43.7191 \text{ MJ/Kg}$  para 550 grados es de  $41.6216 \text{ MJ/Kg}$  para 600 grados es de  $41.9883 \text{ MJ/Kg}$  y para 650 grados  $\text{MJ/Kg}$  es de  $44.9456 \text{ MJ/Kg}$ , el poder calorífico a la temperatura de 650 grados es más alto respecto a las demás temperaturas, entre las temperaturas de 550 y 600 grados se mantiene constante y a la temperatura de 500 grados su valor es similar al de 650 grados , esto se ve relacionado a las diferentes temperaturas a las que se realizó la pirolisis, Sánchez, Villamizar (2014) Las densidades de la fracción líquida obtenida no varía respecto al flujo de nitrógeno ni a los cambios de temperatura , estos valores coinciden con los resultados obtenidos por otros autores

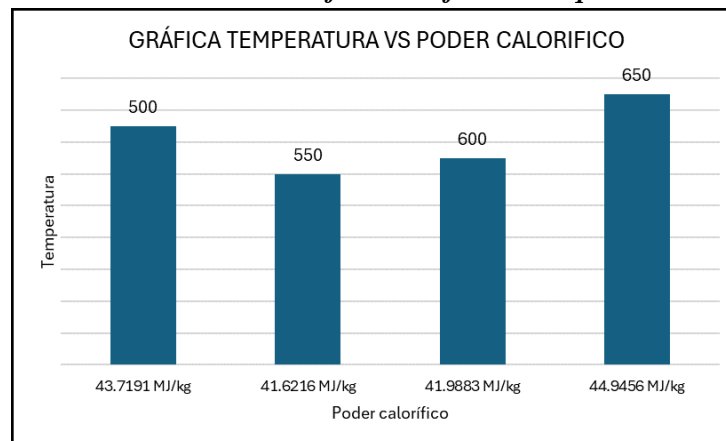
La norma ASTM D 240-19 la cual indica que “Este método de ensayo cubre la determinación del calor de combustión de los combustibles de hidrocarburos líquidos cuya volatilidad oscila entre la de los destilados ligeros y la de los combustibles residuales” [ASTM International. (2019) *Standard Test Method for Heat of Combustion of Liquid Hydrocarbon Fuels by Bomb Calorimeter*. (ASTM D240-19)].

El poder calorífico es una propiedad importante que caracteriza el contenido energético de un combustible, ya sea sólido, líquido o gaseoso; esta propiedad es importante para los aceites vegetales y el biodiesel. Espitia, Delgado, Camargo. (2019). Estimación teórica del efecto de la temperatura en la densidad, viscosidad, poder calorífico, capacidad calorífica y gravedad API de biocombustibles. *Scientia Et Technica*, vol. 24, núm. 2, pp. Según Staffell (2011)” El poder calorífico no cambia con la variación de las condiciones de operación, los valores del Poder Calorífico Superior (PCS) de la fracción líquida obtenida es de  $42,94 \text{ MJ/kg}$ . Este valor es similar al valor obtenido por otros autores, el PCS del diésel comercial, es de  $45,60 \text{ MJ/kg}$  tal como se cita en Moncada (2013).

A la temperatura de 500 la cual es la de mayor rendimiento el poder calorífico es de 43.7191 este se encuentra en un valor similar a obtenido por otros autores siendo un valor cercano al PCS del diésel comercial menor al poder calorífico de diésel comercial

TEMPERATURA	PODER CALORIFICO
500°C	43.7191 MJ/kg
550°C	41.6216 MJ/kg
600°C	41.9883 MJ/kg
650°C	44.9456 MJ/kg

**Tabla 6. Poder calorífico de la fracción líquida**



**Figura 12. Temperatura vs poder calorífico de la fracción líquida**

## 5.5. VIABILIDAD ECONÓMICA

Se realizó un presupuesto a nivel de laboratorio e industrial para implementar una planta de pirolisis de caucho de llanta, se incluye el costo de mano de obra y el costo de materiales y se tuvo en cuenta de depreciación del equipo usado.

DESCRIPCIÓN	DETALLE	UNIDAD	CANTIDAD	COSTO UNIDAD	COSTO ANUAL (COP)
<b>RECURSOS HUMANOS</b>					
MANO DE OBRA OPERATIVA	SALARIOS DEL PERSONAL OPERATIVO 2 OPERARIOS	MES	2	1,300,000	31,200,000
SUB TOTAL					31,200,000
<b>MATERIALES Y RECURSOS</b>					
COSTOS DE ADQUISICIÓN DE LLANTAS	LLANTA	KILO	1	700	2,044,000,000
ENERGÍA Y SERVICIOS	GAS	METRO CUBICO	300000 kcal	2543	64,718,174.15
	ELECTRICIDAD	KW HORA	44.3 kw hora	950	122,816,200
	AGUA	METRO CUBICO	17.8 m3	600	31,128,000
PRECIO DE LA MÁQUINA	VALOR DE ADQUISICIÓN	UNIDAD	1	75,000,000	75,000,000
MANTENIMIENTO Y REPARACIONES	MANTENIMIENTO RUTINARIO	MES	1		90,000,000
MANTENIMIENTO DE LA MÁQUINA	MANTENIMIENTO MENSUAL (10% DEL VALOR DE LA MÁQUINA)	MES	1		22,500,000
SUB TOTAL					2,450,162,374
<b>ALQUILER DEL LUGAR</b>					
ARRIENDO DEL TERRENO E INSTALACIONES	VALOR DE ALQUILER	MES	1	5,000,000	60,000,000
SUB TOTAL					60,000,000
<b>TOTAL</b>					<b>2,460,362,374.15</b>

*Figura 13. Presupuesto pirolisis industrial*

La máquina trabaja ocho horas diarias precio del gas se encuentra 2543 pesos el metro cubico, se usan dos quemadores y cada uno gasta 300000 kcal, el precio por el kw de electricidad es de 950 pesos, el reactor consume 44.3 kw hora, y en agua se consume 17.8 m3 por hora el precio del m3 es de 600 pesos, el valor del salio mínimo actual mente es de 1.300.000 pesos, la Producción anual de será de 1,752,000 kg/año basado en 60% de rendimiento, el costo total del aceite es 1,402.47 COP/kg.

DESCRIPCIÓN	DETALLE	UNIDAD	CANTIDAD	COSTO UNIDAD	COSTO POR PRUEBA (COP)
<b>RECURSOS HUMANOS</b>					
DIRECTOR DE PROYECTO	UIS	HORA	2	100,000	200,000
ESTUDIANTE	ESTUDIANTE	HORA	2	0	0
ESTUDIANTE	ESTUDIANTE	HORA	2	0	0
<b>SUBTOTAL</b>					200,000
<b>MATERIALES Y RECURSOS</b>					
COSTOS DE ADQUISICIÓN DE GAS NITROGENO	GAS NITROGENO	UNIDAD	45000 ml		900
COSTOS DE ADQUISICIÓN DE LLANTAS	LLANTAS	KILO	1	700	700
COSTOS DEL ALCOHOL	ALCOHOL	UNIDAD	500 ml	4,500	4,500
ENERGÍA Y SERVICIOS	LUZ	KW	6.5KW	950	6,175
COSTO DE BANCO	VALOR DE ADQUISICIÓN	UNIDAD	1	3,590,000	3,590,000
MANTENIMIENTO	MANTENIMIENTO MENSUAL (10% DEL VALOR DE LA MÁQUINA)	MES	1	359,000	359,000
<b>SUBTOTAL</b>					3,956,000
<b>TOTAL</b>					<b>4,156,000</b>

**Figura 14. Presupuesto pirolisis a escala de laboratorio**

A escala de laboratorio la pirolisis del cucho de llanta se realiza en dos horas, la cantidad de aceite obtenida por prueba es de 10 ml y el costo total del aceite por prueba es de 23,227 COP/ml.

## CONCLUSIONES

- Se obtuvo las fracciones sólido, líquido y gaseoso del proceso de pirólisis de manera experimental en laboratorio. El aceite obtenido a 500°C, generó el mayor rendimiento en su fracción líquida, siendo este de 57.60% de rendimiento.
- Se determinó que es viable económicamente obtener aceite a través de la pirolisis del caucho de llanta a nivel industrial, contribuyendo a la reducción de la contaminación ambiental producida por las llantas.
- Aunque los valores de la viscosidad y las densidades de los obtenidos son diferentes entre sí, se determinó que todos los aceites producidos a las diferentes temperaturas están en la clasificación del grado ISO 10.
- La normatividad usada para caracterizar los aceites producidos está establecida para derivados del petróleo, por lo que no se puede saber con exactitud que se adapta tan bien a los aceites pirolíticos producidos, ni tampoco hay normatividad para aceites sintéticos que sirvan de referencia exacta. En consecuencia, los resultados presentados son aproximaciones basados en la normatividad existente.

## ANEXO A. ANÁLISIS PRÓXIMO

<b>HUMEDAD</b>					
<b>13/12/2023</b>	<b>PESO</b>	<b>CRISOL</b>	<b>CRISOL+PESO</b>	<b>PRUEBA</b>	<b>HUMEDAD</b>
MUESTRA 1	2.0129	18.0741	20.087	20.082	0.2484%
MUESTRA 2	2.068	18.1083	20.1763	20.1669	0.4545%
MUESTRA 3	2.0025	17.5782	19.5807	19.576	0.2347%
MUESTRA 4	2.0046	18.2645	20.2691	20.264	0.2544%

<b>CENIZAS</b>					
<b>11/12/2023</b>	<b>PESO</b>	<b>CRISOL</b>	<b>CRISOL+PESO</b>	<b>PRUEBA</b>	<b>CENIZAS</b>
MUESTRA 1	2.0079	27.5816	29.5895	27.713	6.5442%
MUESTRA 2	2.013	24.9677	26.9807	25.1013	6.6369%
MUESTRA 3	2.0063	27.0437	29.05	27.1736	6.4746%
MUESTRA 4	2.0615	23.2169	25.2784	23.355	6.6990%

MAT. VOLATIL					
5/12/2023	PESO	CRISOL	CRISOL+PESO	PRUEBA	MAT. VOLATIL
MUESTRA 1	2.0335	38.8463	40.8798	39.5725	64.0398%
MUESTRA 2	2.003	41.4437	43.4467	42.1501	64.2784%
MUESTRA 3	2.0144	36.9022	38.9166	37.6316	63.5560%
MUESTRA 4	2.016	40.99	43.006	41.6893	65.0581%

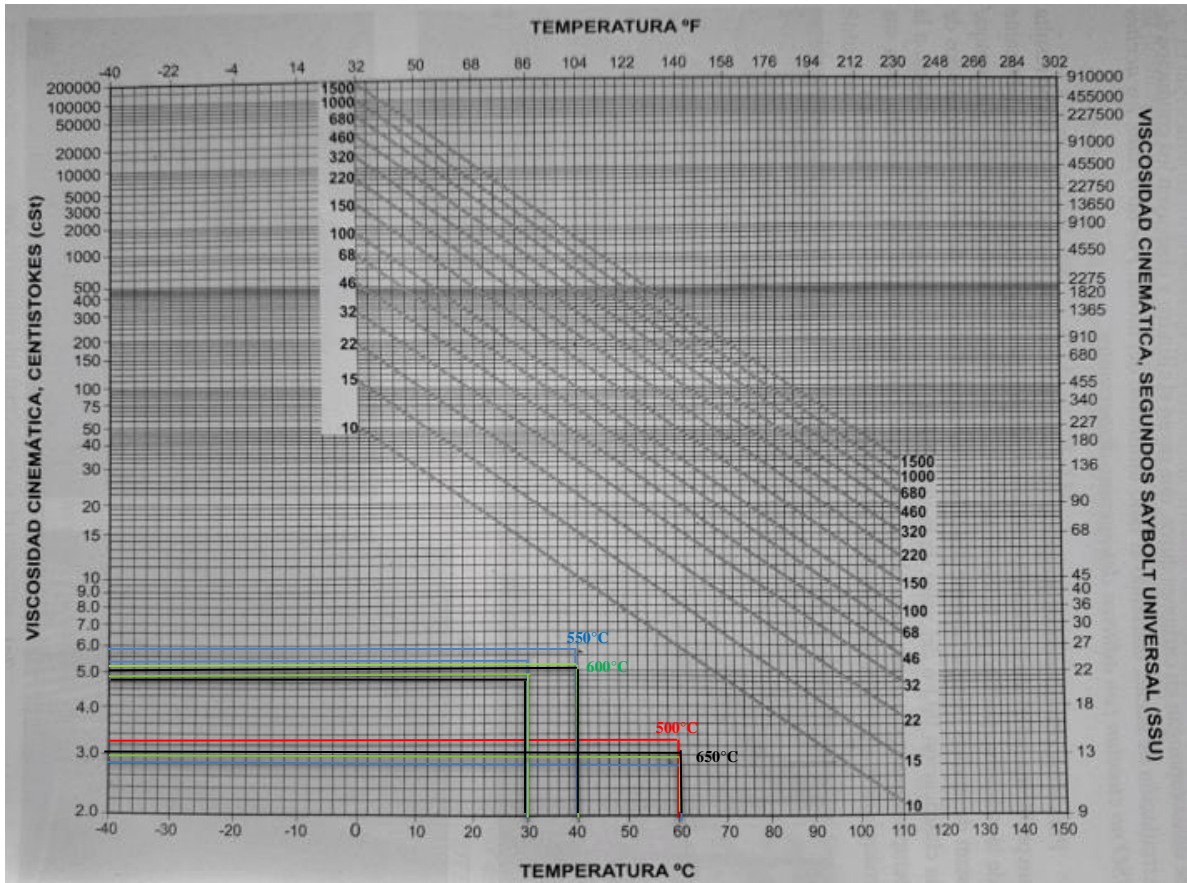
### ANEXO B. PIROLISIS DE CAUCHO DE LLANTA

TEMPERATURA	MASA	LIQ ERLENMEYER	LIQ CONDENSADOR	SOLIDO	GAS SIN CONDENSAR	LIQUIDO	SOLIDO	GAS
500	5.0444	2.7379	0.1765	1.7902	0.3398	57.77%	35.49%	6.74%
	5.0591	2.7753	0.1808	1.7366	0.3664	58.43%	34.33%	7.24%
	5.0363	2.6712	0.1782	1.7494	0.4375	56.58%	34.74%	8.69%
550	5.0101	2.539	0.2763	1.585	0.6098	56.19%	31.64%	12.17%
	5.0729	2.5292	0.2961	1.6788	0.5688	55.69%	33.09%	11.21%
	5.0177	2.554	0.2425	1.6278	0.5934	55.73%	32.44%	11.83%
600	5.085	2.5392	0.1429	1.7696	0.6333	52.75%	34.80%	12.45%
	5.0186	2.6352	0.1084	1.7439	0.5311	54.67%	34.75%	10.58%
	5.067	2.5547	0.2479	1.7191	0.5453	55.31%	33.93%	10.76%
650	5.0655	2.6499	0.3573	1.7436	0.3147	59.37%	34.42%	6.21%
	4.9256	2.629	0.2219	1.6936	0.3811	57.88%	34.38%	7.74%
	4.8462	2.5578	0.1563	1.7416	0.3905	56.00%	35.94%	8.06%

### ANEXO C. VISCOSIDAD

Viscosidad a 27,9°C			
Temp. de Obtención del Aceite [°C]	V [cm <sup>3</sup> ]	t [seg]	Viscosidad (η) [cSt]
500	12	224	8.21208
550		204	7.45666
600		175	6.42101
650		181	6.62814
Viscosidad a 30°C			
Temp. de Obtención del Aceite [°C]	V [cm <sup>3</sup> ]	t [seg]	Viscosidad (η) [cSt]
500	12	1116	Fuera del Rango
550		999	5.43739
600		897	4.88222
650		872	4.74615
Viscosidad a 40°C			
Temp. de Obtención del Aceite [°C]	V [cm <sup>3</sup> ]	t [seg]	Viscosidad (η) [cSt]
500	12	1116	Fuera del Rango
550		999	5.74525
600		897	5.15865
650		872	5.01487
Viscosidad a 60°C			
Temp. de Obtención del Aceite [°C]	V [cm <sup>3</sup> ]	t [seg]	Viscosidad (η) [cSt]
500	12	525	3.34285
550		440	2.80163
600		463	2.94808
650		471	2.99901

### ANEXO D. DETERMINACIÓN DEL GRADO ISO DEL ACEITE SEGÚN LA VISCOSIDAD



### ANEXO E. DESVIACION ESTANDAR DE LA DENSIDAD

TEMPERATURA	$X_i$	$X_i - X$	$(X_i - X)^2$
500	0,89379	0,00076	5,776E-07
550	0,89223	-0,0008	6,4E-07
600	0,89289	-0,00014	1,96E-08
650	0,89321	0,00018	3,24E-08
		$\Sigma =$	1,2696E-06
Número de datos	4		
Valor medio	0,89303		
Desviación	0,00065054		

### REFERENCIAS

Albarracín, P. [Pedro]. (2015). *Tribología y lubricación: Tomo 1 (5.a ed.)*.

Sánchez, y., & Villamizar, d. (2014). *estudio experimental de la pirólisis intermedia de caucho de llanta usada para producción de combustibles líquidos*. universidad industrial de Santander.

Moncada, s. (2013). *análisis de la producción de aceite y char por pirólisis intermedia del caucho proveniente de llantas usada*. universidad industrial de Santander.

Los neumáticos son una gran fuente de contaminación por plástico. (2019, 24 septiembre). *National Geographic*. <https://www.nationalgeographic.es/medioambiente/2019/09/neumaticos-gran-fuente-contaminacion-plastico>

Ministerio de Ambiente, Vivienda y Desarrollo Territorial. (2010). *Sistemas de Recolección Selectiva y Gestión Ambiental de Llantas Usadas*. Resolución 1457

Castiblanco, C. (2020, 29 octubre). ¿Conoces el proceso para reciclar llantas usadas en Bogotá? Bogotá. <https://bogota.gov.co/mi-ciudad/ambiente/control-la-disposicion-de-llantas-usadas-en-bogota>

*De neumático a combustible y energía eléctrica*. (s. f.). Interempresas. <https://www.interempresas.net/Automocion/Articulos/110209-De-neumatico-a-combustible-y-energia-electrica.html>

Pirólisis, un proceso para derretir la biomasa. (2012). *Revista de Química PUCP*, 26(1-2). <https://revistas.pucp.edu.pe/index.php/quimica/article/download/5547/5543/>

Acosta, R. A. (2013, 30 septiembre). *Estudio preliminar de la producción de aceite y carbón mediante pirólisis intermedia de caucho de llantas usadas*. <https://ojs.uniquindio.edu.co/ojs/index.php/riuuq/article/view/215>

Matute, D., & Ramos, R. (2015). *Análisis de las emisiones producidas en la quema de combustibles líquidos obtenidos en el proceso de pirólisis de caucho vulcanizado* [Tesis Previa a la obtención del título de Ingeniero Ambiental]. Universidad Politécnica Salesiana Sede Cuenca.

Fuel and Chemical Properties of Waste Tire Pyrolysis Oil Derived from a Continuous Twin-Auger Reactor Felipe Campuzano, Abdul Gani Abdul Jameel, Wen Zhang, Abdul-Hamid Emwas, Andrés F. Agudelo, Juan Daniel Martínez, and S. Mani Sarathy *Energy & Fuels* 2020

Miranda, R. del C., Segovia, C., & Sosa, C. (2006, julio). *Pirólisis de Llantas Usadas : Estudio Cinético*. Recuperado 25 de junio de 2023, de <https://core.ac.uk/download/pdf/76600976.pdf>

Sicma. (2023, 13 marzo). Lubricación industrial: todo lo que necesitas saber. *Soluciones Integrales para la Industria 4.0*. <https://www.sicma21.com/que-es-lubricacion-industrial/>

Marquez, I. (2020, 2 noviembre). 6 tipos de lubricantes industriales básicos para una lubricación de alto desempeño | Artículos Técnicos | Interlub. *Blog Interlub*. <https://blog.interlub.com/es/blog/6-tipos-lubricantes-industriales-basicos/>

J, P. P., & Merino, M. (2021). Viabilidad - Qué es, definición y concepto. *Definición.de*. <https://definicion.de/viabilidad/>.

Generator, M. (s. f.). *Vista de Estudio preliminar de la producción de aceite y carbón mediante pirólisis intermedia de caucho de llantas usadas*. <https://revistas.uniquindio.edu.co/ojs/index.php/riuq/article/view/215/202>

Peña, D., Farfán, O., & Prieto, M. (2019). *Implementación de una planta para la generación de diesel sintético a partir de llantas usadas por medio del proceso de pirolisis, en la ciudad de Bogotá* [Tesis de Especialista, Universidad Piloto de Colombia]. <https://repository.unipiloto.edu.co/handle/20.500.12277/6382?show=full>

*Mobil DTETM Oil named Series*. (s. f.). <https://www.mobil.com/en-my/industrial/pds/gl-xx-mobil-dte-named-series>

