

**CARACTERIZACIÓN DEL PROCESO DE PIRÓLISIS
DE
ACEITES DE MOTOR USADO**

EDWARD JOHAN VILLAMIZAR CUADROS

**PROGRAMA DE INGENIERIA MECANICA
DEPARTAMENTO DE INGENIERIA MECANICA,
MECATRONICA E INDUSTRIAL
FACULTAD DE INGENIERIAS Y ARQUITECTURAS**



UNIVERSIDAD DE PAMPLONA
PAMPLONA, septiembre 9 de 2021

CARACTERIZACIÓN DEL PROCESO DE PIRÓLISIS DE ACEITES DE MOTOR USADO

EDWARD JOHAN VILLAMIZAR CUADROS

**Trabajo de grado presentado como requisito para optar al título de
INGENIERO MECÁNICO**

Director: JAMES RONALD VERA ROZO

Magister en Ingeniería Mecánica
email: james.vera@unipamplona.edu.co

Director México: JOSE MANUEL RIESCO AVILA

Doctor en Ingeniería Mecánica
email: riesco@ugto.mx

**PROGRAMA DE INGENIERIA MECANICA
DEPARTAMENTO DE INGENIERIA MECANICA,
MECATRONICA E INDUSTRIAL
FACULTAD DE INGENIERIAS Y ARQUITECTURAS
UNIVERSIDAD DE PAMPLONA**

Pamplona, septiembre 9 de 2021

Dedicatoria

Este trabajo investigativo está dedicado a todas las personas y hechos que directa e indirectamente han influido en mi vida y han formado a su servidor.

AGRADECIMIENTOS

A la vida por permitirme vivir este momento.

A mis padres y hermano por apoyarme en cada proyecto que me he planteado y enseñarme que la vida tiene altos y bajos.

A mi abuelo por el apoyo y el interés en este proyecto investigativo.

Al director de este trabajo por las enseñanzas y la paciencia.

A mí mismo por no desfallecer en el camino.

TABLA DE CONTENIDO

| | |
|--|----|
| 1. Introducción | 14 |
| 2. Justificación..... | 16 |
| 3. Objetivos | 17 |
| 3.1 Objetivo general..... | 17 |
| 3.2 Objetivos específicos..... | 17 |
| 4. La pirólisis alternativa energetica | 18 |
| 4.1 Motores de combustión interna..... | 18 |
| 4.2 Aceite lubricante | 21 |
| 4.3 Pirólisis | 25 |
| 4.3.1 Reacción de pirólisis | 26 |
| 4.3.2 Pirólisis de aceite usado de motor..... | 27 |
| 4.3.3 Revisión de pirólisis del aceite de moto usador | 29 |
| 4.4 Destilación y fraccionamiento de productos petrolíferos..... | 34 |
| 4.5 Diseño de experimentos | 37 |
| 4.6 Instrumentación y control | 39 |
| 5. Selección y construcción del equipo de pirólisis..... | 40 |
| 5.1 pirolizador | 40 |
| 5.1.1 Estructura..... | 42 |
| 5.1.2 Horno | 43 |
| 5.1.3 Condensador..... | 44 |
| 5.1.4 Vidriería..... | 45 |
| 5.2 Sistema de adquisición control | 46 |
| 5.2.1 Interfase labview-Arduino..... | 49 |
| 5.2.2 Cuantificador de kwh..... | 50 |
| 6. Metodología..... | 51 |
| 6.1 Materia prima..... | 51 |
| 6.2 Proceso de pirólisis..... | 52 |
| 6.3 Diseño de experimentos | 52 |

| | | |
|---------|---|----|
| 6.4 | Caracterización de productos | 53 |
| 7. | Resultados | 56 |
| 7.1 | Materia prima | 56 |
| 7.1.1 | Caracterización del aceite residual..... | 56 |
| 7.1.2 | Curvas de calentamiento y conversión..... | 56 |
| 7.2 | Resultados diseño de experimento..... | 58 |
| 7.2.1 | Poder calorífico | 61 |
| 7.2.1.1 | Influencia experimental de los factores..... | 61 |
| 7.2.2 | Producto líquido (fracción liviana) | 61 |
| 7.2.2.1 | Influencia experimental de los factores..... | 62 |
| 7.2.3 | Sólidos (Cenizas) | 62 |
| 7.2.3.1 | Influencia experimental de los factores..... | 62 |
| 7.2.4 | Gases no condensables..... | 63 |
| 7.2.4.1 | Influencia experimental de los factores..... | 63 |
| 7.2.5 | Producto Líquido (fracción pesada)..... | 64 |
| 7.2.5.1 | Influencia experimental de los factores..... | 64 |
| 7.2.6 | Análisis de composición del producto líquido..... | 65 |
| 7.2.6.1 | Influencia experimental de los factores..... | 65 |
| 7.2.7 | Energía Consumida..... | 69 |
| 7.2.7.1 | Influencia experimental de los factores..... | 69 |
| 7.2.8 | Densidad..... | 70 |
| 7.2.8.1 | Influencia experimental de los factores..... | 70 |
| 7.3 | Discusión de resultados..... | 71 |
| 7.3.1 | Poder calorífico | 71 |
| 7.3.2 | Densidad..... | 72 |
| 7.3.3 | Análisis de composición | 72 |
| 7.3.4 | Rendimientos líquidos | 73 |
| 8. | Conclusiones..... | 75 |
| 9. | Productos de divulgación científica | 76 |
| 10. | Recomendaciones y trabajos futuros..... | 77 |

| | |
|--|-----|
| Referencias bibliográficas..... | 78 |
| Anexos..... | 85 |
| Anexo 1: Artículo escrito para el XXVI verano de la ciencia..... | 85 |
| Anexo 2: Constancia de participación en XXVI verano de la ciencia..... | 86 |
| Anexo 3: Artículo escrito para el II COIIM..... | 87 |
| Anexo 4: Constancia de aceptación del artículo escrito para el II COIIM..... | 88 |
| Anexo 5: Cronograma de ponencias II COIIM..... | 89 |
| Anexo 6: Diagrama de bloques de la programación realizada en labview..... | 90 |
| Anexo 7: Código de programación realizado en Arduino para el control del equipo pirolizador..... | 91 |
| Anexo 8: Datasheet de componentes del esquema eléctrico y de control..... | 93 |
| DS12B20..... | 93 |
| MAX6675..... | 94 |
| Relé de estado sólido..... | 95 |
| Arduino MEGA 2560..... | 96 |
| Analizador de corriente..... | 97 |
| Anexo 9: Informes de análisis de composición de carbonos..... | 98 |
| Experimento 1..... | 98 |
| Experimento 2..... | 99 |
| Experimento 3..... | 100 |
| Experimento 4..... | 101 |
| Experimento 5..... | 102 |
| Experimento 6..... | 103 |
| Diesel..... | 104 |

LISTA DE TABLAS

| | |
|--|----|
| Tabla 1 Composición media de aceites base. | 22 |
| Tabla 2. Resumen de estudios de pirólisis de aceite usado de motor. | 30 |
| Tabla 3. Resumen propiedades obtenidas por otros autores comparables con las medidas en este estudio. | 33 |
| Tabla 4. Componentes usados en el sistema de adquisición y control de datos. ... | 48 |
| Tabla 5. Parámetros experimentales. | 53 |
| Tabla 6. Propiedades del aceite virgen y usado. | 56 |
| Tabla 7. Variables de respuesta para el diseño experimental. | 58 |
| Tabla 8. Resultados de las variables de respuesta respecto a los factores experimentales..... | 60 |
| Tabla 9. Análisis de Varianza para C ₇ -C ₁₀ liq. | 66 |
| Tabla 10. Análisis de Varianza para C ₁₁ -C ₁₄ liq. | 67 |
| Tabla 11. Análisis de Varianza para C ₁₅ -C ₃₀ liq. | 68 |
| Tabla 12. Resumen y comparativa del análisis de composición del producto líquido. | 73 |

LISTA DE FIGURAS

| | |
|--|----|
| Figura 1. Línea de tiempo de los sucesos más relevantes en la historia de los motores de combustión interna..... | 19 |
| Figura 2. Demanda de aceites lubricantes por regiones geográficas a nivel mundial, 2017 (2007)..... | 21 |
| Figura 3. Clasificación de los lubricantes. | 23 |
| Figura 4. Conceptualización gráfica del proceso de pirólisis. | 25 |
| Figura 5. Montaje en cascada para el tratamiento de aceite residual implementado por Li [47]..... | 28 |
| Figura 6. Esquema de la destilación fraccionada del petróleo crudo para la obtención de productos petrolíferos. | 35 |
| Figura 7 Descripción gráfica del diseño de experimentos factorial 2^2 con punto central en una cara. | 37 |
| Figura 8. Lógica de la instrumentación y el control..... | 39 |
| Figura 9. Reactor pirolizador usado..... | 41 |
| Figura 10. CAD del equipo pirolizador usado..... | 41 |
| Figura 11. Esquema del reactor pirolizador. | 42 |
| Figura 12. Estructura del equipo pirolizador. | 42 |
| Figura 13. Horno aislante usado en el reactor pirolizador..... | 43 |
| Figura 14. Condensador concéntrico usado en el reactor pirolizador. | 44 |
| Figura 15. Vidriería usada en el equipo pirolizador..... | 45 |
| Figura 16. Caja de control usada en el reactor pirolizador..... | 46 |
| Figura 17. Esquema eléctrico empleado en el equipo pirolizador..... | 46 |
| Figura 18. diagrama de flujo del control implementado. | 49 |
| Figura 19. Interfaz gráfica desarrolla en LabVIEW. | 50 |
| Figura 20. Interfaz de medidor de parámetros eléctricos..... | 50 |
| Figura 21. Muestra del aceite lubricante usado 20W50. | 51 |
| Figura 22. Diagrama de flujo del proceso experimental..... | 52 |
| Figura 23. Curvas de calentamiento del aceite usado 20W50 con temperaturas límite de 390 °C y 450 °C, y velocidades de calentamiento de 15.9 °C/min, 19.2 °C/min y 22.5 °C/min. | 57 |
| Figura 24. Curvas de conversión calentamiento del aceite usado 20W50 con temperaturas límite de 390 °C y 450 °C, y velocidades de calentamiento de 15.9 °C/min, 19.2 °C/min y 22.5 °C/min..... | 58 |
| Figura 25. Producto líquido obtenido. | 59 |
| Figura 26. Diagrama de Pareto estandarizado para poder calorífico..... | 61 |
| Figura 27. Diagrama de Pareto estandarizado para producto líquido..... | 62 |

| | |
|--|----|
| Figura 28. Diagrama de Pareto estandarizado para sólidos (Cenizas)..... | 63 |
| Figura 29. Diagrama de Pareto estandarizado para gases no condensables..... | 64 |
| Figura 30. Diagrama de Pareto estandarizado para residuo líquido..... | 65 |
| Figura 31. Diagrama de Pareto estandarizado para fracción liviana de hidrocarburos..... | 66 |
| Figura 32. Diagrama de Pareto estandarizado para fracción media de hidrocarburos..... | 67 |
| Figura 33. Diagrama de Pareto estandarizado para fracción pesada de hidrocarburos..... | 69 |
| Figura 34. Diagrama de Pareto estandarizado para la energía consumida. | 70 |
| Figura 35. Diagrama de Pareto estandarizado para densidad..... | 71 |
| Figura 36. Rendimientos de los productos obtenidos de la pirólisis de aceite usado de motor..... | 74 |

RESUMEN EXTENDIDO

Influencia de la velocidad de calentamiento en la pirólisis de aceite lubricante usado

Rate heating influence in to pyrolysis of waste lubricating oil

Edward J. Villamizar-Cuadros¹, James R. Vera-Rozo², Elkin G. Florez-Serrano¹, José M. Riesco-Ávila²

¹ GIMUP, Departamento de Ingeniería Mecánica, Universidad de Pamplona, Norte de Santander, Colombia.
Email: eflorez@unipamplona.edu.co

²División de Ingenierías, Campus Irapuato-Salamanca, Universidad de Guanajuato, México.
Email: riesco@ugto.mx

Abstract: Used motor oil is a waste that causes great pollution due to the presence of heavy metals and compounds derived from hydrocarbons. One of the alternatives for the correct treatment of this waste is recycling and revaluation by the pyrolysis process, which allows obtaining alternative fuels and low percentages of waste. In this work, the pyrolysis of the lubricating oil used is evaluated by means of a design of experiments that compares three heating speeds (22.5, 19.2 and 15.9 °C/min) with a maximum pyrolysis temperature of 420 °C. For the characterization of the products obtained, the density, calorific value and carbon count analysis by gas chromatography are determined. The highest yield of 52.2% occurs at a heating rate of 22.5 °C/min. The composition analysis of the liquid product of pyrolysis at a heating rate of 22.5 °C/min shows percentage of carbons similar to commercial diesel.

Keywords: Pyrolysis, waste engine oil, heat rate.

Resumen: El aceite de motor usado es un residuo que ocasiona gran contaminación por la presencia de metales pesados y compuestos derivados de hidrocarburos. Una de las alternativas para el correcto tratamiento de este residuo es el reciclaje y revalorización por el proceso de pirólisis, que permite la obtención de combustibles alternativos y bajos porcentajes de residuos. En este trabajo se evalúa la pirólisis del aceite lubricante usado mediante un diseño de experimentos que compara tres velocidades de calentamiento (22.5, 19.2 y 15.9 °C/min) con una máxima temperatura de pirolisis de 420 °C. Para la caracterización de los productos obtenidos se determina la densidad, poder calorífico y análisis de conteo de carbonos por cromatografía de gases. El mayor rendimiento de 52.2% se presenta a una velocidad de calentamiento de 22.5 °C/min. El análisis de composición del producto líquido de la pirólisis a una velocidad de calentamiento de 22.5 °C/min presenta porcentaje de carbonos similar al diesel comercial.

Palabras clave: Pirólisis, aceite de motor usado, velocidad de calentamiento.

1. Introducción

El uso de los motores de combustión interna y actualmente los alternativos eléctricos, se han convertido en las únicas fuentes de movimiento para vehículos de

transporte personal, pasajeros o carga por medios terrestres, marítimos o aéreos; consecuencia del uso desaforado de cualquier componente móvil como cigüeñales, válvulas, transmisiones, etc., se requiere la

presencia de lubricantes como grasas y/o aceites obtenidos típicamente de bases nafticas de fuentes fósiles como el petróleo [1]. Dichos lubricantes deben ser remplazados dependiendo de su exposición, temperatura de operación y horas de uso [2]; puntualmente en los motores de combustión interna se remplaza el aceite lubricante del motor entre los 5 000 y los 10 000 km de recorrido, lo que genera aproximadamente una cantidad anual de 45 millones de toneladas de aceite usado, de los cuales, solo el 40% es recolectado, dejando un 60% sin un control o disposición adecuada [3]. Una alternativa para la disminución de este elemento contaminante debido a la presencia de elementos como hidrocarburos y metales pesados, es la revalorización para usos secundarios o generación de productos de valor comercial [4].

Se han impulsado investigaciones enfocadas en el desarrollo de metodologías de reciclaje o reutilización de aceites usados de motor como la hidrogenación [5], la destilación al vacío [6] o la pirólisis [7] [8], siendo la pirólisis un proceso termoquímico que consiste en la descomposición de la materia orgánica a altas temperaturas en ausencia de oxígeno, cuyos productos (líquidos, gases y carbón residual) pueden ser usados como materias primas o combustibles para otros procesos.

En este trabajo se presenta el proceso de pirólisis de aceite lubricante usado con temperatura de consigna de 420 °C, a velocidades de calentamiento de 22.5, 19.2 y 15.9 °C/min.

2. Materiales y métodos

2.1 Materiales

El aceite utilizado en este trabajo es un residuo de aceite lubricante 20W50, de color oscuro similar al negro del crudo, se encuentra en estado líquido de viscosidad media, no soluble en agua y con presencia de partículas sólidas granulares. La caracterización se realiza determinando la densidad (ASTM D 1298), viscosidad (ASTM D 445) e índice de viscosidad (DIN 2909).

2.2 Métodos

Los productos son obtenidos por un reactor de lotes, construido con acero comercial, que cuenta con tres secciones (ver Figura 1): calentamiento por una resistencia eléctrica de 1000 W y capacidad de 250 mL de muestra, condensación refrigerada por agua con caudal de 3.3 L/min y depósito 16 L; y sección de recuperación con capacidad de 250 ± 2 mL. El tiempo de duración de cada experimento es de 90 minutos.

2.3 Caracterización del producto líquido

Para la caracterización del producto líquido obtenido se determinan las siguientes propiedades:

- Densidad bajo la norma ASTM D 1298.
- Poder calorífico ASTM D 240.
- Análisis de composición de carbonos por cromatografía de gases.

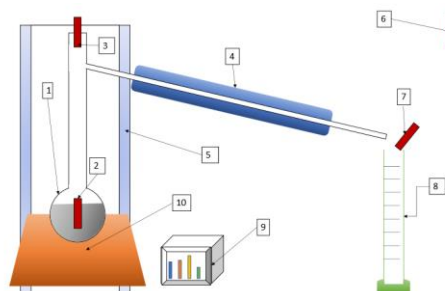


Figura 1. Esquema del equipo (1. Balón de destilación, 2. Termopar de líquido, 3. Termopar de vapor, 4. Condensador concéntrico, 5. Pared aislante cilíndrica, 6. Sensor temperatura ambiente, 7. Sensor temperatura producto, 8. Probeta forma alta Clase B, 9. Caja de control, 10. Resistencias eléctricas). Fuente [Autores].

3. Resultados

3.1 Caracterización de aceite residual

Se encuentra que el aceite 20W50 usado muestra una densidad de 867 ± 0.1 kg/m³, una viscosidad cinemática a 40 °C de 137.8 mm²/s y a 100 °C de 25.4 mm²/s, para un índice de viscosidad de 220. Lo que, en comparativa con el aceite comercial, corresponde a una disminución de la viscosidad a 40 °C del 10.5% y un aumento en la viscosidad a 100 °C del 33.7%.

3.2 Caracterización del producto líquido

Las propiedades de los productos líquidos obtenidos son presentadas en la tabla 1. La gravedad específica reporta valores similares entre los experimentos con variabilidad inferior al 1%. El poder calorífico de los tres experimentos es semejante entre ellos y en general al diesel comercial con valores de 45.85 MJ/kg. Por otro lado, el análisis de composición muestra un comportamiento similar entre los experimentos a 19.2 y 15.9 °C/min donde el porcentaje de carbonos ligeros y medianos es de 30% y 35%, respectivamente. Sin embargo, para el experimento a 22.5 °C/min el número de carbonos es muy similar al diesel comercial, con mayor presencia de hidrocarburos pesados y menor presencia de ligeros, en comparación con los datos obtenidos de los otros dos experimentos.

3.3 Consumo energético

El consumo energético de los diferentes experimentos se presenta en la tabla 1. En esta tabla se aprecia que no hay una relación concluyente entre la velocidad de

calentamiento y el consumo energético pues los valores reportados tienen una variabilidad inferior al 5% con un consumo promedio de 1.53 kW/h, para un experimento de 90 minutos.

3.4 Rendimientos

Los rendimientos líquidos son presentados en la Figura 2 indican una tendencia de mayor rendimiento en la máxima velocidad de calentamiento de 22.5 °C, con un rendimiento máximo de líquido de 52.2%. Los resultados encontrados a bajas temperaturas respecto a su composición son acordes a los valores de los rendimientos, donde aparentemente la conversión termoquímica se está efectuando de manera similar. Por otro lado, los residuos líquidos producidos al elevar la temperatura para una descomposición rápida, no es

posible caracterizarlos por cromatografía de gases, debido a su alta viscosidad, pero presentan un poder calorífico en promedio de 43.1 MJ/kg.

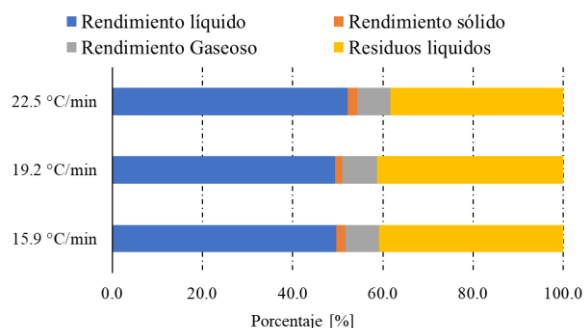


Figura 2. Rendimientos para las velocidades de calentamiento. Fuente:[autores]

Tabla 1. Propiedades y características de los productos obtenidos.

| Velocidad de calentamiento [°C/min] | 15.9 | 19.2 | 22.5 | Diesel comercial |
|--|--------------|-------------|--------------|-------------------|
| Energía consumida [kW/h] | 1.51±0.003 | 1.61±0.002 | 1.48±0.008 | N.A. ⁺ |
| Gravedad específica* | 0.787 ±0.007 | 0.780±0.004 | 0.788 ±0.004 | 0.850 |
| Poder calorífico [MJ/kg] | 45.87 ±0.03 | 45.91 ±0.14 | 45.79 ±0.05 | 43.1 |
| Análisis de composición** | | | | |
| C ₇ -C ₁₀ [% kg/kg] | 30.7 ± 0.40 | 31.0 ±0.86 | 21.0 ±0.59 | 9.11 |
| C ₁₁ -C ₁₄ [% kg/kg] | 34.0 ± 1.04 | 35.4±0.46 | 29.8±2.31 | 38.2 |
| C ₁₅ -C ₃₀ [% kg/kg] | 35.0±0.89 | 33.2±1.67 | 48.8±1.67 | 52.68 |

*La gravedad específica es determinada con una densidad de referencia del agua a 4 °C de 1000 kg/m³.

**Porcentaje de carbonos respecto a fracciones de hidrocarburos ligeras, medias y pesadas.

⁺N.A. No aplica.

Conclusiones

En este trabajo se evaluó el comportamiento de los productos líquidos obtenidos de la pirólisis de aceite lubricante 20W50 usado, variando la velocidad de calentamiento. Al comparar las características y propiedades de los productos líquidos se observa una tendencia constante en propiedades como el poder calorífico y la gravedad específica, y la energía consumida se mantiene constante a lo largo de los tres experimentos. Sin embargo, en el caso del análisis de composición, los resultados más similares a un combustible comercial tipo diesel y mejor rendimiento se obtienen bajo una velocidad de calentamiento de 22.5 °C/min.

Referencias

[1] D. I. Osman, S. K. Attia, and A. R. Taman, "Recycling of used engine oil by different solvent," *Egypt. J. Pet.*, vol. 27, no. 2, pp. 221–225, Jun. 2018.

[2] Z. H. Al-Saffar *et al.*, "A review on the usage of waste engine oil with aged asphalt as a rejuvenating agent," *Mater. Today Proc.*, vol. 42, pp. 2374–2380, Jan. 2021.

[3] R. Maceiras, V. Alfonsín, and F. J. Morales, "Recycling of waste engine oil for diesel production," *Waste Manag.*, vol. 60, pp. 351–356, Feb. 2017.

[4] N. Patel, K. P. Shadangi, and P. K. Kar, "Characterization of waste engine oil derived pyrolytic char (WEOPC): SEM, EDX and FTIR analysis," *Mater. Today Proc.*, vol. 38, pp. 2866–2870, Jan. 2021.

[5] C. Tóth, D. Sági, and J. Hancsók, "Diesel Fuel Production by Catalytic Hydrogenation of Light Cycle Oil and Waste Cooking Oil Containing Gas Oil," *Top. Catal.*, vol. 58, no. 14–17, pp. 948–960, Oct. 2015.

[6] I. Hamawand, T. Yusaf, and S. Rafat, "Recycling of Waste Engine Oils Using a New Washing Agent," *Energies*, vol. 6, no. 2, pp. 1023–1049, Feb. 2013.

[7] B. Van De Beld, E. Holle, and J. Florijn, "The use of pyrolysis oil and pyrolysis oil derived fuels in diesel engines for CHP applications," *Appl. Energy*, vol. 102, pp. 190–197, Feb. 2013.

[8] A. Santhoshkumar and A. Ramanathan, "Recycling of waste engine oil through pyrolysis process for the production of diesel like fuel and its uses in diesel engine," *Energy*, vol. 197, p. 117240, Apr. 2020. método tradicional no presenta resultados aceptables y si un alto consumo energético.

1. INTRODUCCIÓN

En materia de energética, el mundo actual se enfrenta a una creciente demanda [1] y a su vez la necesidad de reducir los niveles de contaminación; un caso en específico es la combustión como herramienta en la generación de energía [2]. Para efectuar el fenómeno de combustión se requiere de sistemas mecánicos como el motor de combustión interna de encendido provocado o por compresión; que usa lubricantes permitiendo reducir la fricción entre componentes, refrigerar, limpiar y actuar como anticorrosivo [3], lo que convierte a los aceites lubricantes para motor en un elemento de gran demandada comercial. Si bien los productores de lubricantes buscan prolongar la durabilidad de los aceites, estos deben ser remplazados con cierta frecuencia, se estima una cantidad anual de 45 millones de toneladas en el mundo de este residuo, de los cuales, solo el 40% es recolectado y tratado adecuadamente [4], provocando una inadecuada disposición de productos lubricantes provenientes de transformadores, sistemas de transmisión de potencia, accesorios de motores eléctricos y de combustión interna, etc. La contaminación ambiental, consecuencia de la presencia de metales pesados y otros contaminantes en este residuo [5], deriva directa e indirectamente en afectaciones irreparables.

Los manejos adecuados de desechos peligrosos, como el aceite usado, están comúnmente estipulados en normativas y protocolos; como la estrategia europea de economía circular que para el aceite usado prioriza su regeneración para la producción de aceites base [6]. Sin embargo, existen otras alternativas de reciclaje del aceite usado de motor como la materia prima para la generación de combustibles alternativos por su procedencia de bases nafticas derivados del crudo fósil [7] lo que revaloriza este residuo dando un correcto tratamiento adecuado a este desecho altamente peligroso para el medioambiente, pues tan solo un litro de aceite usado de motor en fuentes acuíferas puede contaminar más de diez mil litros de agua [8]. Por lo anterior, es un tema de constante crecimiento e inversión por parte de investigadores a nivel mundial permitiendo así conocer procedimientos y características que logran la evaluación adecuada del reciclaje termoquímico como alternativa altamente efectiva [9]. En consecuencia, algunos autores plantean que el reciclaje termoquímico es una alternativa a los tipos de reciclaje físicos convencionales que permite la obtención de productos combustibles alternativos [10]; en este caso, aplicado al aceite usado de motor.

Para este proyecto se desarrolla el proceso de reciclado termoquímico mediante el uso de un equipo experimental que evalúa la velocidad de calentamiento y

temperatura máxima del reactor para obtener productos líquidos combustibles. Inicialmente se presenta una revisión bibliográfica generalizada respecto a los tratamientos termoquímicos efectuados a este residuo; seguido de la selección, construcción y montaje del equipo experimental. Finalizando con la experimentación, caracterización de productos y evaluación estadística de los resultados, concluyendo la viabilidad del escalar o reproducir este proceso promoviendo la investigación regional y en específico la de la Universidad de Pamplona, en Pamplona Norte de Santander.

2. JUSTIFICACIÓN

La preocupación por el aumento de la demanda energética mundial, la disminución de reservas de fuentes fósiles, y el calentamiento global producto de la contaminación medio ambiental provocada por la inadecuada disposición de residuos en general, ha generado alternativas para revalorizar residuos con diversos tratamientos físicos y térmicos [11]. El aceite usado de motor es un residuo catalogado ambientalmente como peligroso que es generado con alta frecuencia por el uso de motores de combustión interna, transformadores y elementos móviles de motores eléctricos en manufacturas o sistemas de transporte terrestre, aéreo o marítimo para pasajeros y/o carga; este residuo presenta una inadecuada disposición pues cerca de 27 millones de toneladas al año a nivel mundial se desconoce su disposición final, siendo esta comúnmente ríos, suelos o vertederos [4]. Algunas soluciones a esta problemática es la obtención de combustibles alternativos a partir del aceite de motor usado [12], la hidrogenación [13], la destilación al vacío [14] o la pirólisis térmica [15][9]. A nivel nacional estas tecnologías no han tenido gran repercusión por lo que este proyecto busca impulsar la investigación en el área del reciclaje termo-químico como solución a una problemática que escala a intereses globales.

Dentro de la legislación colombiana [16] los aceites usados de motor son considerados como residuos líquidos peligrosos, porque como *Pinheiro et al.* [17] indican que este residuo contiene metales peligrosos como cloro, fósforo, zinc o plomo junto con hidrocarburos aromáticos policíclicos y diferentes sustancias tóxicas, por lo que requieren de un tratamiento acorde con esta calificación. Por lo tanto, investigar y poner en práctica alternativas de reciclaje para este residuo es una respuesta directa a la disminución de este residuo y una aportación medioambiental al correcto tratamiento del mismo beneficiando a la población colombiana con la revalorización de aceite usado de motor y generación de energía a partir de los combustibles obtenidos. El reciclaje termo-químico a través del proceso de pirólisis se ha venido estudiando y desarrollando en las últimas décadas con escalamientos industriales importantes. Sin embargo, como *Asmita* [18] refiere, la mayoría de estos estudios están enfocados en otro tipo de residuos como neumáticos, plásticos o biomasa; pero la investigación de la pirólisis aplicada a el aceite usado de motor o aceites residuales es mínima. Por lo anterior, este proyecto lo que busca es evaluar el proceso de pirolisis bajo las condiciones propias del proyecto y de esta manera poder impulsar la investigación del proceso de pirólisis en desechos deficientemente reciclados por métodos tradicionales.

3. OBJETIVOS

3.1 OBJETIVO GENERAL

Desarrollar un dispositivo experimental que permita obtener productos líquidos mediante el uso de pirólisis de los aceites usados de motor.

3.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- Construir un prototipo de evaporización-condensación para ser usado en la pirólisis de aceites usados de motor.
- Caracterizar el prototipo identificando las condiciones máximas de operación y la repetibilidad experimental.
- Obtener experimentalmente productos bajo la variación de curva de calentamiento y temperatura de vapor máxima.
- Determinar las propiedades de los productos obtenidos del proceso de pirólisis de aceite usado de motor y compararla con combustibles comerciales.

4. LA PIRÓLISIS ALTERNATIVA ENERGETICA

La pirólisis de aceite usado de motor es una alternativa de reciclaje y revalorización de este desecho que es generado como producto de procesos industriales que implican mecanismos de transformación energética. Ejemplo de ello, es el proceso de combustión realizado por motores de combustión interna; los cuales, para mejorar su eficiencia, hacen uso de aceites lubricantes estudiados desde la tribología para mejorar el comportamiento frente a los desafíos presentados por su diversa y amplia demanda. El estudio del proceso de pirólisis aplicado a diversos desechos, especialmente derivados del petróleo, es amplio debido las diferentes metodologías hasta ahora propuestas; sin embargo, en el caso de los aceites lubricantes usados esta investigación se encuentra menos desarrollada. Por lo tanto, la aplicación de cualquier metodología experimental implica propuestas propias de las condiciones de trabajo sobre las que se desarrollan los proyectos; por ello, es importante analizar las diversas opciones de equipos y métodos que permiten monitorear y controlar las variables experimentales.

4.1 MOTORES DE COMBUSTIÓN INTERNA

Un motor de combustión interna es un sistema mecánico cuyo objetivo es la transformación de energía calórica, proporcionada por un combustible, en energía mecánica que puede ser aprovechada posteriormente en múltiples procesos. Este trabajo es generalmente producto del desplazamiento de un pistón dentro de un cilindro, debido a la explosión del combustible. En ocasiones provocada (motores a gasolina) o iniciada por la compresión (motores diésel) convirtiendo este desplazamiento del pistón en fuente de trabajo mediante el uso de mecanismos como el de cigüeñal, biela y pistón [19].

El motor de combustión interna ha sido, desde la ingeniería, uno de los pilares fundamentales del desarrollo económico desde principios del siglo XX. Pasando por todos los desarrollos para lograr eficiencias superiores a las de su principal antecesor, el motor a vapor; es importante conocer que los diseños de Nicolaus Otto (encendido por chispa) y Rudolf Diesel (encendido por compresión) prevalecen al día de hoy con importantes avances en investigación en términos de ahorro de combustible, aumento de las eficiencias (térmica y de combustión) y emisiones contaminantes mínimas [20].

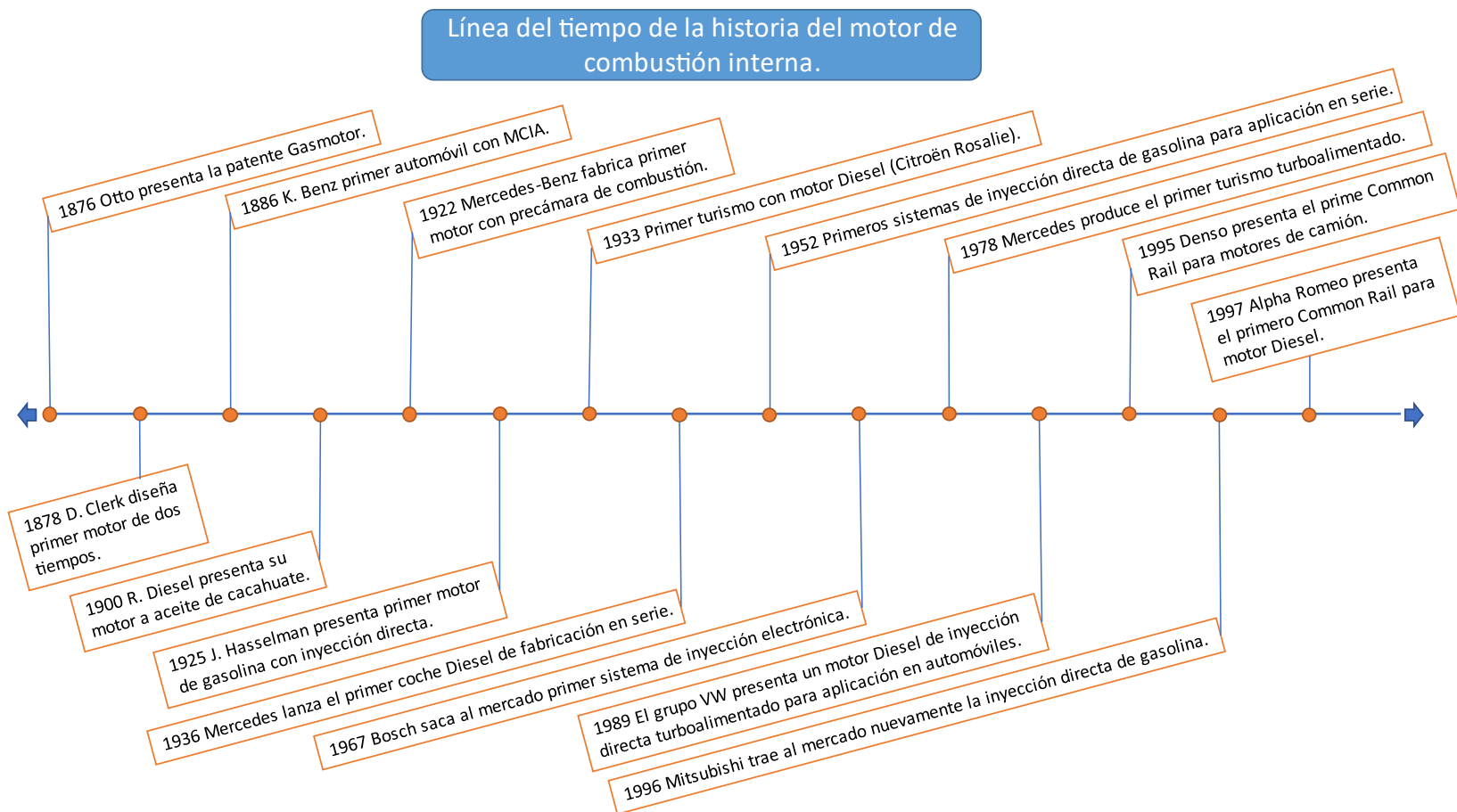


Figura 1. Línea de tiempo de los sucesos más relevantes en la historia de los motores de combustión interna. Fuente:[Cleveland [20]]

Inicialmente los desarrollos aportados desde el área de la ingeniería mecánica en este sentido se enfocan en el diseño y fabricación de piezas de menor peso y mejor acabado superficial, lo que implica un análisis de materiales para mantener las propiedades mecánicas de las piezas en diferentes materiales. Por otro lado, se propone el uso de aceites lubricantes, en donde se resalta los aceites de baja viscosidad debido a su relación entre beneficio obtenido y costos de implementación. Sin embargo, la implementación de estas propuestas de mejoramiento está sujeta a varias condiciones como son: el tipo de motor, condiciones de trabajo y demás componentes que afectan su construcción, lo que hace extensa el área de estudio. Por ello, se ha hecho énfasis principalmente en soluciones que sean fácilmente aplicables en la mayor cantidad de casos, como lo es la lubricación.

Si se considera que la fricción interna del motor alcanza el 50% de la pérdida mecánica total del motor de combustión interna, entonces existe un nicho en este campo de trabajo que puede avanzar y que tiene una contribución significativa al ahorro de combustible. Para un automóvil que funciona en condiciones normales, el porcentaje de energía que todos los componentes del combustible pueden transferir a las ruedas es solo del 15% al 20% [21]. En este sentido, la reducción del desgaste del motor y la mejora de la eficiencia del combustible han hecho que se desarrolle investigación en el uso de aceites lubricantes y variedad de aditivos que repercuten en la mejora del rendimiento del motor [22].

Los sistemas mecánicos en las industrias automotriz, de construcción, aviación, minera y de maquinaria requieren lubricantes con propiedades tribológicas mejoradas para asegurar su operación normal y durabilidad. El principal problema tribológico es la alta fricción y desgaste del sistema, lo que se traducirá en altos costos de mantenimiento y pérdida de energía. Para combatir estos problemas, las propiedades lubricantes se mejoran agregando aditivos esenciales al aceite lubricante con diferentes métodos y materiales la investigación extendida ha permitido ir caracterizando en busca de los mejores resultados con el menor esfuerzo [23].

4.2 ACEITE LUBRICANTE

De acuerdo con *Belkhode* [24], un lubricante es un fluido que se utiliza para facilitar el movimiento relativo de los cuerpos sólidos al minimizar la fricción y el desgaste entre las superficies que interactúan, además, desempeñan funciones de refrigeración, limpieza y anticorrosión [25], por esta razón se ha convertido en uno de los productos esenciales para el desarrollo humano y su estudio se denomina tribología. La tribología se puede definir como la ciencia y la tecnología de las superficies que interactúan en movimiento relativo e incluye el estudio de la fricción, el desgaste y la lubricación [26]; esta área del conocimiento ha venido en crecimiento debido a que se ha demostrado que los fenómenos de fricción y desgaste pueden llegar a ser responsables del 10% del producto nacional bruto, presentado por *Stachowiak* [27] para estadísticas globales.

La demanda de aceites lubricantes se ha incrementado con el desarrollo de nuevas tecnologías, dado esto, en la figura 2 se muestra la demanda mundial en 2017 para los diversos continentes la cual se estimó en 35.7 Millones de toneladas, de acuerdo con *Fuchs* [28], donde la región pacífico-asiática abarca un 43% del mercado mundial. Por otro lado, las otras dos regiones con mayor consumo de aceites lubricantes con Europa y Norte América, con el 19% y 18% respectivamente. Para Colombia en particular hace parte del 10% aportado para Latinoamérica.

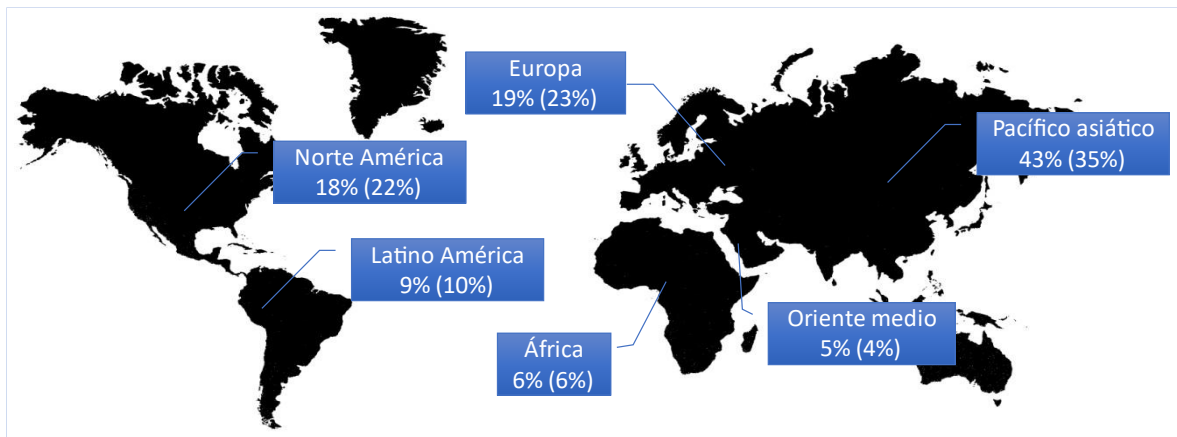


Figura 2. Demanda de aceites lubricantes por regiones geográficas a nivel mundial, 2017 (2007).

Fuente: [Fuchs [28]]

El aceite lubricante es una sustancia líquida tradicionalmente extraída del petróleo, compuesta principalmente por una mezcla de varios hidrocarburos. Es el resultado de la combinación del "aceite base" que aporta las principales propiedades lubricantes y los "aditivos" utilizados para mejorar su rendimiento. Los aceites bases

pueden ser de tipo mineral (obtenidos de la refinación del petróleo) o sintético (procedentes de procesos de síntesis química); y comprenden entre el 75% y el 85% de la composición total de un aceite lubricante comercial. La composición media de hidrocarburos presentes en los aceites bases se presenta en la tabla 1. Por otro lado, los aditivos corresponden del 15% al 25% de la composición de los aceites lubricantes comerciales y son los que le proveen de propiedades más específicas a los productos comerciales de acuerdo a la variedad de necesidades o condiciones de uso existentes en la industria. De acuerdo con *Delgado* [29] Los aditivos más comúnmente empleados junto con su función son:

- Antioxidante Aumenta la vida del lubricante
- Anticorrosivo Previene diferentes tipos de corrosión
- Anti-desgaste Reduce el desgaste bajo condiciones de carga y temperaturas moderadas
- Desmulsificante Separar químicamente las emulsiones
- Detergente dispersante Mantiene la limpieza del motor y las partes
- Antiespumante Minimiza la formación de espuma
- Mejorador del índice de viscosidad Optimiza las características viscosidad – temperatura
- Depresor del punto de fluidez Mantiene la fluidez del aceite
- Modificador de fricción Disminuye el coeficiente de fricción

Tabla 1 Composición media de aceites base. Fuente: [Pantoja [30]]

| Tipo de sustancia | Hidrocarburo | Composición [%] |
|-------------------|---------------|-----------------|
| Parafinas | Alcanos | 45-76 |
| Naftenos | Ciclo alcanos | 13-45 |
| Aromáticos | Aromáticos | 10-30 |

La clasificación de los aceites lubricantes se puede realizar, generalmente, por tres aspectos que son la composición, la naturaleza y los aditivos con los que se mezclan de acuerdo a la finalidad de su uso. Según la aplicación, los lubricantes pueden clasificarse en aceites automotrices, industriales, de proceso y marinos [6]. La Sociedad Estadounidense de Pruebas y Materiales (ASTM), el Instituto Estadounidense del Petróleo (API) (para motor a gasolina o Diésel) y la Sociedad de Ingenieros Automotrices (SAE) (monogrado o multigrado) son algunos de los proveedores de parámetros estándar internacionales para caracterizar los lubricantes de motor. De acuerdo con *Ewen et al.* [31] las propiedades más

importantes y características de los lubricantes son la viscosidad y la densidad debido a que están intrínsecamente ligadas a la hidrodinámica del lubricante. La figura 3 permite visualizar una clasificación de los lubricantes de acuerdo con *S- OIL SEVEN* [32].

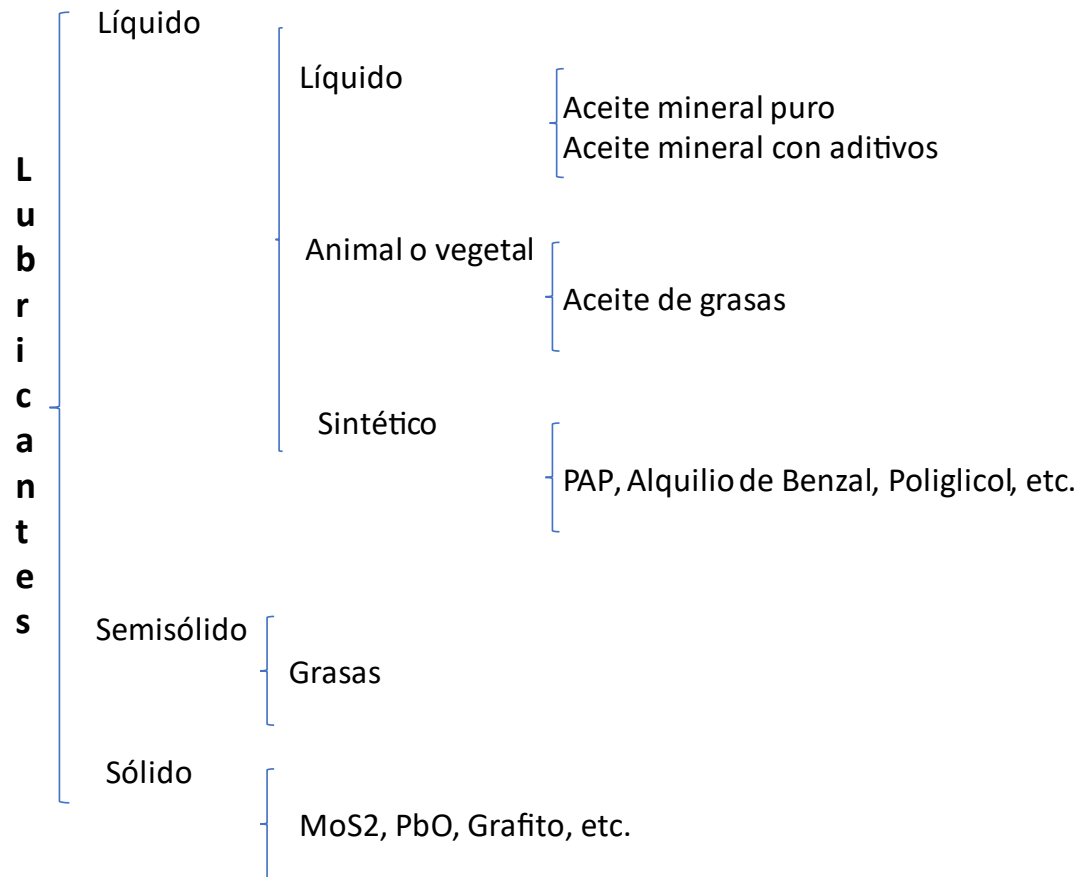


Figura 3. Clasificación de los lubricantes. Fuente:[*S- OIL SEVEN* [32]]

El uso de lubricantes no se restringe exclusivamente al aplicado en motores y maquinaria mecánica, por otro lado, equipos como son las transmisiones de potencia, transformadores o sistemas electromotores también hacen uso de lubricantes en volúmenes considerables, en este caso para refrigerar y aislar los equipos. La degradación de este lubricantes se debe a la constante exposición a tensiones eléctricas y térmicas, lo que se traduce en una cantidad considerable de aceite usado que como *Belkhode* [33] lo estudia también puede ser procesado para el uso como combustible.

La producción, uso y desecho de lubricantes y aceites es un tema de interés debido al creciente inclinación por conocer y controlar la trazabilidad de la vida de un producto, con el objetivo principal de diseñarlos y proyectarlos no solo para su consumo sino para su repercusión directa e indirecta posterior con el ambiente en el que se aplica. En el caso de lubricantes y aceites una aproximación global a esto es la implementación de certificaciones como la que un ente regulador bajo la normativa ISO 14001 – Sistemas de Gestión Ambiental (SGA) [34] la cual como su nombre indica hace énfasis en el control de las repercusiones ambientales. Estas repercusiones ambientales son, principalmente, la contaminación de fuentes hídricas y suelo; además, de forma menos directa, contaminación del aire producto del mal uso de lubricantes y aceites usados y por supuesto de su afección en los procesos que relacionan las fuentes hídricas y el suelo con la calidad del aire.

De esta misma forma, a nivel nacional dentro de los programas voluntarios de recolección y posconsumo del ministerio de ambiente y desarrollo sostenible [35], en el marco de la implementación de la Política ambiental para la gestión Integral de Residuos o Desechos Peligrosos, se encuentra una iniciativa del sector privado llamada Fondo de Aceites Usados – FAU, la cual es promovida por las seis principales empresas fabricantes de lubricantes disponibles en el país: ExxonMobil, Chevron, Terpel, Petrobras, Shell y Biomax; quienes buscan promover la utilización de sistemas/esquemas de autogestión empresarial con estándares ambientales dirigidos al uso y manejo de los aceites usados. Estos proyectos y políticas de manejo de desecho están alimentados por iniciativas como la europea [36] donde se prioriza la re-refinación del aceite de desecho para su uso nuevamente como aceite lubricante o hidrocarburo más liviano mediante metodologías de reciclaje termoquímico, entre ellas la pirólisis.

4.3 PIRÓLISIS

Se conoce como pirólisis a la descomposición química de una sustancia producto del calentamiento hasta alcanzar la temperatura de descomposición de los compuestos presentes. De acuerdo con *Speight* [37], la pirólisis es la degradación térmica de una sustancia orgánica en ausencia de aire para producir carbón, aceite de pirólisis y gas de síntesis, por ejemplo, la conversión de madera en carbón. Los métodos de pirólisis se caracterizan en función de varios factores, el tiempo de residencia, la velocidad de calentamiento, la temperatura final, etc., Para cada materia prima es necesario buscar optimizar el proceso de pirólisis, lo que se traduce en mayores rendimientos de los productos obtenidos [38].

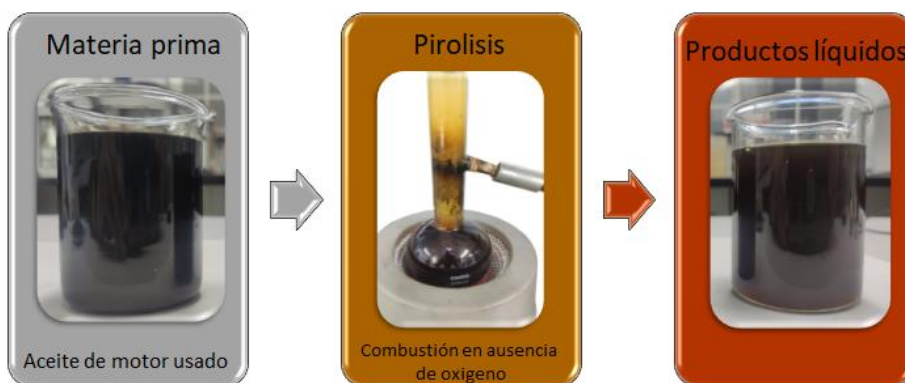


Figura 4. Conceptualización gráfica del proceso de pirólisis. Fuente [Autores]

La pirólisis se realiza en un equipo denominado pirolizador. Este equipo puede clasificarse de varias formas según *García* [39] Algunas de estas son:

- (1) Los productos finales objetivo (petróleo, carbón, calor, electricidad, gases)
- (2) El modo de funcionamiento del reactor (por lotes o continuo)
- (3) La forma en que se calienta (calentamiento directo o indirecto, autotérmico, microondas)
- (4) La fuente de calor utilizada (eléctrico, calentador de gas, combustión de biomasa)
- (5) El método utilizado para cargar el reactor (manual, mecánico)
- (6) La presión a la que opera la unidad (vacío, atmosférica, presurizada)
- (7) El material utilizado para la construcción del reactor (suelo, ladrillo, hormigón, acero)
- (8) Portabilidad del reactor (estacionario, móvil)
- (9) Posición del reactor.

La variabilidad de los factores importantes para el proceso, anteriormente mencionados, con base en la experimentación impulsada por la investigación en el área, ha permitido identificar relaciones como las que nos presenta *Basu* [40]:

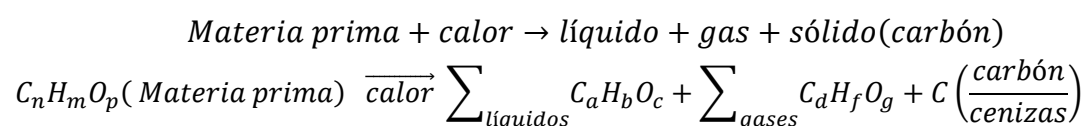
- Una velocidad de calentamiento más lenta, una temperatura de pirólisis más baja y un tiempo de residencia más largo maximizan el rendimiento de carbón sólido.
- Una velocidad de calentamiento más alta, una temperatura de pirólisis más alta y un tiempo de residencia más corto maximizan el rendimiento de gas.
- Una velocidad de calentamiento más alta, una temperatura de pirólisis intermedia y un tiempo de residencia más corto maximizan el rendimiento de líquido.

Bajo este concepto podemos clasificar los tipos de pirólisis de acuerdo con el tipo de mecanismo para generar el calor necesario como lo son combustibles convencionales, energía eléctrica o incluso se estudia la posibilidad de hacerlo mediante energía *solar* [41]. Desde el punto de vista operativo, como pirólisis convencional, rápida o instantánea. La pirólisis convencional incluye una velocidad de calentamiento lenta de 0,1 a 1 °C/s, un tiempo de residencia de varias horas a varios minutos y un intervalo de temperatura de 400 a 600 °C. Por otro lado, la pirólisis rápida incluye una velocidad de calentamiento rápida de 10 a > 1000 °C/s, un tiempo de residencia corto de <2 s, una temperatura de 400-650 ° C y un enfriamiento rápido del vapor para lograr un alto rendimiento líquido [42].

4.3.1 Reacción de pirólisis

De acuerdo con *Tam* [43], la pirólisis es el proceso de descomponer químicamente o transformar un material en una o más sustancias recuperables calentándolo a temperaturas muy altas en un ambiente libre de oxígeno. Este proceso se genera debido al rompimiento de enlaces químicos poco estables consecuencia de energía suministrada por calor. Este procedimiento es bastante versátil por su aplicabilidad a todo tipo de moléculas de acuerdo a *Moldoveanu* [44] estas pueden ser poliméricas o no poliméricas, en fase sólida, líquida o gaseosa o sobre compuestos puros o mezclas desconocidas.

La reacción general del proceso de pirólisis para cualquier materia prima de base hidrocarburo es [45]:



La pirólisis de especies moleculares puede consistir en una o más reacciones químicas de pirólisis que ocurren simultánea o secuencialmente. La trayectoria del proceso de pirólisis depende de las propiedades del material de pirólisis y también de las condiciones experimentales. Después de la primera etapa de reacción de descomposición, suele haber una etapa de reacción posterior en la pirólisis, ya sea como una pirólisis adicional de las fracciones producidas inicialmente o como una reacción entre especies reactivas formadas durante el proceso de pirólisis [44].

La pirólisis se elige entre otros métodos termoquímicos debido a sus condiciones de funcionamiento flexibles y más accesibles. Una gama diversa de productos, es decir, sólidos, líquidos y gaseosos, obtenidos de este método tienen un uso y un valor extensos [18]. Por lo anterior, la pirólisis se establece como una alternativa importante para realizar procesos de reciclaje sobre todo de residuos no sólidos los cuales no poseen tratamientos convencionales propios.

4.3.2 Pirólisis de aceite usado de motor

A nivel internacional la pirólisis es un método de reciclaje de aceite de motor usado que está tomando importancia como lo evidencia el aumento en la investigación del área. Uno de los factores diferenciales son las pruebas con diferentes metodologías de aplicación de la pirólisis, en el caso de *Li et al.* [46] se propuso un proceso de reciclaje integrado por destilación al vacío y pirólisis asistida por microondas. Este conjunto de técnicas permitió una recuperación energética del 94.8%, además, este montaje en cascada permitió convertir casi toda la materia prima en productos útiles; por otro lado, su desarrollo permitió también evidenciar las repercusiones sobre la calidad del producto al variar factores como la distribución espacial de los absorbentes, la temperatura final y el caudal del nitrógeno. Mediante la comparación de varios métodos tradicionales, el proceso de integración muestra una mejora significativa en el desempeño ambiental, técnico y económico.

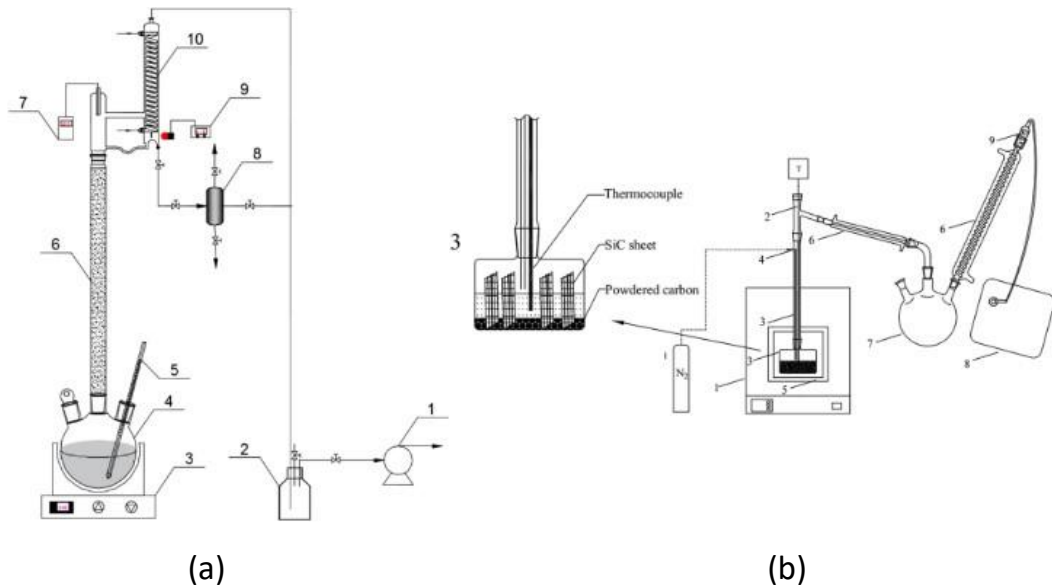


Figura 5. Montaje en cascada para el tratamiento de aceite residual implementado por Li [47]. (a) Diagrama esquemático del sistema de destilación al vacío: (1) bomba de vacío; (2) recipiente tampón; (3) calentador; (4) calderín; (5) termómetro de mercurio; (6) columna; (7) termómetro digital; (8) matraz receptor; (9) controlador de la relación de reflujo; (10) tubo del condensador. (b) Diagrama esquemático de la unidad pirólisis asistida por microondas, (1) horno microondas; (2) termopar modificado; (3) reactor y tubo de cuarzo; (4) tubo para purga de nitrógeno; (5) aislamiento de lana de vidrio; (6) condensadores; (7) matraz de tres bocas; (8) bolsa de muestreo de gas; (9) algodón.

Por otra parte, *Santhoshkumar* [9] compara las técnicas de pirólisis eléctrica y asistida por microondas. Donde se encontró que para realizar el proceso de pirólisis del aceite usado a una temperatura de 350 °C la alternativa más eficiente energéticamente hablando fue la asistida por microondas, cuyos productos fueron estudiados más profundidad donde se les aplicaron pruebas de poder calorífico, análisis elemental, cromatografía de gases y espectrometría de masas (GC-MS), espectroscopia infrarroja (FTIR), densidad y viscosidad. En este estudio se apreció que los valores resultaban similares a los reportados por un Diésel comercial a excepción de la viscosidad, pues tenía valores superiores lo que en términos prácticos implicaba una mala combustión en los motores convencionales, por lo que el estudio además realizó pruebas de las condiciones ideales en las que el producto de la pirólisis era más eficiente y menos contaminante que el Diésel al ser usado en motores de combustión interna.

En los casos anteriores el interés era encontrar una metodología para obtener el mejor producto de pirólisis para usarlo en motores de combustión interna, para *Patel* [3] el interés fue aplicar una pirólisis térmica a 550 °C al aceite usado de motor y luego probar distintas proporciones de mezcla con Diésel convencional para

buscar los mejores resultado en términos del valor calórico, además, se realizaron estudios de viscosidad, punto de inflamación, densidad GC-MS y FTIR. En este estudio se concluyó que la mejor opción bajo el criterio de valor calórico para la mezcla era de 80% producto pirolítico y 20% Diésel comercial.

A nivel de Latinoamérica se puede encontrar estudios como el de *Razo* [48] donde se busca proponer una alternativa de reciclaje de aceites residuales transformándolos en combustibles con características similares a las de los combustibles tradicionales para el funcionamiento de motores de combustión interna. El tratamiento de los aceites se fundamenta en su procesamiento mediante pirólisis a temperaturas de 380-460 °C, seguido a esto se realiza un proceso de destilación a la mezcla de hidrocarburos pesados resultante para obtener Hidrocarburos más limpios y parecidos, en términos de las propiedades, a la gasolina y el diésel.

Y a nivel nacional, si bien la materia prima para el proceso de pirólisis no ha sido el aceite usado de motor, si lo han sido otros residuos como lo son los plásticos como lo investigó *Mesa* [49], quien se centra en el estudio del reciclaje químico por pirólisis térmica y catalítica para la obtención de combustibles a partir de residuos plásticos. Se realiza un diseño de experimentos para identificar las condiciones procedimentales del proceso de pirólisis, para los dos tipos, caracterizando la fracción líquida obtenida del proceso. El aceite pirolítico obtenido se caracteriza de acuerdo a la norma ASTM D86: "Método de prueba estandarizado para la destilación de productos del petróleo y combustibles líquidos a presión atmosférica".

4.3.3 Revisión de pirólisis del aceite de moto usador

En la tabla 2. se presenta un resumen comparativo de las condiciones de trabajo de la pirolisis aplicada al aceite usado de motor, con diferentes objetivos. Las variables que se pueden observar son la temperatura de pirolisis, la velocidad de calentamiento, el rendimiento másico máximo (sólido, líquido o gaseoso), el tipo de reactor o pirólisis usada en el estudio, la referencia correspondiente y las observaciones pertinentes. Las propiedades comparables con las evaluadas en este proyecto son presentadas en la tabla 3 partiendo de la revisión bibliográfica presentada en la tabla 2.

Tabla 2. Resumen de estudios de pirólisis de aceite usado de motor. Fuente [Autores]

| Temperatura de pirólisis [°C] | Velocidad de calentamiento [°C/min] | Rendimiento masico [%] | Reactor o tipo de pirólisis | Ref. | Observaciones |
|-------------------------------|-------------------------------------|------------------------|--|------|--|
| 350 - 400 | 10 | 76 | Pirólisis asistida por microondas | [50] | Se realiza una comparación entre la pirólisis asistida por microondas a dos potencias diferentes y la pirólisis eléctrica. |
| 450 | - | - | Destilación pirolítica | [4] | Se realizaron experimentos con aditivos en la materia prima. |
| 250 – 700 | - | 41 | reactor de lecho agitado continuo utilizando energía de microondas | [51] | El objetivo era obtener hidrógeno e hidrocarburos del vapor pirolítico |
| 600 | - | 79.4 | Unidad a escala bench de pirólisis a | [5] | Se compararon los productos de pirólisis de 4 fuentes industriales diferentes |
| 450-675 | - | 72 | destilación al vacío (VD) y pirólisis asistida por microondas (MAP). | [47] | Se realizaron dos procesos en cascada para el reciclaje de aceite usado de motor |
| 250-700 | - | 69 | pirólisis inducida por microondas | [52] | Se compararon las propiedades de los productos de la pirólisis de un aceite virgen y un aceite usado |
| 450-575 | 25 | 76.73 | Reactor de pirólisis discontinuo. | [53] | Se estudio el impacto de la temperatura en el rendimiento de aceite, carbón y gas. |
| 550 | 25 | 76.73 | Reactor semidiscontinuo para pirólisis | [3] | Se estudio el comportamiento de la mezcla de aceite pirolítico con diésel en diferentes proporciones |
| 800 | 7 | 72.7 | Reactor de lecho fijo | [54] | Co-pirólisis de neumáticos de desecho con aceite lubricante de desecho |

| | | | | | |
|---------|---|------|--|----------|---|
| 500 | 7 | 64.8 | Reactor de lecho fijo | [55] | Influencia de los desechos aceitosos en la pirólisis de llantas de desecho |
| 625 | - | 24.3 | Pirólisis a presión atmosférica | [56] | Caracterización de alquitranes de la Co-pirólisis de aceites lubricantes residuales con carbón |
| 625 | - | 29.1 | Reactor de lecho fluidizado continuo | [57] | Co-pirólisis de una lechada de carbón / aceite de desecho mineral en un reactor de lecho fluidizado de modo continuo |
| 380-460 | - | 88.8 | Reactor pirolizador por lotes tipo Batch | [48][58] | Obtención de combustible alternativo mediante pirólisis de aceite lubricante residual |
| 450 | - | 17.8 | Reactor pirolizador por lotes tipo Batch | [59] | Producción de aceites pirolíticos mediante pirólisis catalítica de combustibles derivados de desechos de Malasia en un reactor discontinuo con agitación continua |
| 300-370 | - | 73 | Reactor pirolizador por lotes tipo Batch | [60] | Pirólisis de aceite usado en presencia de un catalizador gastado |
| 342 | - | 41.8 | Reactor Batch | [61] | Combustible similar a la gasolina a partir de aceite de motor usado mediante pirólisis catalítica |
| 360 | - | 60 | Destilación pirolítica | [62] | Producción de combustible similar al diésel a partir de aceite de motor usado por destilación pirolítica |

| | | | | | |
|---------|-----|-------|--------------------------------|------|---|
| 553.9 | - | 60.7 | Reactor de lecho fijo | [63] | Nano-CeO ₂ / SiO ₂ como una conversión catalítica eficiente de aceite de motor usado en combustible líquido |
| 400-450 | - | 83 | Reactor de lecho fijo | [64] | Pirólisis asistida por nanomateriales de aceite lubricante usado y recuperación de combustible |
| 425 | - | 79.55 | Agrietamiento catalítico | [65] | Reacción de craqueo catalítico de aceite lubricante usado a combustibles líquidos catalizada por zirconio sulfatado |
| 300-400 | 6-8 | 81.15 | Pirolizador térmico Batch | [66] | Efecto de la velocidad de calentamiento y los aditivos (MgO y Al ₂ O ₃) en un combustible similar al diésel procedente de la pirólisis de aceite de motor de desecho |
| 400-500 | - | 95.6 | Reactor de micro acero | [67] | Pirólisis catalítica de aceite de motor usado sobre cenizas de carbón en productos similares al combustible |
| 377 | - | 92.5 | Reactor pirolizador tipo Batch | [68] | Combustible similar al diésel obtenido por pirólisis catalítica de aceite de motor usado |

Tabla 3. Resumen propiedades obtenidas por otros autores comparables con las medidas en este estudio.

Fuente [Autores]

| Referencia | Densidad [kg/m ³] | Poder Calorífico [kJ/kg] | C ₇ - C ₁₀ | C ₁₁ - C ₁₄ | C ₁₅ - C ₃₀ |
|------------|-------------------------------|--------------------------|----------------------------------|-----------------------------------|-----------------------------------|
| [3] | 795-838 | 42400-45500 | 42 | 34 | 24 |
| [4] | 821-832 | - | Otro análisis de composición | | |
| [5] | - | - | Otro análisis de composición | | |
| [47] | 841,13-880,70 | 44932-46010 | Otro análisis de composición | | |
| [48] | 755-861 | 43562-47061 | 30,15 | 2,15 | 67,68 |
| [50] | - | 45200 - 46500 | 15-22 | 50-70 | 10,-20 |
| [51] | - | - | Otro análisis de composición | | |
| [52] | - | - | Otro análisis de composición | | |
| [53] | - | - | Otro análisis de composición | | |
| [54] | 850-980 | 41600-45900 | 0,64-41,54 | 54,55-99,36 | 0-20,47 |
| [55] | 834-884 | 43300-45900 | Otro análisis de composición | | |
| [56] | - | - | Otro análisis de composición | | |
| [57] | - | - | Otro análisis de composición | | |
| [58] | 755-861 | 43562-47061 | 30,15 | 2,15 | 67,68 |
| [59] | 774-798 | 40500-41000 | Otro análisis de composición | | |
| [60] | - | - | Otro análisis de composición | | |
| [61] | 732 | 45900 | Otro análisis de composición | | |
| [62] | 818 | 42500 | Otro análisis de composición | | |
| [63] | 872 | 44900 | Otro análisis de composición | | |
| [64] | - | - | Otro análisis de composición | | |
| [65] | - | - | Otro análisis de composición | | |
| [66] | 813-835 | - | Otro análisis de composición | | |
| [67] | 840-910 | 39000-44000 | 61,9-62,7 | 16,95-17,80 | 16,9-17,2 |
| [68] | 732 | 45900 | Otro análisis de composición | | |

4.4 DESTILACIÓN Y FRACCIONAMIENTO DE PRODUCTOS PETROLÍFEROS

El petróleo es una mezcla muy compleja de compuestos, entre los que se encuentran hidrocarburos alifáticos (alcanos normales, isoalcanos y cicloalcanos), hidrocarburos aromáticos policíclicos (HAP) y sus derivados alquilados, y compuestos polares, generalmente denominados resinas, constituidas esencialmente de compuestos heterocíclicos, tales como compuestos aromáticos que contienen azufre, nitrógeno y oxígeno (por ejemplo, derivados de tiofeno, carbazol y fenol) [29]. Las variaciones de composición que inciden en las propiedades del crudo y en cómo se procesa no radican en la composición elemental, sino en las proporciones de los distintos tipos de compuestos presentes [30]. Aunque se ha logrado un progreso significativo en la investigación de energías renovables en los últimos años, el uso de petróleo crudo como fuente de energía sigue siendo alto. Con la reducción de los recursos mundiales de petróleo crudo ligero, el petróleo pesado y residual se han vuelto cada vez más importantes para satisfacer la demanda de derivados del petróleo [31].

Inicialmente para un procesamiento de crudo en una refinería es la destilación del petróleo; debido a los nuevos retos, las unidades de refinación deben tener la adaptabilidad para funcionar con las diferentes materias primas. Este proceso es complicado por la diversidad de compuestos a extraer y provoca costes en términos energéticos, que puede equivaler al 1-2% del crudo a procesar [32]. La estructura típica para la destilación de petróleo crudo consiste en las unidades de destilación y su respectiva red de recuperación de calor que permite precalentar la materia prima, es decir hacer un proceso de cogeneración. Generalmente, el diseño básico de una unidad de destilación de petróleo crudo tiene como objetivo seleccionar las variables estructurales de la columna de destilación (es decir, la posición de la bandeja de alimentación, la ubicación de la bomba y el separador lateral, el número de bandejas en cada sección) y sus condiciones de funcionamiento (es decir, la temperatura de entrada del material de entrada, la función de la bomba circundante y la caída de temperatura, el caudal de vapor arrastrado y la relación de reflujo) [33].

A partir de la destilación se puede obtener una importante información cualitativa y cuantitativa del petróleo crudo mediante técnicas de caracterización por destilación como el método ASTM D86, el cual, estandariza la prueba de destilación a presión atmosférica sin el uso de reflujo intencional, en una sola etapa teórica de productos petrolíferos, utilizando una unidad de destilación de laboratorio para determinar cuantitativamente las características del rango de ebullición de los productos livianos y medios del fraccionamiento del petróleo crudo [34].

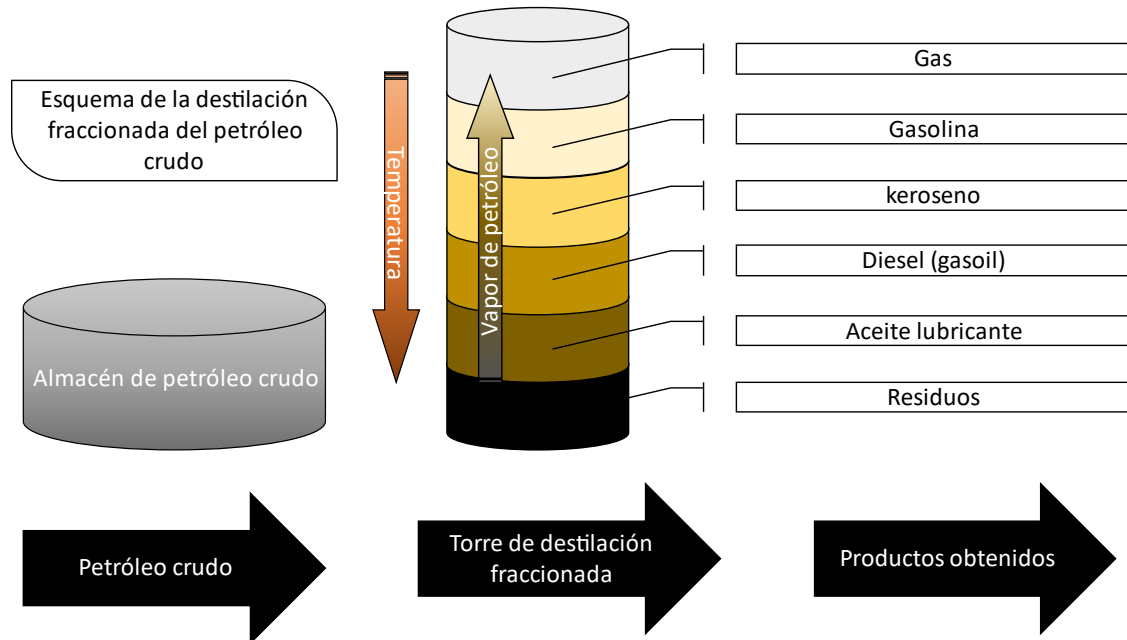


Figura 6. Esquema de la destilación fraccionada del petróleo crudo para la obtención de productos petrolíferos.
Fuente [Autores]

El principal proceso de la refinación es la destilación fraccionada que separa el crudo en mezclas más sencillas llamadas fracciones. En este proceso, el aceite se calienta en un horno a aproximadamente 600 °C y se vaporiza; el vapor producido se envía a la torre de fraccionamiento, que es un tubo vertical compuesto por bandejas horizontales dispuestas una encima de la otra, con diferente temperatura. La temperatura de la bandeja inferior es más alta que la temperatura de la bandeja más alta. A medida que el vapor de crudo sube a la torre, se enfrían; cuando parte del vapor llega a la bandeja cuya temperatura es menor que su punto de ebullición, el vapor se condensa y el líquido resultante se descarga de la torre; el vapor restante cuyo punto de ebullición es inferior a la temperatura de la bandeja asciende en la torre hasta encontrar una bandeja con la temperatura adecuada para su condensación y extracción.

Eso ocurre continuamente a lo largo de toda la columna en el proceso de fraccionamiento, donde se obtienen principalmente los siguientes productos:

- Aceite lubricante constituido por moléculas con más de 17 átomos de carbono; es la fracción menos volátil hirviendo a temperaturas superiores a 305 °C.
- Gasoil (diésel) con 13 a 17 átomos de carbono por molécula es usado como combustible en camiones, hierve en una frase de temperatura más baja entre 235 y 305 °C.
- Keroseno que hierve en 375 y 235 °C y posee 11 a 12 átomos de carbono en sus moléculas, este es usado como combustible en aviones.

- Gasolina usada como combustible en automóviles, es constituido por moléculas que tienen de 5 a 10 átomos de carbono y su franja de ebullición está entre 40 y 175 °C.
- Gas usado como combustible doméstico e industrial es la fracción más volátil del petróleo siendo constituido por moléculas que poseen de uno a cuatro átomos de carbono.
- Residuo de la destilación es usado para la fabricación de asfaltos que pavimentan calles y carreteras, es constituido por moléculas con más de 38 átomos de carbono y hierve a temperaturas superiores a 510 °C.

4.5 DISEÑO DE EXPERIMENTOS

De acuerdo con la documentación disponible por el soporte del software Minitab® 18 [69] el diseño de experimentos ayuda a estudiar simultáneamente la influencia de las variables de entrada (factores) en las variables de salida (respuestas). Estos experimentos consisten en una serie de ejecuciones o pruebas en las que las variables de entrada se cambian intencionalmente. El diseño de experimentos se utiliza para identificar las condiciones del proceso y los componentes del producto que afectan la calidad y luego determinar la configuración de los factores para los resultados de optimización.

De acuerdo con *Montgomery* [70], cuando es necesario estudiar la influencia combinada de factores en la respuesta, el diseño factorial es aplicable en experimentos que incluyen múltiples variables independientes. Los k factores con dos niveles puede ser de naturaleza cuantitativa o cualitativa. El diseño 2^k es particularmente útil en las primeras etapas del trabajo experimental, porque en este momento se pueden investigar muchas condiciones experimentales; además, proporciona el menor número de corridas y puede estudiar k factores en un diseño factorial completo. Por lo tanto, se utilizan ampliamente en la selección de variables independientes o en experimentos de filtro.

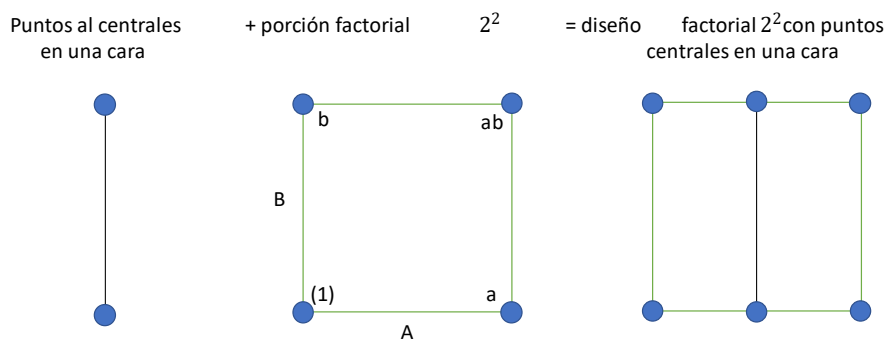


Figura 7 Descripción gráfica del diseño de experimentos factorial 2^2 con punto central en una cara.

Fuente:[*Montgomery* [70]]

La figura 7 describe gráficamente el diseño de experimentos factorial 2^2 con un punto centrado en una cara, el cual es el primer diseño de la serie 2^k . Este es un diseño con solo dos factores, como A y B, cada uno de los cuales se ejecuta en dos niveles. Este diseño se denomina diseño factorial 2^2 . El nivel del factor se puede llamar bajo y alto arbitrariamente.

En un diseño factorial con dos niveles, el efecto promedio de un factor se puede definir como el cambio en la respuesta del cambio del nivel del factor al promedio de los dos niveles del otro factor.

$$A = \frac{1}{2n} [ab + a - b - (1)]$$

$$B = \frac{1}{2n} [ab + b - a - (1)]$$

El efecto de la interacción AB se expresa como la diferencia promedio entre el efecto de A en el nivel B alto y el efecto de A en el nivel B bajo.

$$AB = \frac{1}{2n} [ab + (1) - a - b]$$

Donde (1), a, b y ab representan el total de las n replicas hechas con la combinación de tratamientos.

En muchos experimentos que involucran diseños 2^k , se examinará la magnitud y dirección de los efectos de los factores para determinar qué variables son potencialmente importantes. En la mayoría de los casos, se puede utilizar el análisis de varianza para confirmar esta explicación. En ciertos casos se usa un método para ajustar la superficie de respuesta al fenómeno modelado, este método consiste en agregar puntos centrales al diseño 2^k . El uso de este método no afecta las estimaciones usuales de los efectos del diseño 2^k , aunque hay que denotar que este método solo es aplicable cuando los factores k son de tipo cuantitativo.

La implementación de estos diseños de experimento esta sostenida en un control y adquisición de datos que permite la estimación de los modelos adecuados y la implementación metodológica de cada modelo experimental, como se mostró anteriormente para el diseño factorial 2^2 con punto centrado en una cara.

4.6 INSTRUMENTACIÓN Y CONTROL

En los últimos años, las plataformas de hardware inmerso se han vuelto muy importantes en la educación en ingeniería. Entre algunas encontramos Arduino y PLC que se destacan y son conocidas por su versatilidad, popularidad y bajo precio [71]. Este incremento en la implementación de hardware inmerso ha significado el desarrollo de algoritmos más eficientes que son aplicados a problemáticas que empiezan a ser comunes o cotidianas, como es el control de maquinaria o sistemas virtuales. De acuerdo con *Cárdenas* [72] la implementación de controles PID es una de las metodologías de trabajo actualmente más usadas por su robustez en muchas aplicaciones y además, su fácil aplicación y ejecución. Por otro lado, *González* [73] comenta que la metodología de controlador Fuzzy ha tomado posicionamiento en los proyectos más recientes, dado que con base en la lógica difusa permite modelar el error humano computacionalmente planteando un marco matemático. De esta forma, lo que busca esta metodología es controlar similar y sencillamente la lógica humana.

Sin embargo, la aplicación de controles más sencillos como el control “On/Off”, permite la realización de proyectos que no requieren de precisiones o inversiones altas. El control “On/Off” usa un algoritmo simple que solamente revisa si la variable de proceso está por encima o por debajo del *set point* (consigna) determinado. Esto implica que solo se tienen dos estados para la variable de proceso: encendido o apagado; es decir, que no se tienen estados intermedios. A pesar de ello, estas metodologías de control sencillas se pueden ver mejoradas mediante la implementación de otras metodologías complementarias como lo es la *modulación por ancho de pulso (PWM, por sus siglas en inglés)*. De acuerdo con *Dogan* [74], la *modulación por ancho de pulso* consiste en una señal de onda cuadrada unipolar digital donde la duración del tiempo de “encendido/estado activo” es modular, es decir, modificada de acuerdo a los requerimientos; bajo esta premisa, mediante el uso de microcontroladores se puede controlar la potencia entregada a la carga. Esto se ve cotidianamente en el control de brillo de luces o velocidad de algunos motores eléctricos.

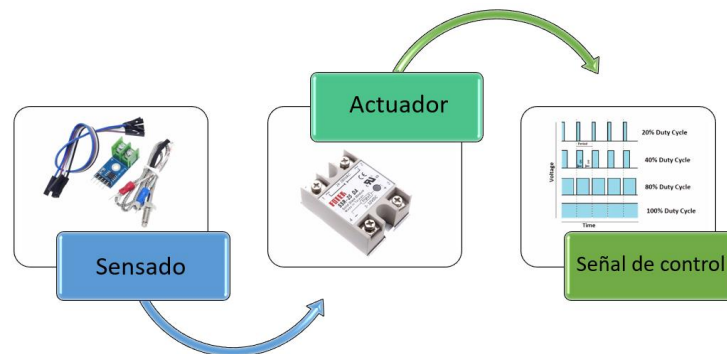


Figura 8. Lógica de la instrumentación y el control. Fuente [Autores]

5. SELECCIÓN Y CONSTRUCCIÓN DEL EQUIPO DE PIRÓLISIS

Para la definición de un montaje es necesario establecer unos parámetros de selección con los cuales evaluar las diversas opciones reportadas en la revisión bibliográfica, en este caso para tal fin, se han establecido los siguientes criterios aplicados en la industria:

- Precio del montaje (componentes): A nivel industrial es importante tener en cuenta la inversión necesaria para implementar un proceso dentro de una cadena productiva. Además, identificar los componentes que afectan al proceso permitiendo una correcta gestión del mantenimiento.
- Materia prima a procesar: El conocimiento de la cantidad de materia prima que será procesada es importante, porque determina las dimensiones de los componentes, en particular, la probeta de destilación de fondo redondo, el condensador y la probeta colectora del producto.
- Energía consumida en el proceso: Para que un proceso sea viable industrialmente la sostenibilidad energética es fundamental, es decir, que la energía de generación del producto sea competitiva con industrias semejantes. La medición de la energía total suministrada en el proceso de pirólisis se evaluará mediante el consumo de corriente eléctrica a lo largo del proceso comparándose con el volumen del combustible obtenido

Aun cuando estos parámetros son tomados con fundamento en la producción industrial, es importante aclarar que este proyecto plantea un método preliminar, que aportará una posible solución a la problemática de un residuo peligroso; sin contemplar escalamiento a nivel de planta piloto o producción industrial.

Para el desarrollo del proyecto de caracterización del proceso de pirólisis de aceite de motor usado se realiza dentro de la tarea de revisión bibliográfica una examinación de los equipos utilizados para realizar el proceso de pirólisis en sus diferentes modalidades y de esta manera poder decantar la selección y construcción de un equipo propio del proyecto, que se adapte a los objetivos y necesidades que incluyen: que los materiales usados garantizaran la repetibilidad experimental bajo las diversas condiciones de trabajo, que los costos y disponibilidad de los materiales necesarios para su construcción se encontraran dentro del presupuesto estimado.

5.1 PIROLIZADOR

De acuerdo con la revisión bibliográfica y las necesidades del proyecto se tomó la decisión de la construcción de un equipo pirolizador del tipo “reactor por lotes”, cuyo concepto fue adaptado a la disponibilidad de elementos constitutivos del esquema

general de este tipo de reactor. Por ello, es posible diferenciar cuatro secciones del equipo: la estructura, el horno, el condensador y la vidriería.



(a)



(b)

Figura 9. Reactor pirolizador usado. (a) equipo sin horno aislante. (b) equipo con horno aislante. Fuente [Autores]



Figura 10. CAD del equipo pirolizador usado. Fuente [Autores]

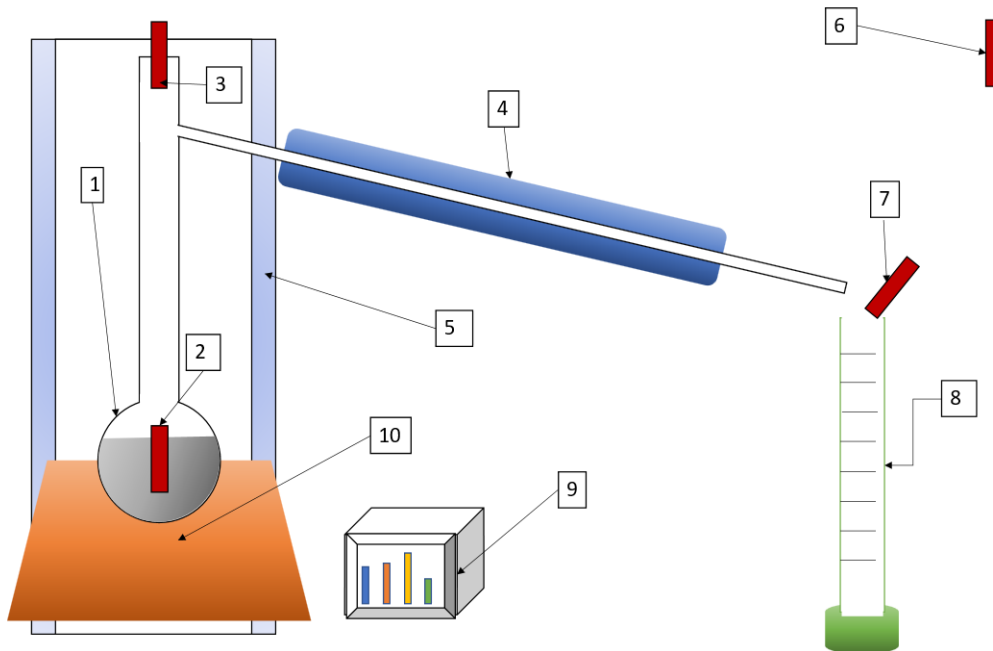


Figura 11. Esquema del reactor pirolizador. (1. Balón de destilación, 2. Termopar de líquido, 3. Termopar de vapor, 4. Condensador concéntrico, 5. Pared aislante cilíndrica, 6. Sensor temperatura ambiente, 7. Sensor temperatura producto, 8. Probeta forma alta Clase B, 9. Caja de control, 10. Manto térmico). Fuente [Autores]

5.1.1 Estructura



Figura 12. Estructura del equipo pirolizador. Fuente [Autores]

La construcción de la sección de estructura está supeditada a las dimensiones y cargas de los elementos constitutivos de las demás secciones. Los materiales usados fueron:

- Varillas corrugadas tipo polígono de acero comercial G-60W de $\frac{1}{4}$ de pulgada, de acuerdo con la NTC 2289 de 2012 [75], que cumple la función de matriz de la estructura para adaptarse a la geometría empujada.
- Tubería redonda de cerramiento utilizada en estructuras de bajo requerimiento de carga o para elementos no estructurales, de $\frac{1}{2}$ de pulgada

en acero calidad comercial de acuerdo con la NTC 1560 [76] y que es usada como refuerzo de las varillas corrugadas para proveer mejor estabilidad del montaje.

- Dos resistencias eléctricas de 1000 W (110 V) para producir un manto térmico del recipiente del aceite usado de motor. Este elemento se considera dentro de la sección de estructura debido a que son añadidas mediante soldadura al resto del montaje estructural.

5.1.2 Horno

Se construye un horno para aislar la sección de calentamiento y de esta forma elevar la eficiencia del equipo, para ello se hace uso del moldeado de láminas de acero en frío de 0.75 mm de espesor a una forma cilíndrica mediante soldadura. Se construyen dos cilindros concéntricos (interno y externo) que se unen únicamente en uno de sus extremos (la base) y en el espacio que queda entre ellas es depositado una mezcla arcillosa que cumple la función de refractario.

El horno es proveído de una base perforada para acoplar las resistencias eléctricas de la estructura; adicional se introduce una cubierta que se ajusta a las dimensiones del horno y permite el monitoreo visual y la accesibilidad al interior del horno; por último, una rendija con tapa que permite el desmontaje del matraz de destilación y el acople al condensador.



Figura 13. Horno aislante usado en el reactor pirolizador. Fuente [Autores]

5.1.3 Condensador



Figura 14. Condensador concéntrico usado en el reactor pirolizador. Fuente [Autores]

El condensador es construido bajo concepto de un condensador recto concéntrico de 40 cm de largo y se dispone en contraflujo, para su construcción se usa:

- Tubería redonda de 2 pulgadas en su exterior de cerramiento utilizada en estructuras de bajo requerimiento de carga o para elementos no estructurales en acero calidad comercial de acuerdo con la NTC 1560 [76].
- El interior y las boquillas de entrada y salida del refrigerante, tubería redonda de cerramiento utilizada en estructuras de bajo requerimiento de carga o para elementos no estructurales, de $\frac{1}{2}$ de pulgada en acero calidad comercial de acuerdo con la NTC 1560 [76]. Que en el extremo de la tubería de condensación fue doblado para direccionar hacia la vertical el líquido producto del proceso de pirólisis.

Adicional al condensador, dentro de esta sección se debe mencionar el sistema de refrigeración. El líquido refrigerante es agua, que ingresa por el lado externo del intercambiador a un caudal de 3.3 LPM mediante una bomba de agua sumergible que funciona a 110 V y cuenta con un depósito de agua de 16 L.

5.1.4 Vidriería

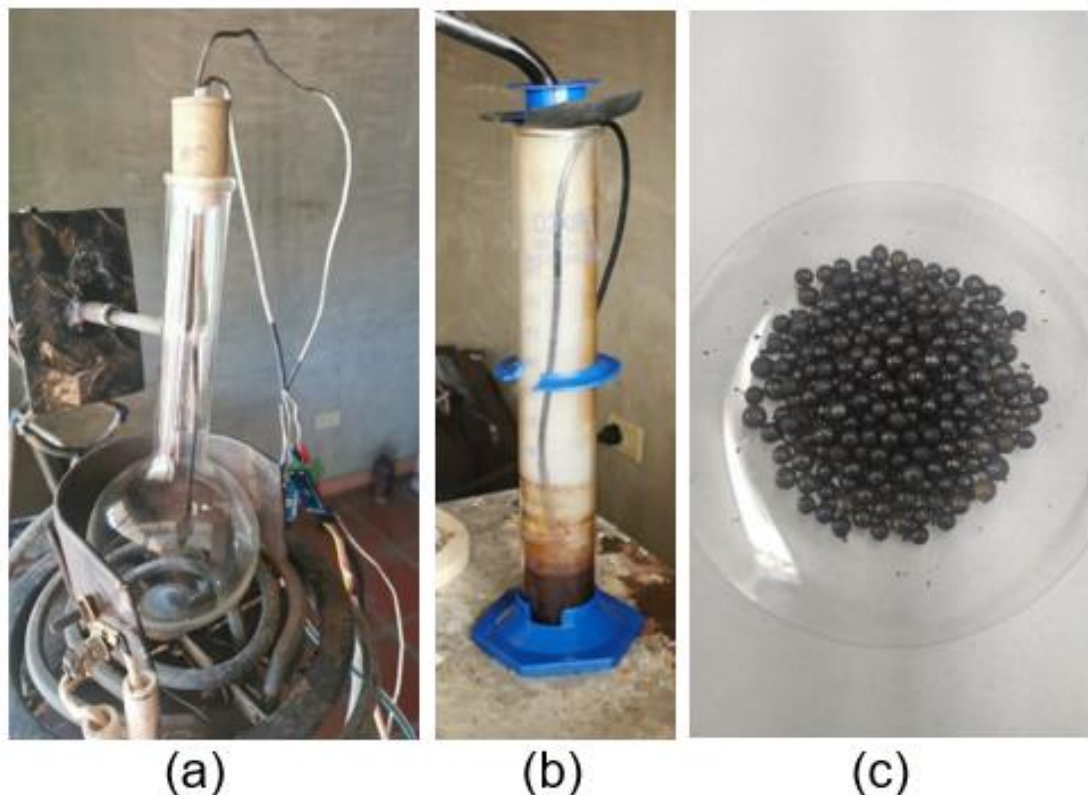


Figura 15. Vidriería usada en el equipo pirolizador. (a) Matraz de fondo redondo para destilación. (b) Probeta de 250 mL. (c) Esferas de vidrio. Fuente [Autores]

Para finalizar, los elementos complementarios a los ya mencionados corresponden a la vidriería estos son:

- Matraz esférico de fondo redondo con desprendimiento lateral, con capacidad de 250 ml, cuello largo, en vidrio borosilicato 3.3 que actúa como recipiente de la materia prima para su calentamiento. Este balón además está proveído de un tapón de teflón que permite la fijación de la medición de las temperaturas de vapor y líquido del aceite usado de motor en el mismo lugar.
- Probeta de vidrio con capacidad de 250 ± 2 mL que realiza la función de recolectar los productos líquidos y permitir el monitoreo de las cantidades obtenidas.
- Esferas de vidrio de diámetro promedio de 5 mm que realiza la función de reducir la liberación de energía producto de la ebullición del aceite usado en el proceso de pirólisis.

5.2 SISTEMA DE ADQUISICIÓN CONTROL



Figura 16. Caja de control usada en el reactor pirolizador. Fuente [Autores]

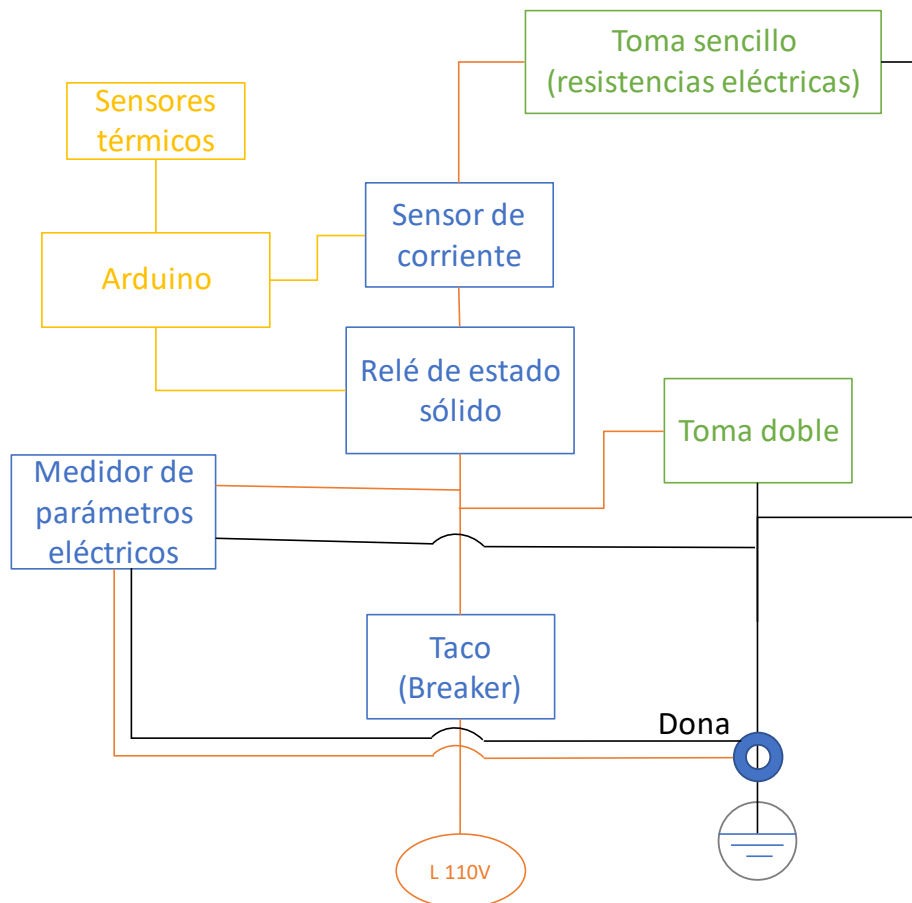








Figura 17. Esquema eléctrico empleado en la caja de control del equipo pirolizador. Fuente [Autores]

El sistema de control y adquisición de datos permite el control ON/OFF y modulación del ancho de pulsos, los componentes usado son mostrado en la tabla 4 Para el control y monitoreo de las condiciones de trabajo del equipo durante la experimentación, se usan dos tipos de sensores térmicos, estos son: Resistor térmico DS12B20 que permite lecturas entre $-55\text{ }^{\circ}\text{C}$ y $+125\text{ }^{\circ}\text{C}$ con una precisión de $\pm 0.5\text{ }^{\circ}\text{C}$, y un módulo Max 6675 con termopar tipo K que permite lecturas entre los 0 y $+1\ 024\text{ }^{\circ}\text{C}$ con una precisión de $\pm 0.25\text{ }^{\circ}\text{C}$, ambos con protección a líquidos y sencillas metodologías de implementación en conjunto con tarjetas de adquisición y control de datos Arduino.

Tabla 4. Componentes usados en el sistema de adquisición y control de datos. Fuente [Autores]

| Componente | Cantidad | Especificación | Imagen | Ref. |
|---|----------|---|--|------|
| Tarjeta de adquisición de datos Arduino | 1 | Arduino Mega 2560 |  | [77] |
| Termopar | 2 | Termopar tipo k lecturas entre los 0 y +1 024 °C con una precisión de ± 0.25 °C |  | [78] |
| Modulo MAX6675 | 2 | Con línea DuPont para conexión con Arduino y termopar tipo K |  | [78] |
| Sensor de temperatura | 2 | Sensor de temperatura ds18b20 lecturas entre -55 °C y +125 °C con una precisión de ± 0.5 °C |  | [79] |
| Sensor de corriente y voltaje alterno | 1 | Sensor de Voltaje y Corriente Alterna Zmpt101b Analógico para implementación con Arduino. |  | [80] |
| SSR (relé de estado sólido) | 1 | Relé De Estado Solido Ssr-25 Da 25a 24-380vac Fotek Arduino |  | [81] |

5.2.1 Interfase LabVIEW-Arduino

El uso de una tarjeta de adquisición de datos Arduino, permite la implementación de los anteriores componentes en conjunto y mediante la programación realizada en el propio software de Arduino IDE posibilita el desarrollo de un algoritmo que cumple con la lógica descrita en el diagrama de flujo mostrado en la figura 18 A su vez, la compatibilidad entre el software Arduino IDE con LabVIEW concede la posibilidad de desarrollar una interfaz (Figura 19) de monitoreo en tiempo real alimentada por la adquisición de datos programada en algoritmo de Arduino y que conserva en documentos de Excel todos los datos obtenidos durante la experimentación. Programación de Arduino (Anexo 7) y programación de LabVIEW (Anexo 6).

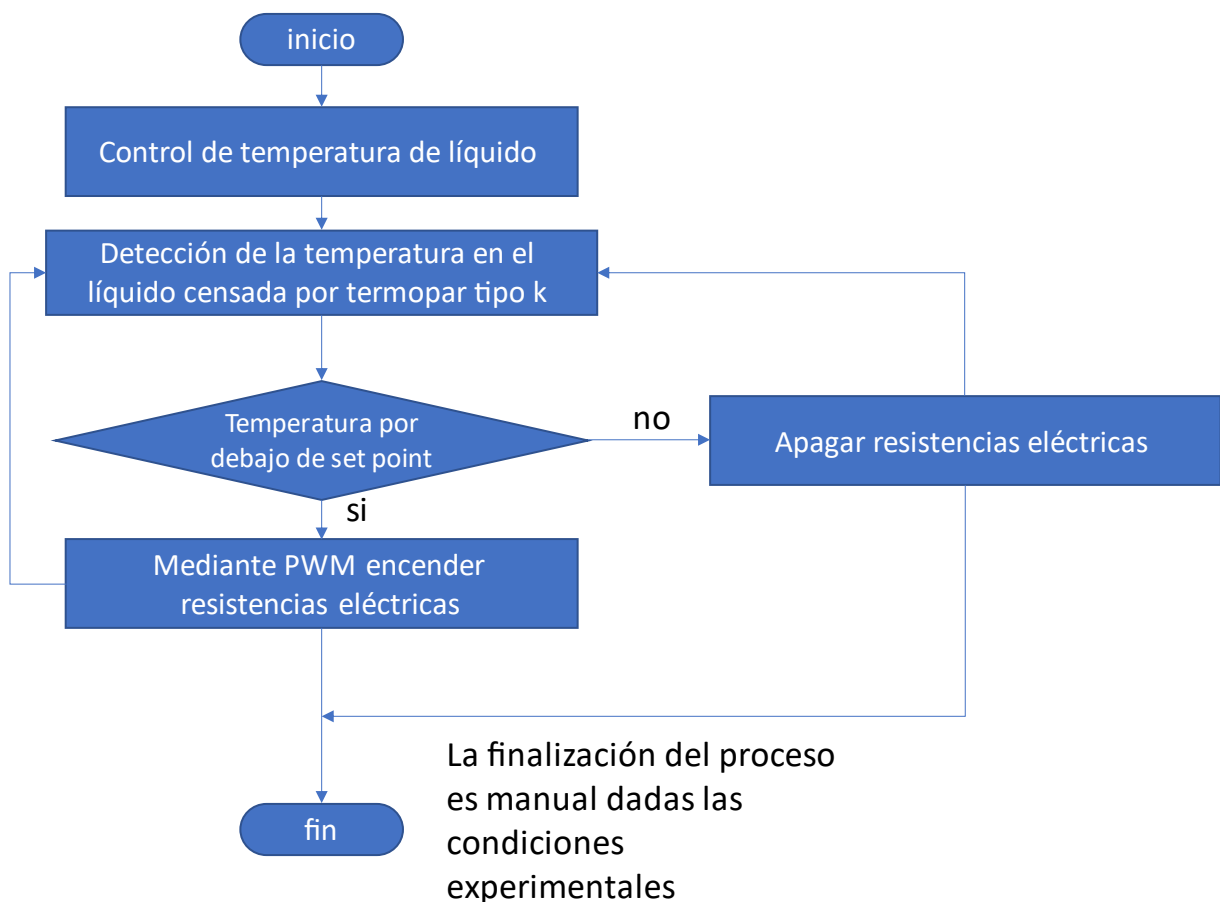


Figura 18. diagrama de flujo del control implementado. Fuente [Autores]

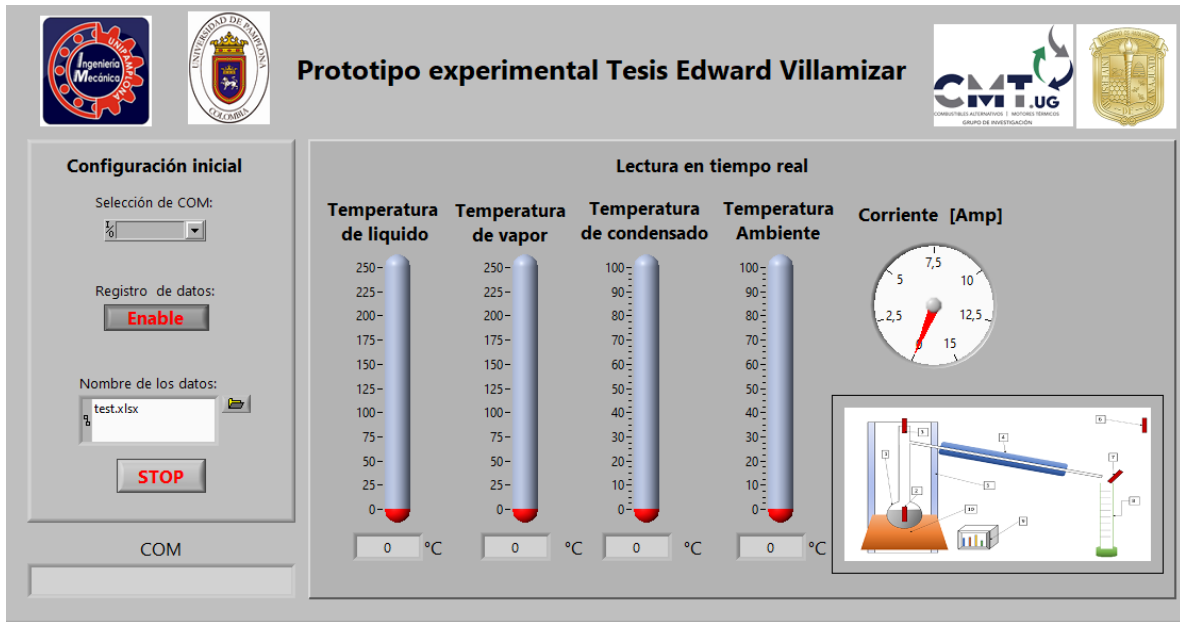


Figura 19. Interfaz gráfica desarrolla en LabVIEW. Fuente [Autores]

5.2.2 Cuantificador de kWh.

Otro elemento importante en el registro de los parámetros de influencia en la experimentación es la cantidad de energía consumida, la corriente y el voltaje y con ello poder determinar la potencia que se está haciendo efectiva en el experimento. El determinar el consumo de Wh permite estimar el costo de fluido eléctrico que acarrea una prueba en su totalidad. Las especificaciones del analizador de calidad de energía se describen a continuación y los indicativos en la pantalla de medición del equipo se indican en la figura 20.

- Potencia con un rango de 0-22 KW.
- Energía con un rango de 0-9999 KWh.
- Voltaje con un rango de 80-260 V en corriente alterna.
- Corriente con un rango de 0-100 A.



Figura 20. Interfaz de medidor de parámetros eléctricos. Fuente [Autores]

6. METODOLOGÍA

Para el desarrollo de este proyecto es importante identificar la mayor cantidad de propiedades de la materia prima, pues junto con la metodología experimental determina los parámetros influyentes en el proceso experimental. Es por esto que se describe a lo largo de este capítulo las metodologías a desarrollar en la caracterización de la materia prima, el desarrollo experimental de la pirolisis y las propiedades determinadas a los productos. Seguido de los parámetros experimentales y el diseño de experimentos que se aplicó a lo largo del desarrollo de este trabajo de grado.

6.1 MATERIA PRIMA

El aceite usado en este trabajo de la referencia 20W50 almacenada por el taller automotriz Ran-Cars S.A.S. en la ciudad de Pamplona, Norte de Santander, Colombia, quienes clasifican exclusivamente aceite lubricante usado producto del mantenimiento vehicular. Este residuo procede de la extracción a vehículos automotrices de baja cilindrada siendo los más utilizados a nivel local para la movilidad particular, de los que se recupera entre 1.5 y 3 litros en cada mantenimiento. Este residuo presenta un color oscuro similar al negro del crudo, se encuentra en estado líquido de viscosidad media y un olor característico del aceite lubricante usado, no soluble en agua, y con presencia de partículas sólidas granulares que se decantan en los recipientes del residuo. La caracterización se realiza determinando la densidad (ASTM D 1298), viscosidad (ASTM D 445) e índice de viscosidad (DIN 2909).



Figura 21. Muestra del aceite lubricante usado 20W50. Fuente [Autores]

6.2 PROCESO DE PIRÓLISIS

Para el desarrollo de una prueba se realiza inicialmente el pesaje del matraz de destilación y de la probeta vacíos, se introducen esferas de vidrio en el matraz y se pesa de nuevo. Posteriormente, se procede a verter 110 ± 2 mL respectivamente pesados del aceite lubricante usado dentro del matraz. Finalmente, se acopla el matraz al condensador. Las condiciones de temperatura máxima y velocidad de calentamiento de líquido son reguladas mediante el sistema de control haciendo uso de la instrumentación previamente descrita. Establecidos los parámetros se procede al inicio del calentamiento, mediante la visualización de las temperaturas en tiempo real, y en comparativa con los datos característicos del equipo, es monitoreada la prueba. Así son previstos los tiempos de la evaporación del aceite usado, condensación de gases para la obtención de productos líquidos y carbonización de los residuos en el matraz de destilación. Bajo estas condiciones, se da por finalizada la prueba por cualquiera de dos posibles estados: tener producto líquido con el 95% del volumen inicial, o alcanzar una tendencia decreciente de obtención de producto líquido igual o menor a 1 mL/min. Esta segunda condición requiere de un procedimiento adicional, el cual consiste en retirar el producto obtenido y aumentar la temperatura para lograr carbonizar la materia prima restante.

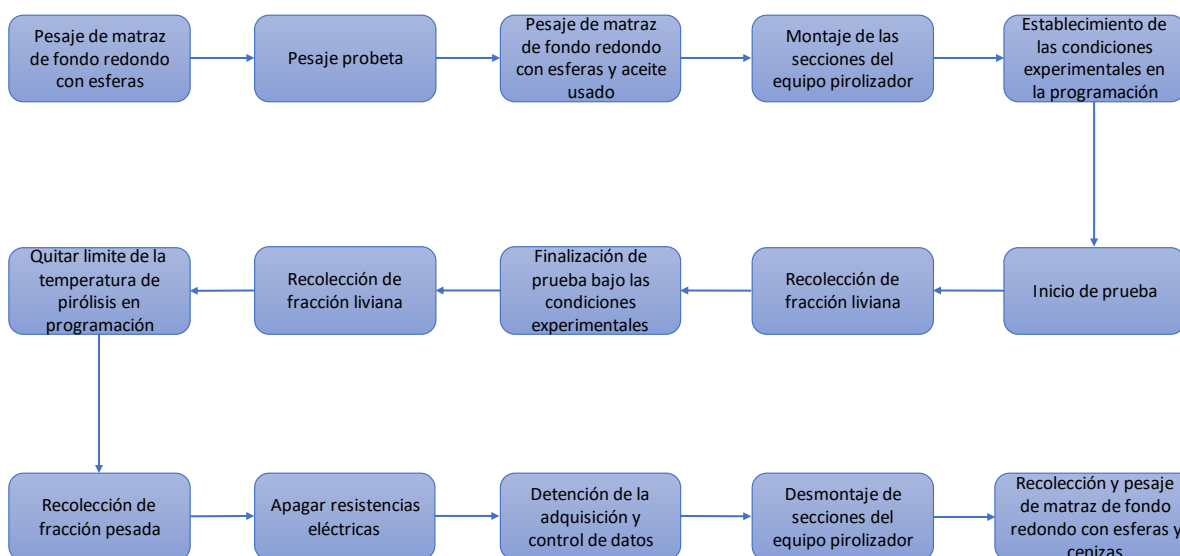


Figura 22. Diagrama de flujo del proceso experimental. Fuente [Autores]

6.3 DISEÑO DE EXPERIMENTOS

El diseño de experimentos utilizado para este proyecto consiste en variar la *temperatura límite/temperatura de pirólisis* (390 °C o 420 °C) a una potencia eléctrica variable, la cual es dependiente de la velocidad de calentamiento (15.9 °C/min, 19.2 °C/min o 22.5 °C/min); estipulando este experimento a un diseño

factorial 2² con un punto centrado en la cara del factor velocidad de calentamiento. Las condiciones experimentales son presentadas en la tabla 4.

Tabla 5. Parámetros experimentales. Fuente [Autores]

| Parámetros fijos | | |
|--|-----------------|------|
| Cantidad de muestra [mL] | 110 ± 2 | |
| Temperatura de condensación [°C] | 18 ± 0.5 | |
| Potencia eléctrica [W] | 1200 ± 1 | |
| Parámetros variable | | |
| Temperatura máxima de líquido ± 0.25 [°C] | | |
| Nivel (-) P-390 | Nivel (+) P-420 | |
| 390 | 420 | |
| Velocidad de calentamiento ± 0.25 [°C/min] | | |
| 15.9 | 19.2 | 22.5 |

6.4 CARACTERIZACIÓN DE PRODUCTOS

Terminada una prueba, la recolección de los productos se realiza en dos partes. Productos líquidos: Son los productos obtenidos de la destilación, son colectados en la probeta donde se registra su volumen producido. Residuos sólidos: Son obtenidos de la carbonización de la materia prima en el matraz de destilación, terminada la prueba se realiza el pesaje nuevamente del matraz de destilación que contiene las esferas de vidrio junto con las cenizas de la materia prima; posteriormente, se procede a separar las esferas de vidrio de las cenizas mediante un tamiz metálico de (0.5-2 mm). Los rendimientos líquidos, gases y residuos son calculados de acuerdo con las Ecuaciones (1), (2) y (3). Además, las Ecuaciones (4) y (5) son usadas para la determinación de la densidad. Por otro lado, mediante la instrumentación de la caja de control, haciendo uso potenciómetro se registra el dato de la energía usada durante una prueba en KWh.

$$\% \eta_{pl} = \frac{m_{pl} - m_{pv}}{m_{mea} - m_{me}} * 100 \quad \text{Ecuación (1)}$$

$$\% \eta_{ps} = \frac{m_{mec} - m_{me}}{m_{mea} - m_{me}} * 100 \quad \text{Ecuación (2)}$$

$$\% \eta_{pg} = 100 - \% \eta_{ps} - \% \eta_{pl} - \left(\frac{m_{rr} - m_{rv}}{m_{mea} - m_{me}} * 100 \right) \quad \text{Ecuación (3)}$$

$$\rho_a = \frac{m_{mea} - m_{me}}{V_a} \quad \text{Ecuación (4)}$$

$$\rho_{pl} = \frac{m_{pl} - m_{pv}}{V_{pl}} \quad \text{Ecuación (5)}$$

Donde:

m_{mv} : Masa del matraz de destilación vacío.

m_{me} : Masa del matraz de destilación con esferas.

m_{mea} : Masa del matraz de destilación con esferas y aceite usado.

m_{pv} : Masa de la probeta de vidrio vacía.

m_{pl} : Masa de probeta de vidrio con productos líquidos.

m_{mec} : Masa del matraz de destilación con esferas y cenizas.

m_{rv} : Masa del recipiente para residuos vacío.

m_{rr} : Masa del recipiente para residuos con residuos.

V_a : Volumen del aceite usado.

V_{pl} : Volumen de los productos líquidos.

$\% \eta_{pl}$: Porcentaje de rendimiento de productos líquidos en masa.

$\% \eta_{ps}$: Porcentaje de rendimiento de productos sólidos (cenizas) en masa.

$\% \eta_{pg}$: Porcentaje de rendimiento de productos gaseosos (gases no condensables) en masa.

ρ_{pl} : Densidad de los productos líquidos.

ρ_{pa} : Densidad del aceite usado.

Para la caracterización del producto líquido obtenido se determinan las siguientes propiedades:

- Densidad bajo la norma ASTM D 1298.
- Poder calorífico ASTM D 240.
- Análisis de composición de carbonos por cromatografía de gases.

El análisis de composición efectuado a los productos líquidos y se desarrolla por medio de un cromatógrafo VARIAN 450 GC, usando como patrón el estándar de alcanos C₇-C₃₀ suministrado por Supelco, en una columna de 100 m x 0.5 μ m (id) x 0.5 nm, un Split ratio de 4 a una temperatura de 280 °C, un detector de flama ionizante (FID) a una temperatura de 280 °C. También es determinado el poder calorífico de acuerdo con la ASTM D 240 haciendo uso de una bomba calorimétrica IKA C 6000 con método isoperibólico.

7. RESULTADOS

7.1 MATERIA PRIMA

7.1.1 Caracterización del aceite residual.

Las propiedades encontradas en el aceite usado de motor son comparadas con las dispuestas en la hoja de especificaciones del aceite virgen [82], y presentadas en la tabla 5. Se presenta una disminución en la densidad, en cuanto a la viscosidad a 40 °C disminuye en un 10.5% y a 100 °C aumenta en un 33.7% afectando el índice de viscosidad de 141 a 220. Este comportamiento de la viscosidad se debe a presencia de contaminantes en el aceite como agua, que se vería reflejada en la viscosidad medida a los 40 °C con una disminución; mientras que al tomar la viscosidad a los 100 °C ya no se encuentra presente el agua.

Tabla 6. Propiedades del aceite virgen y usado. Fuente [Autores]

| Propiedad | Virgen | Usado | Estándar |
|--|--------|-------|-----------------|
| Gravedad específica* | 0.880 | 0.867 | ASTM D1298 [83] |
| Viscosidad cinemática a 40 °C mm ² /s (u) | 154 | 137.8 | |
| Viscosidad cinemática a 100 °C mm ² /s (u) | 19 | 25.4 | ASTM D445 [84] |
| Índice de viscosidad** | 141 | 220 | |

*La gravedad específica es determinada con una densidad de referencia del agua a 4 °C de 1000 kg/m³

**El índice de viscosidad es calculado bajo las especificaciones de la normativa DIN 2909 [85]

7.1.2 Curvas de calentamiento y conversión

El comportamiento de la temperatura del líquido durante las pruebas realizadas es presentado en la Figura 23, el ajuste del gráfico muestra las curvas promedio de calentamiento para cada experimento con su respectiva replica, donde se observa la desviación para cada curva. Esta figura muestra el comportamiento repetible de la velocidad de calentamiento obtenida en el equipo en la sección transitoria. Por otro lado, el comportamiento periódico en la sección estacionaria de las pruebas, producto del encendido y apagado de las resistencias debido al control por límite de temperatura e inercia térmica.

Los experimentos a 390 °C requieren mayor tiempo de prueba para alcanzar las condiciones de finalización descritas anteriormente. Por otro lado, las pequeñas variaciones en la región transitoria son atribuidas a las fluctuaciones del fluido eléctrico; ocasionando alteración en la potencia eléctrica de las resistencias y por tanto en el calor transferido al balón de fondo redondo que almacena la materia prima y finalmente afectando en la conversión de la materia prima a producto líquido y que se aprecian en la figura 24.

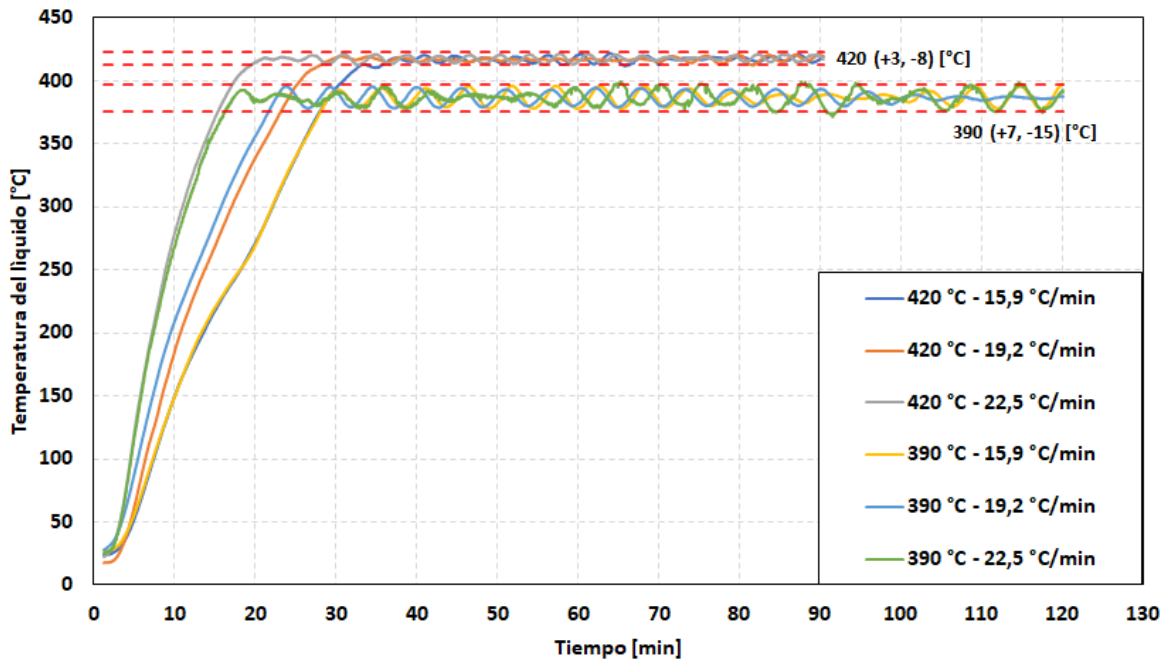


Figura 23. Curvas de calentamiento del aceite usado 20W50 con temperaturas límite de 390 °C y 450 °C, y velocidades de calentamiento de 15.9 °C/min, 19.2 °C/min y 22.5 °C/min. Fuente [Autores]

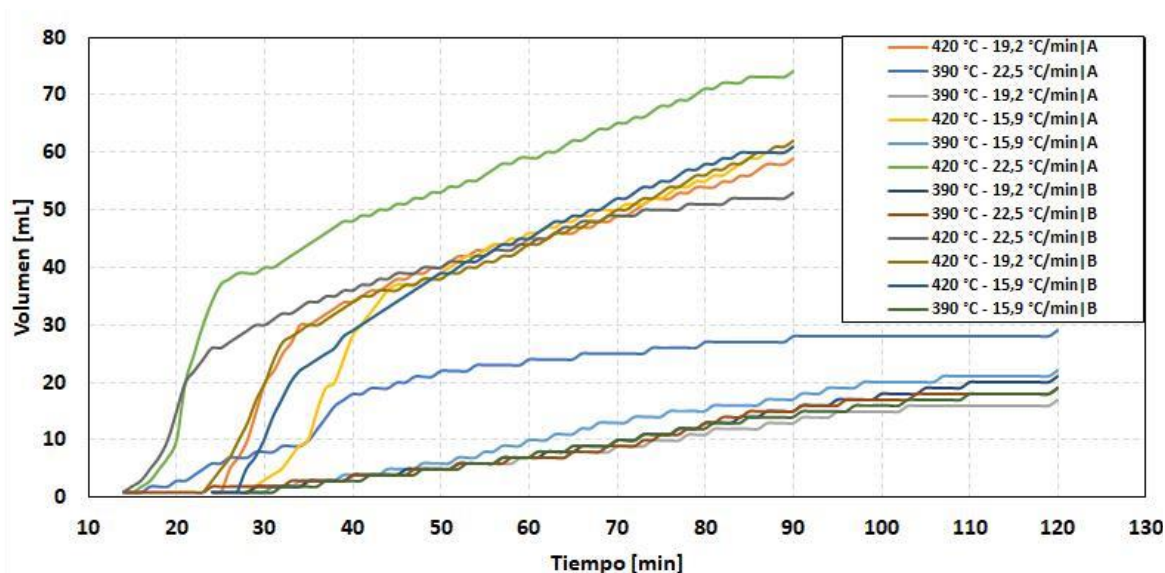


Figura 24. Curvas de conversión calentamiento del aceite usado 20W50 con temperaturas límite de 390 °C y 450 °C, y velocidades de calentamiento de 15.9 °C/min, 19.2 °C/min y 22.5 °C/min. Fuente [Autores]

7.2 RESULTADOS DISEÑO DE EXPERIMENTO

De acuerdo con la metodología propuesta, se creó en el Software Statgraphics Centurión un diseño factorial multinivel que consiste de 12 pruebas que deben ser ejecutadas en 2 bloques, para un total de 6 experimentos. Para los factores experimentales Velocidad de calentamiento (15.9 – 19.2 – 22.5 [°C/min]) y Temperatura de pirólisis (390 – 420 [°C]) se estudiaron las respuestas presentadas en la tabla 6.

Tabla 7. Variables de respuesta para el diseño experimental. Fuente [Autores]

| <i>Respuestas</i> | <i>Unidades</i> |
|--------------------------------------|-------------------|
| Producto líquido | |
| Sólidos (Cenizas) | % kg/kg |
| Gases no condensa | |
| Residuo líquido | |
| Densidad | kg/m ³ |
| Poder calorífico liq | kJ/kg |
| C ₇ -C ₁₀ liq | |
| C ₁₁ -C ₁₄ liq | % kg/kg |
| C ₁₅ -C ₃₀ liq | |
| Energía consumida | kWh |

Partiendo de diseño experimental con las variables de respuesta y en conjunto con los productos de la experimentación se presenta la tabla 7, donde se aprecia el resumen de los resultados obtenidos para el análisis del proceso experimental.

Los productos líquidos obtenidos de la sección experimental bajo el diseño de experimentos presentado son mostrados en la figura 25. Las coloraciones de las pruebas muestran un color más cristalino para las de mayor temperatura como se aprecia. Esto posiblemente consecuencia de los volátiles que se presentan en temperaturas superiores a los 390 °C e inferiores de los 420 °C. Esta coloración también es explicable debido a la presencia de contaminantes y compuestos asfálticos en las pruebas de coloración más oscura.

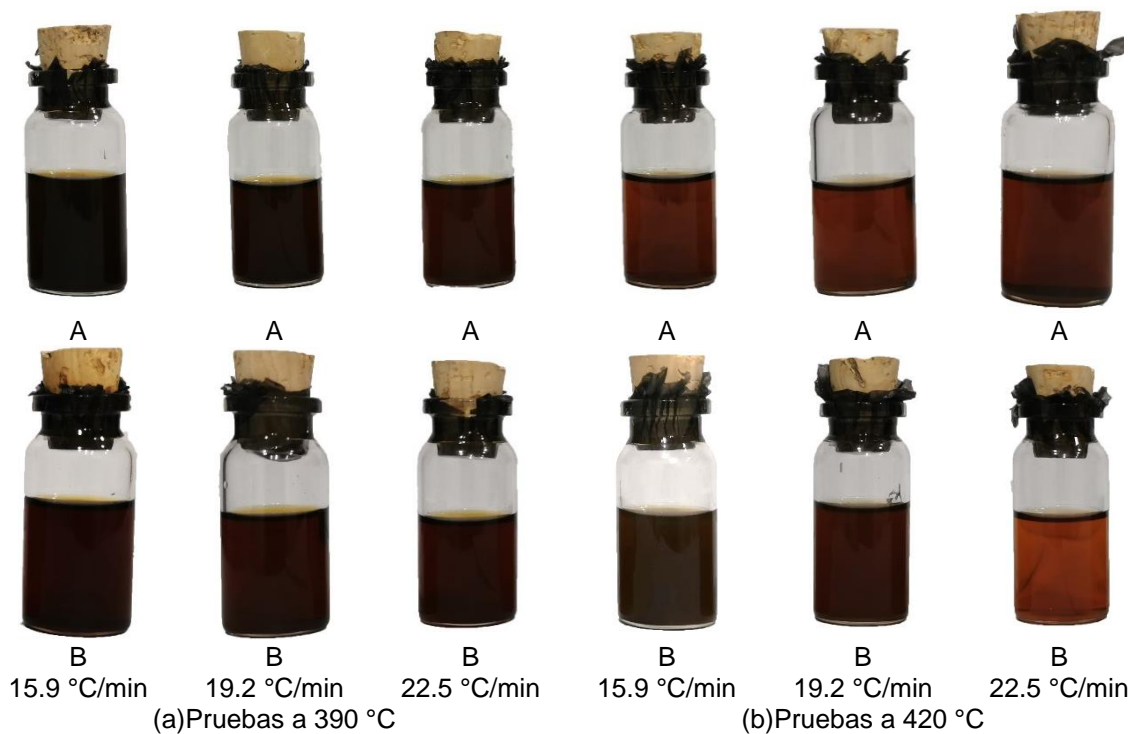


Figura 25. Producto líquido obtenido. Fuente [Autores]

Tabla 8. Resultados de las variables de respuesta respecto a los factores experimentales. Fuente [Autores]

| Bloque | Velocidad de calentamiento °C/min | Temperatura de pirólisis °C | Producto líquido %Kg/Kg | Sólidos (Cenizas) %Kg/Kg | Gases no condensables %Kg/Kg | Residuo líquido %Kg/Kg | Densidad kg/m ³ | Poder calorífico kJ/kg | C7-C10 %Kg/Kg | C11-C14 %Kg/Kg | C15-C30 %Kg/Kg | Energía consumida KWh |
|--------|--------------------------------------|--------------------------------|----------------------------|-----------------------------|---------------------------------|---------------------------|-------------------------------|---------------------------|------------------|-------------------|-------------------|--------------------------|
| 1 | 15,9 | 390 | 15,13 | 2,558 | 8,231 | 74,08 | 618,2 | 45459,5 | 48,20 | 25,4 | 26,4 | 1,657 |
| 1 | 19,2 | 390 | 11,57 | 2,893 | 7,748 | 77,79 | 658,8 | 45372 | 47,78 | 27,28 | 24,51 | 1,724 |
| 1 | 22,5 | 390 | 20,21 | 2,591 | 6,632 | 70,57 | 672,4 | 45327 | 49,28 | 34,51 | 16,21 | 1,713 |
| 1 | 15,9 | 420 | 49,95 | 0,826 | 7,534 | 41,69 | 793,4 | 45899,5 | 31,14 | 32,93 | 35,93 | 1,48 |
| 1 | 19,2 | 420 | 48,74 | 2,000 | 7,474 | 41,79 | 784,7 | 45766 | 30,14 | 34,95 | 34,91 | 1,591 |
| 1 | 22,5 | 420 | 59,92 | 1,240 | 7,231 | 31,61 | 783,8 | 45814 | 21,55 | 27,52 | 50,48 | 1,467 |
| 2 | 15,9 | 390 | 11,92 | 0,617 | 7,091 | 80,37 | 610,5 | 45296,5 | 45,46 | 26,57 | 24,82 | 1,633 |
| 2 | 19,2 | 390 | 14,09 | 2,670 | 8,246 | 75,05 | 642,9 | 45236,5 | 47,78 | 27,28 | 24,51 | 1,761 |
| 2 | 22,5 | 390 | 13,21 | 2,096 | 6,289 | 78,41 | 663,2 | 45360,5 | 50,66 | 33,56 | 15,35 | 1,756 |
| 2 | 15,9 | 420 | 49,38 | 3,112 | 7,469 | 40,04 | 780,3 | 45839 | 30,35 | 35,01 | 34,15 | 1,537 |
| 2 | 19,2 | 420 | 50,05 | 1,145 | 8,012 | 40,79 | 775,8 | 46053,5 | 31,85 | 35,87 | 31,58 | 1,631 |
| 2 | 22,5 | 420 | 44,54 | 3,075 | 7,423 | 44,96 | 792,5 | 45763,5 | 20,37 | 32,13 | 47,15 | 1,483 |

7.2.1 Poder calorífico

El poder calorífico se define como la cantidad de energía generada por unidad de masa debida a la combustión del producto líquido obtenido en el proceso de pirólisis del aceite usado de motor.

7.2.1.1 Influencia experimental de los factores

La figura 26 nos indica que el factor de la velocidad de calentamiento (A), la combinatoria de los factores AB y el cuadrático AA no presentan una influencia significativa consecuencia de apreciarse que únicamente influye la temperatura de pirólisis en los experimentos analizados obteniendo a mayor temperatura un mayor valor de poder calorífico. El poder calorífico promedio para el total de las pruebas descritas en la tabla 7 fue de 45 598.9 KJ/Kg presentando una desviación estándar de ± 282 lo que indica que en realidad el comportamiento del poder calorífico es inherente a las condiciones experimentales, esto es efecto de la materia prima pues son hidrocarburos procesados provenientes de fuentes fósiles; además, este valor es acorde a los presentados en la literatura [86].

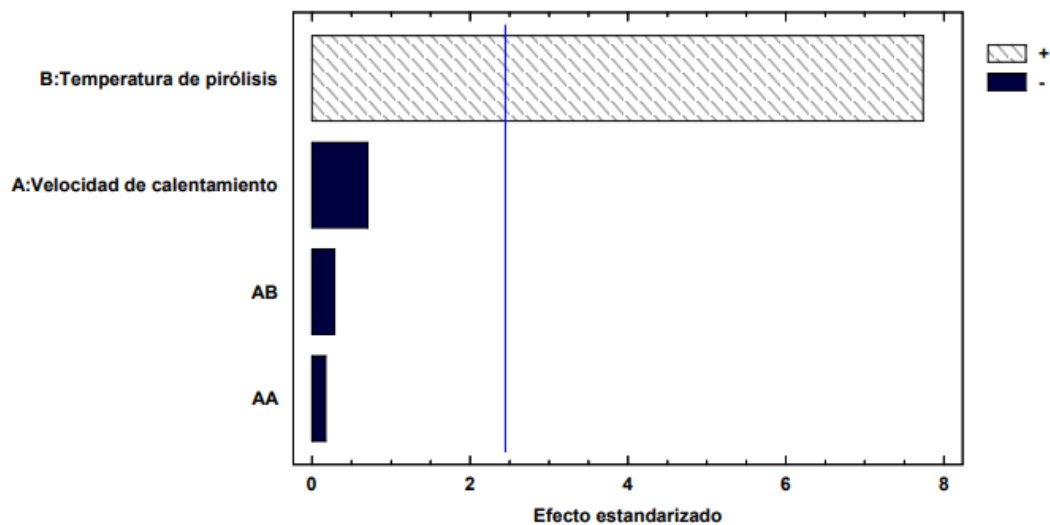


Figura 26. Diagrama de Pareto estandarizado para poder calorífico. Fuente [Autores]

7.2.2 Producto líquido (fracción liviana)

La fracción liviana o producto líquido es el resultado de realizar el proceso de pirólisis bajo las condiciones de cada experimento. Es calculado mediante la ecuación (1).

7.2.2.1 Influencia experimental de los factores

El factor de la velocidad de calentamiento (A), la combinatoria de los AB y el cuadrático AA no presentan una influencia significativa como se aprecia en la figura 27, donde solo influye la temperatura de pirólisis (B) en los experimentos analizados obteniendo a mayor temperatura un mayor rendimiento de producto líquido (fracción liviana). El mayor rendimiento, del 60%, obtenido a temperatura de pirólisis de 420 °C y velocidad de calentamiento 22.5 °C/min es un resultado medio dentro de lo reportado en la literatura tabla 2, que presenta rendimientos de los diferentes estudios entre el 20% y el 90%.

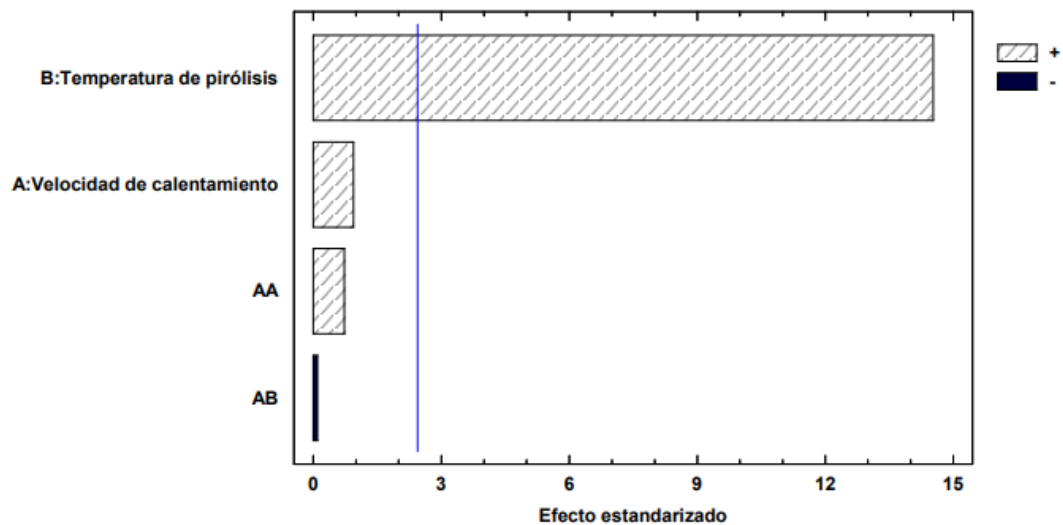


Figura 27. Diagrama de Pareto estandarizado para producto líquido. Fuente [Autores]

7.2.3 Sólidos (Cenizas)

Los productos sólidos son obtenidos, posterior a la obtención de los residuos líquidos, es decir, una vez se ha procesado toda la materia prima posible con el equipo pirolizador, entonces se puede obtener estas cenizas del balón de fondo redondo un vez enfriado el equipo. Es calculado mediante la ecuación (2).

7.2.3.1 Influencia experimental de los factores

De acuerdo con la Figura 28 los factores experimentales no tienen efectos estadísticamente significativos frente al rendimiento de sólidos (Cenizas), los efectos estandarizados de los factores y sus combinaciones están por debajo de la muestra estándar. El rendimiento de sólidos promedio para el total de las pruebas descritas en la Tabla 7 fue de 2.1 %Kg/Kg presentando una desviación estándar de ± 0.9 %Kg/Kg, mostrando que el comportamiento del rendimiento de sólidos no se relaciona con la temperatura de pirólisis o la velocidad de calentamiento, es una

respuesta más ligada al tipo de materia prima, cantidad y procedimiento termoquímico empleado en ella.

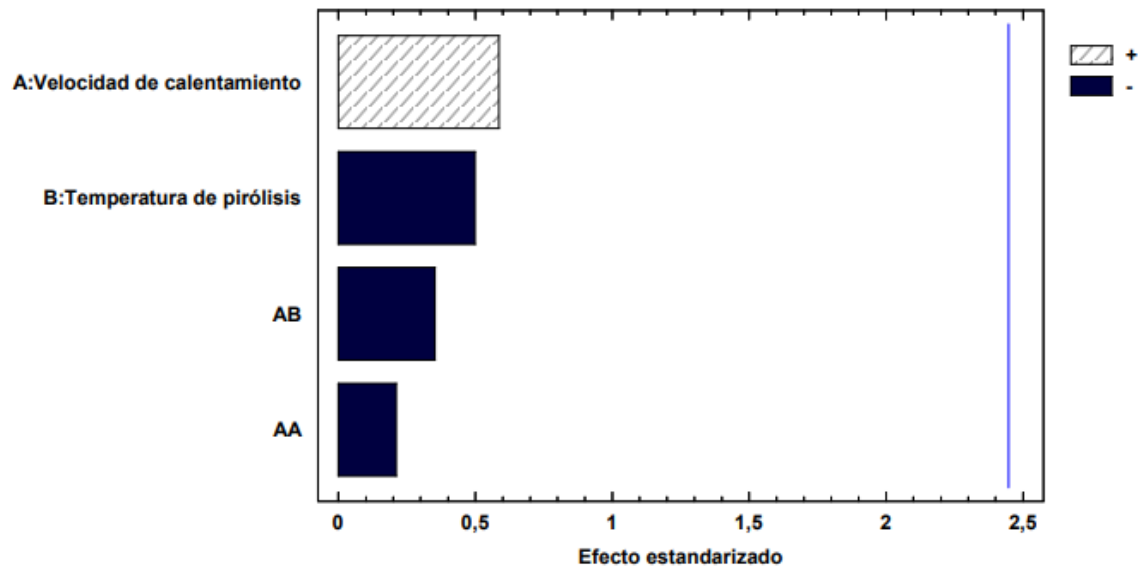


Figura 28. Diagrama de Pareto estandarizado para sólidos (Cenizas). Fuente [Autores]

7.2.4 Gases no condensables

El producto gaseoso se obtiene a lo largo de la obtención de las fracciones liviana y pesada de productos líquidos, su composición más probable consta de cadenas cortas de carbonos, aunque debe ser almacenado y analizado adecuadamente para determinar estas hipótesis. Se calcula su proporción mediante la ecuación (3).

7.2.4.1 Influencia experimental de los factores

La Figura 29 permite observar que para el rendimiento de los gases no condensables los factores experimentales no tienen efectos estadísticamente significativos, los efectos estandarizados de los factores y sus combinatorias son inferiores a la muestra estándar. El rendimiento de gases no condensables promedio para el total de las pruebas descritas en la Tabla 7 fue de 7.4 %Kg/Kg presentando una desviación estándar de ± 0.6 %Kg/Kg, señalando que no hay una relación del rendimiento de los gases a temperatura de pirólisis o la velocidad de calentamiento variable, debido a ser una respuesta más ligada al tipo de materia prima, cantidad y procedimiento termoquímico empleado en ella.

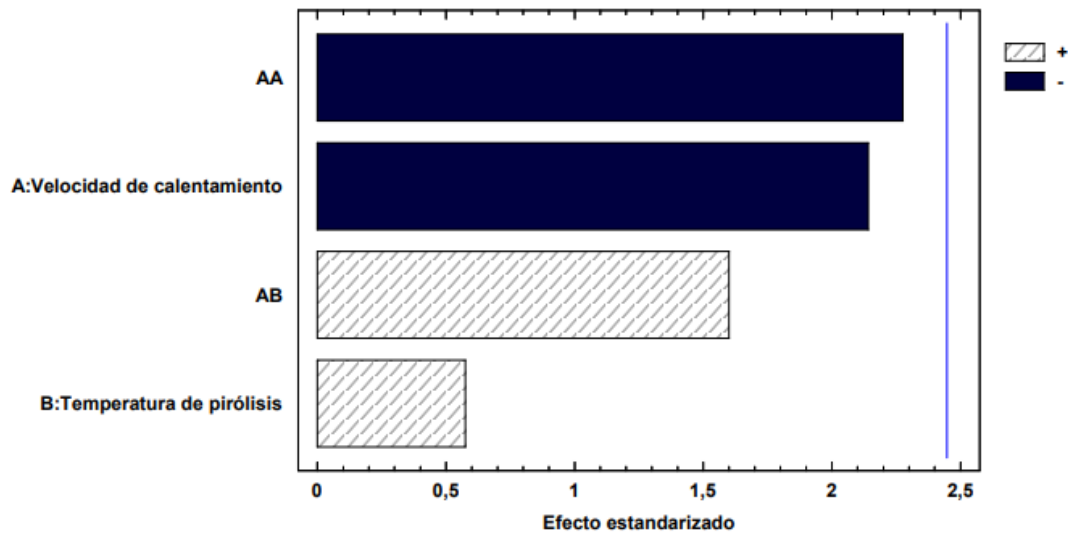


Figura 29. Diagrama de Pareto estandarizado para gases no condensables. Fuente [Autores]

7.2.5 Producto Líquido (fracción pesada)

Los residuos líquidos o fracción pesada son obtenidos posterior a la obtención de los productos líquidos, es decir, posterior a la finalización de una prueba experimental, es entonces cuando en la programación del equipo se permite el aumento del *setpoint* o temperatura de pirólisis, obteniendo otros productos líquidos de mayor temperatura de descomposición.

7.2.5.1 Influencia experimental de los factores

La figura 30 permite exponer que los factores velocidad de calentamiento (A), combinatoria de los AB y el cuadrático AA no presentan una influencia significativa en el rendimiento de residuos líquidos (fracción pesada), al cual solo influye la temperatura de pirólisis (B) en los experimentos analizados. Donde se obtiene menor rendimiento de residuo líquido a mayor temperatura de pirólisis. El rendimiento de sólidos y gases no condensables no se relaciona con los factores experimentales estudiados, así que es esperable este comportamiento complementario entre la producción de fracciones líquidas livianas y pesadas dándose una influencia negativa en los factores para la fracción pesada y positiva para la fracción liviana.

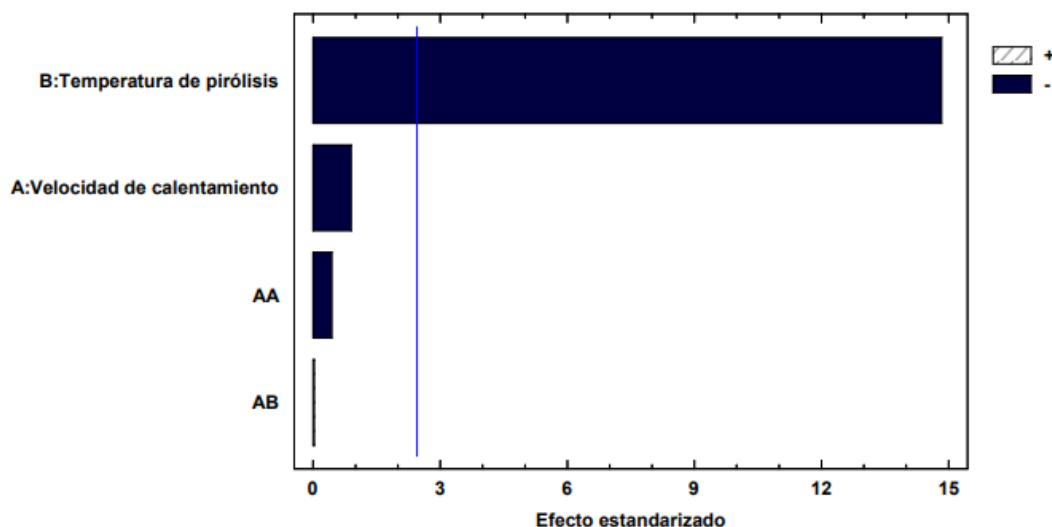


Figura 30. Diagrama de Pareto estandarizado para residuo líquido. Fuente [Autores]

7.2.6 Análisis de composición (C₇-C₁₀, C₁₁-C₁₄, C₁₅-C₃₀) del producto líquido

Los compuestos orgánicos que solo contienen carbono e hidrógeno se denominan hidrocarburos. Se pueden dividir en dos categorías: hidrocarburos alifáticos e hidrocarburos aromáticos. La clasificación usada para separar familias de estas cadenas de hidrocarburos son denominadas ligeras (C₇-C₁₀), medias (C₁₁-C₁₄) y pesadas (C₁₅-C₃₀).

7.2.6.1 Influencia experimental de los factores

Las figuras 31, 32 y 33 muestran la influencia estadística de los factores experimentales velocidad de calentamiento (A), temperatura de pirólisis (B) y sus combinaciones (AB y AA) respecto a la composición en términos del número de carbonos presentes en las cadenas de hidrocarburos.

Para cadenas ligeras (C₇-C₁₀), se aprecia que todos los factores y sus combinatorias tienden a afectar de forma negativa la aparición de las cadenas ligeras de hidrocarburos con especial significancia para la temperatura de pirólisis con gran influencia, esto se ve de igual forma soportado en el análisis de varianza (tabla 9) donde solo dos factores (B y AB) tienen un Valor-P menor que 0.05, indicando que son significativamente diferentes de cero con un nivel de confianza del 95,0%, y por tanto, se relacionan estadísticamente con la presencia de cadenas ligeras. La siguiente ecuación presenta la regresión que se ajusta a los datos y permite la estimación de una optimización para maximizar la obtención de cadenas ligeras en el marco de los factores estudiados permitiendo alcanzar una respuesta de cadenas

ligeras (C₇-C₁₀) de 49.97 %Kg/Kg bajo una velocidad de calentamiento de 20.35 °C/min y una temperatura de pirólisis de 390 °C.

$$(C_7 - C_{10})_{liq} = -256,633 + 33,9076(VC) + 0,565778(TP) - 0,207645(VC)^2 - 0,0652778(VC)(TP) \quad r^2 = 0,979$$

Donde;

VC: Velocidad de calentamiento

TP: Temperatura pirólisis

Tabla 9. Análisis de Varianza para C₇-C₁₀ liq. Fuente [Autores]

| Fuente | Suma de Cuadrados | Gl | Cuadrado Medio | Razón-F | Valor-P |
|-------------------------------|-------------------|----|----------------|---------|---------|
| A: Velocidad de calentamiento | 22,078 | 1 | 22,078 | 4,55 | 0,0768 |
| B: Temperatura de pirólisis | 1276,38 | 1 | 1276,38 | 263,21 | 0,0000 |
| AA | 13,6353 | 1 | 13,6353 | 2,81 | 0,1446 |
| AB | 83,5278 | 1 | 83,5278 | 17,23 | 0,0060 |
| bloques | 0,2187 | 1 | 0,2187 | 0,05 | 0,8389 |
| Error total | 29,0952 | 6 | 4,8492 | | |
| Total (corr.) | 1424,93 | 11 | | | |

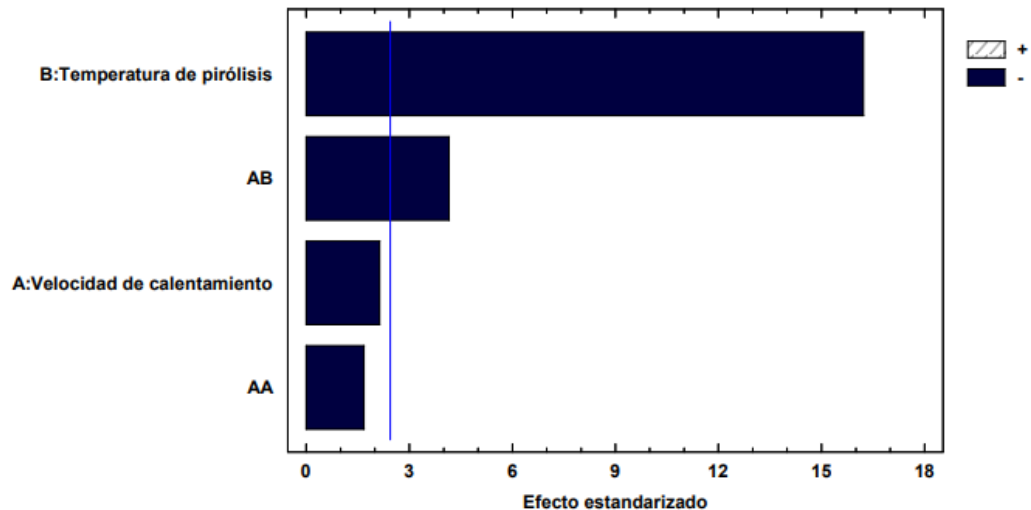


Figura 31. Diagrama de Pareto estandarizado para fracción liviana de hidrocarburos. Fuente [Autores]

Para cadenas medias (C₁₁-C₁₄), se aprecia que solo son estadísticamente significativos B y la combinación AB, pero en diferente proporción y tipo de efecto; por el lado de AB tiene una tendencia a disminuir la presencia de cadenas medias, mientras que B tiende a aumentar la presencia de cadenas medias en menor proporción. Esto se ve de igual forma soportado en el análisis de varianza (tabla 10) donde solo dos factores (B y AB) tienen un Valor-P menor que 0.05, indicando que son significativamente diferentes de cero con un nivel de confianza del 95,0%, y,

por tanto, se relacionan estadísticamente con la presencia de cadenas medias. La siguiente ecuación presenta la regresión que se ajusta a los datos y permite la estimación de una optimización para maximizar la obtención de cadenas medias en el marco de los factores estudiados permitiendo alcanzar una respuesta de cadenas medias (C_{11} - C_{14}) de 35.01 %Kg/Kg bajo una velocidad de calentamiento de 15.9 °C/min y una temperatura de pirólisis de 420 °C.

$$(C_{11} - C_{14})_{liq} = -520,083 + 26,6198(VC) + 1,31482(TP) - 0,0359275(VP)^2 - 0,0615909(VC)(TP) \quad r^2 = 79,3$$

Donde;

VC: Velocidad de calentamiento

TP: Temperatura pirólisis

Tabla 10. Análisis de Varianza para C_{11} - C_{14} liq. Fuente [Autores]

| Fuente | Suma de Cuadrados | de GI | Cuadrado Medio | Razón-F | Valor-P |
|-------------------------------|-------------------|-------|----------------|---------|---------|
| A: Velocidad de calentamiento | 7,62451 | 1 | 7,62451 | 1,30 | 0,2978 |
| B: Temperatura de pirólisis | 47,243 | 1 | 47,243 | 8,05 | 0,0297 |
| AA | 0,408204 | 1 | 0,408204 | 0,07 | 0,8008 |
| AB bloques | 74,359 | 1 | 74,359 | 12,67 | 0,0119 |
| Error total | 5,10907 | 1 | 5,10907 | 0,87 | 0,3868 |
| Total (corr.) | 35,2183 | 6 | 5,86971 | | |
| | 169,962 | 11 | | | |

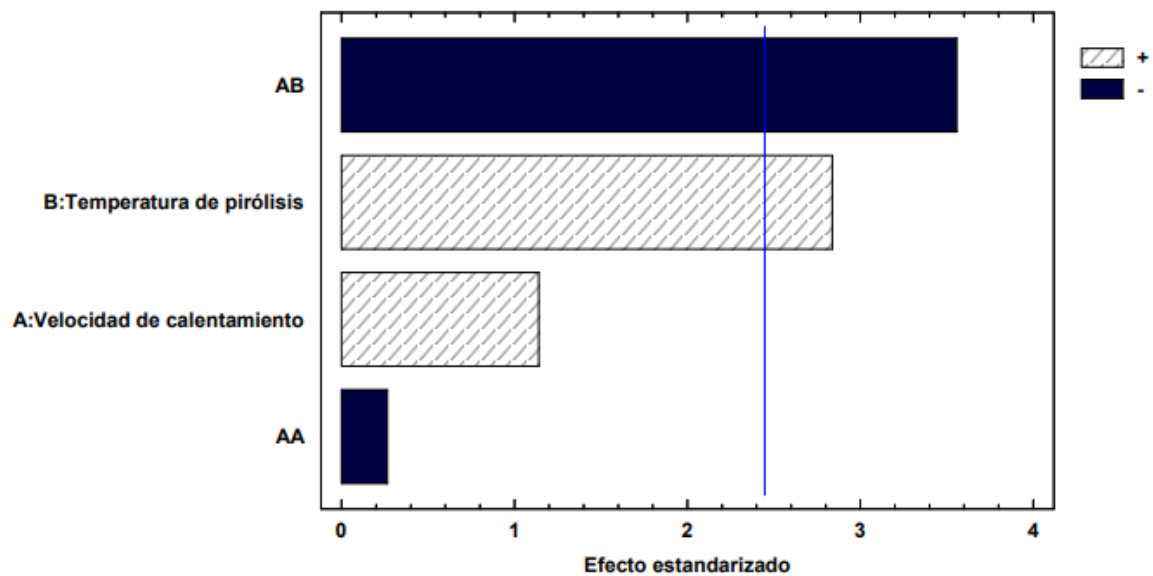


Figura 32. Diagrama de Pareto estandarizado para fracción media de hidrocarburos. Fuente [Autores]

Para cadenas pesadas (C₁₅-C₃₀), como se espera, se presenta un comportamiento en el efecto estandarizado de los factores y sus combinaciones, inverso al de las cadenas ligeras, dado que la presencia de cadenas medias no está fuertemente influida por los factores experimentales. De esta forma se tiene que todos los factores y sus combinatorias tienden a afectar de forma positiva la aparición de las cadenas pesadas de hidrocarburos con especial significancia para la temperatura de pirólisis con gran influencia, esto se ve de igual forma soportado en el análisis de varianza (tabla 11) donde solo dos factores (B y AB) tienen un Valor-P menor que 0.05 , indicando que son significativamente diferentes de cero con un nivel de confianza del 95,0%, y por tanto, se relacionan estadísticamente con la presencia de cadenas pesadas. La siguiente ecuación presenta la regresión que se ajusta a los datos y permite la estimación de una optimización para maximizar la obtención de cadenas pesadas en el marco de los factores estudiados permitiendo alcanzar una respuesta de cadenas pesadas (C₁₅-C₃₀) de 46.73 %Kg/Kg bajo una velocidad de calentamiento de 20.5 °C/min y una temperatura de pirólisis de 420 °C.

$$(C_{15} - C_{30})_{liq} = 802,158 - 56,5659(VC) - 1,72008(TP) + 0,223485(VC^2) + 0,119217(VC)(TP) \quad r^2 = 91,6$$

Donde;

VC: Velocidad de calentamiento

TP: Temperatura pirólisis

Tabla 11. Análisis de Varianza para C₁₅-C₃₀ liq. Fuente [Autores]

| Fuente | Suma de Cuadrados | Gl | Cuadrado Medio | Razón-F | Valor-P |
|-------------------------------|-------------------|----|----------------|---------|---------------|
| A: Velocidad de calentamiento | 7,78151 | 1 | 7,78151 | 0,43 | 0,5363 |
| B: Temperatura de pirolisis | 873,813 | 1 | 873,813 | 48,30 | 0,0004 |
| AA | 15,795 | 1 | 15,795 | 0,87 | 0,3862 |
| AB | 278,598 | 1 | 278,598 | 15,40 | 0,0078 |
| bloques | 9,86453 | 1 | 9,86453 | 0,55 | 0,4881 |
| Error total | 108,552 | 6 | 18,0919 | | |
| Total (corr.) | 1294,4 | 11 | | | |

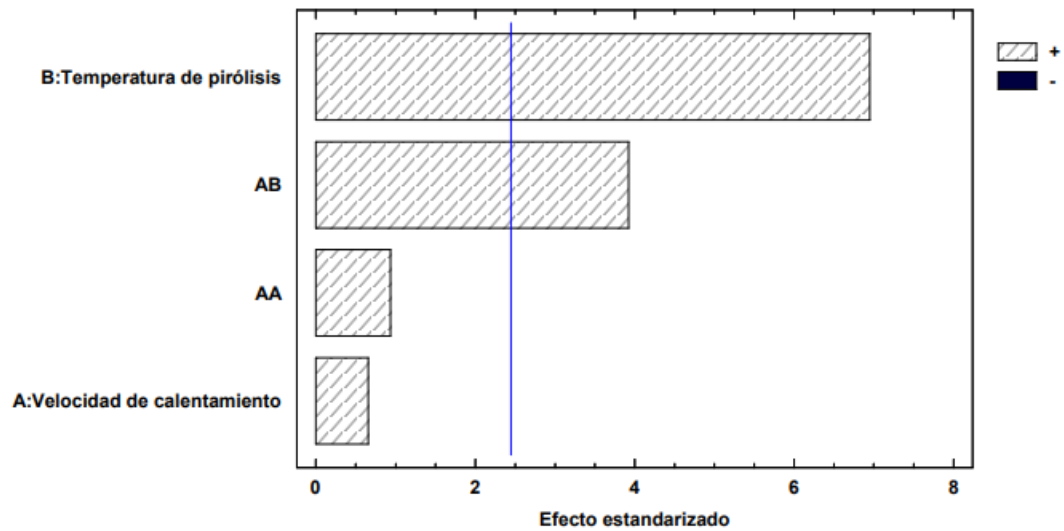


Figura 33. Diagrama de Pareto estandarizado para fracción pesada de hidrocarburos. Fuente [Autores]

7.2.7 Energía Consumida

El consumo eléctrico es la relación multiplicativa de la potencia eléctrica del equipo usado para la pirólisis con el tiempo de uso del equipo. Esta energía consumida se mide en Kwh.

7.2.7.1 Influencia experimental de los factores

El análisis estadístico que permite la presentación de la figura 34 esta evaluado bajo la influencia de los factores velocidad de calentamiento (B) y temperatura de pirólisis (A) y sus combinaciones (AA y AB).se muestra considerable efecto estadístico en la disminución del consumo energético mediante la modificación de la temperatura de pirólisis, teniendo que a menor temperatura de pirólisis se tiene menor consumo energético. Sin embargo, este análisis no contempla otro factor determinante de esta respuesta, el cual es el tiempo de prueba que es una variable dependiente de las condiciones experimentales establecidas en la metodología, que como se aprecia en las figuras 23 y 24 que presentan dos estados para los experimentos realizados: 90 minutos para las pruebas a 420 °C y 120 minutos para las pruebas de 390 °C.

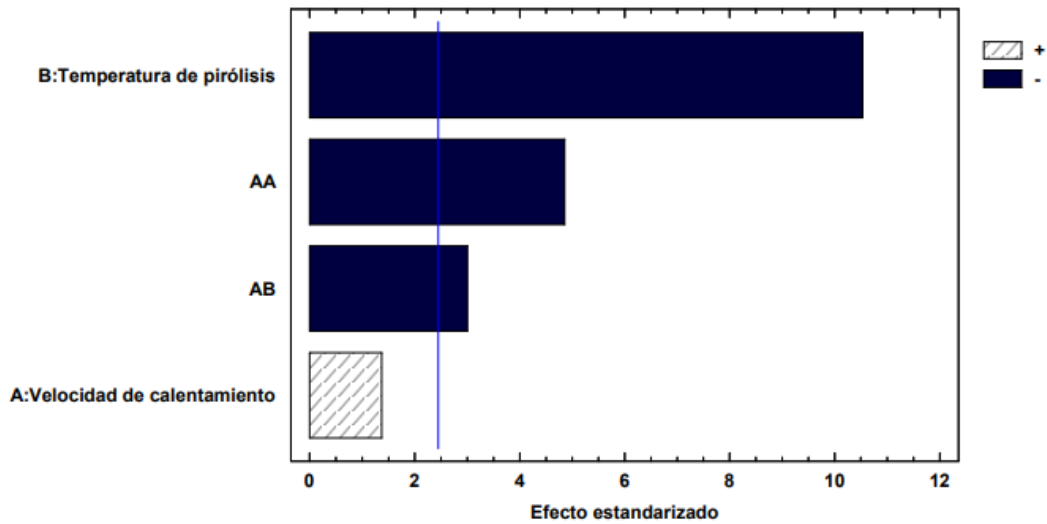


Figura 34. Diagrama de Pareto estandarizado para la energía consumida. Fuente [Autores]

7.2.8 Densidad

La relación entre la masa y el volumen del producto líquido obtenido (fracción liviana) se calcula mediante la ecuación (5).

7.2.8.1 Influencia experimental de los factores

La figura 35 nos indica que el factor de la temperatura de pirólisis (B), la velocidad de calentamiento (A) y la combinatoria de los factores AB presentan una influencia significativa, esta esta mayor mente influida por la temperatura de pirólisis, donde se tiene que a mayor temperatura, mayor densidad. La densidad promedio para el total de las pruebas descritas en la Tabla 7 fue de 714.7 Kg/m^3 presentando una desviación estándar de ± 75.6 lo que indica que el comportamiento de la densidad está relacionado a las condiciones experimentales, este valor es acorde a los presentados en la literatura (tabla 3).

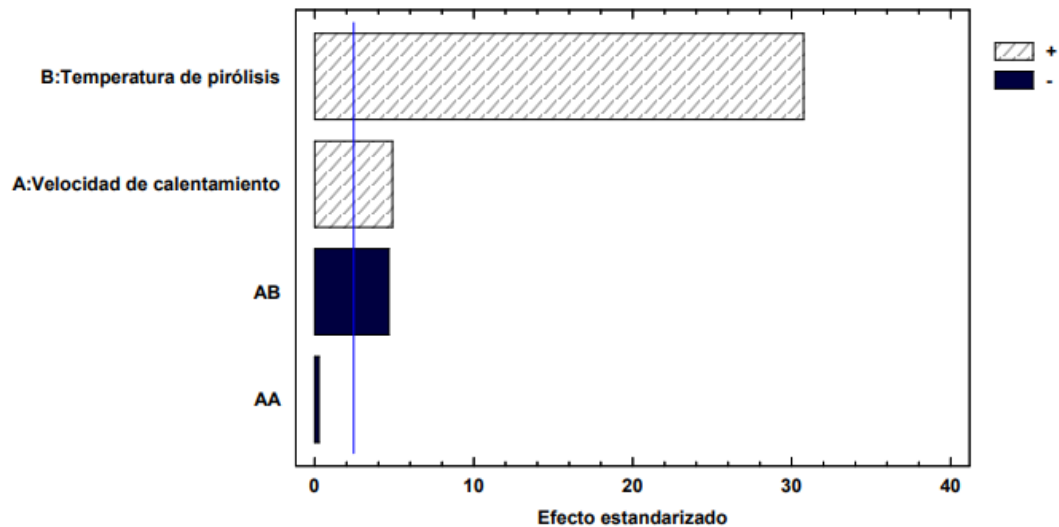


Figura 35. Diagrama de Pareto estandarizado para densidad. Fuente [Autores]

7.3 DISCUSIÓN DE RESULTADOS

7.3.1 Poder calorífico

El poder calorífico promedio obtenido para el producto líquido fue de $45\,598.9 \pm 282$ KJ/Kg con un valor máximo de 46 053 KJ/Kg y mínimo de 45 236 KJ/Kg, la pequeña variabilidad en las pruebas realizadas lo presenta como una propiedad poco relacionada con los factores experimentales, sino orientada a ser relación en mayor medida de la materia prima.

Los valores obtenidos son comparados con los presentados en la literatura por *Li* [47] quien obtuvo valores entre 44 932 y 46 010 KJ/Kg mediante un sistema en cascada (destilación al vacío y pirólisis asistida por microondas) para el tratamiento del aceite usado y que disminuyó el consumo energético necesario para el tratamiento del aceite empleando las dos técnicas. Por otro lado, *Santhoshkumar* [50] presenta valores entre 45 200 KJ/Kg y 46 500 KJ/Kg para una comparativa de dos pirólisis asistidas por microondas a diferente potencia y una pirólisis eléctrica.

Al evaluarlo en relación a combustibles tradicionales como el diésel que presenta un poder calorífico promedio de 43 100 KJ/Kg, valor por debajo de los resultados de las investigaciones expuestas. El panorama de la variabilidad del poder calorífico permite identificar que los factores de velocidad de calentamiento, temperatura de pirólisis y técnica de pirólisis empleadas son importantes más no los más influyentes.

7.3.2 Densidad

Los valores de densidad más similares presentados en la literatura (tabla 3) corresponden a los expuestos por *Demirbas* [61] y *Balat* [68] con un productos líquidos tipo gasolina obtenidos por pirólisis catalítica de aceite usado de motor, con densidad de 732 Kg/m^3 que es un valor por encima del promedio obtenido en este estudio $714.7 \pm 73.6 \text{ Kg/m}^3$ con un valor máximo de 793.4 a $420 \text{ }^\circ\text{C}$ y $15.9 \text{ }^\circ\text{C/min}$, y un valor mínimo de 610.5 Kg/m^3 a $390 \text{ }^\circ\text{C}$ y $15.9 \text{ }^\circ\text{C/min}$. Los valores de densidad obtenidos se encuentran considerablemente por debajo de los reportados en la literatura (tabla 3) y también del presentado para combustible tipo diésel comercial (850 Kg/m^3), esto puede relacionarse con las técnicas termoquímicas empleadas para el tratamiento del aceite usado y, por consiguiente, las condiciones experimentales propias de cada método.

Sin embargo, respecto a los factores estudiados en esta investigación se puede determinar que se obtienen valores inferiores de densidad al experimentar con temperaturas inferiores de pirólisis; esto se debe a los tipos de hidrocarburos (livianos) que se obtienen con esta condición.

7.3.3 Análisis de composición

La tabla 13, permite observar un resumen del análisis de composición realizado a los experimentos desarrollados y su comparativa con resultados para análisis cromatográficos similares realizados en sus investigaciones por *Razo* [48] y *Patel* [3], además también se presentan los datos correspondientes para dos diéseles comerciales.

Para los experimentos a $390 \text{ }^\circ\text{C}$ la tendencia corresponde a lo planteado en los anteriores apartados (7.3.1 y 7.3.2), se obtienen en todos los experimentos altas concentraciones de fracciones livianas de hidrocarburos y en forma decrecientes aparecen las fracciones medias y pesadas de hidrocarburos. Aunque, este tipo de comportamiento en el análisis de composición de asemeja al presentado por *Patel* [3]; esta distribución de las cadenas de hidrocarburo no se parece a las presentadas para los combustibles comerciales, lo que indicaría una posible reformulación de compuestos o el fraccionamiento a través de una columna de destilación que permita separar los elementos que componen el combustible con mayor facilidad.

Sin embargo, en el análisis de composición a los experimentos a $420 \text{ }^\circ\text{C}$ si se percibe una diferencia entre el experimento de mayor velocidad de calentamiento con respecto las otras dos (las cuales tienen una distribución de las fracciones

pesadas, medias y livianas de las cadenas de carbonos casi igual, es decir, alrededor del 33%). Para el caso del experimento a mayor velocidad de calentamiento, se encuentra una distribución de las fracciones de cadenas de carbonos más similar al del diésel comercial con menos porcentaje de carbonos ligeros y una mayor presencia de carbonos pesados. Si bien la tendencia de esta distribución de las fracciones de carbonos se asemeja a la del diésel, de acuerdo con la experimentación realizada se puede conseguir una mejor aproximación elevando la velocidad de calentamiento manteniendo la temperatura de pirólisis de 420 °C; lo que se traduciría en una obtención de la fracción liviana más rápida que no daría paso a la formación de las cadenas cortas de carbonos y en consecuencia aumentaría las cadenas largas.

Tabla 12. Resumen y comparativa del análisis de composición del producto líquido. Fuente [Autores]

| Análisis de composición | | | | | | | | | | |
|---|------------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----|-------|-----------|------------|
| TP [°C] | 420 | | | 390 | | | [3] | [48] | Diésel A* | Diésel B** |
| VC [°C/min] | 15.9 | 19.2 | 22.5 | 15.9 | 19.2 | 22.5 | | | | |
| C ₇ -C ₁₀ [% Kg/Kg] | 30.7 ±0.4 | 31.0±0.86 | 21.0±0.59 | 46.8±1.37 | 47.8±0.78 | 50.0±0.69 | 42 | 30.15 | 9.11 | 23.1 |
| C ₁₁ -C ₁₄ [% Kg/Kg] | 34.0 ±1.04 | 35.4±0.46 | 29.8±2.31 | 26.0±0.59 | 27.3±0.97 | 34.0±0.48 | 34 | 2.15 | 38.2 | 55.17 |
| C ₁₅ -C ₃₀ [% Kg/Kg] | 35.0 ±0.89 | 33.2±1.67 | 48.8±1.67 | 25.6±0.79 | 24.5±1.09 | 15.8±0.43 | 24 | 67.68 | 52.68 | 21.78 |

*Diésel comercial distribuido por PEMEX, México

**Diésel comercial distribuido por Shell, Texas, EEUU

7.3.4 Rendimientos líquidos

Como se ha descrito con anterioridad, el proceso de pirólisis permite obtener cuatro tipo de productos, de los cuales dos son líquidos: una fracción liviana que se obtiene bajo las condiciones experimentales y un fracción pesada que se obtiene fuera de estas condiciones. Los rendimientos obtenidos para los productos son presentados en la figura 36 donde se aprecia la diferencia de fracción liviana y pesada obtenida bajo la variación de la temperatura de pirólisis. El menor rendimiento obtenido de fracción liviana es de 12.8% a 390 °C y 19.2 °C/min; mientras que el mayor rendimiento de fracción liviana corresponde a 52.2% a 420 °C y 22.5 °C/min. Este rendimiento está un poco por debajo del promedio de los rendimientos expuestos en la literatura presentada en la tabla 2 que ronda el 75% con un máximo del 95.6% (*Ahmad* [67]) y un mínimo de 17.8% (*Miskolczi* [59]) ambos usando pirólisis catalítica para procesar el aceite usado de motor. Sin embargo, se debe notar que el proceso de pirólisis empleado podría elevar los porcentajes de rendimiento de la “fracción liviana” elevando la temperatura y que esto puede llegar al punto de solo tener un producto líquido, el cual de acuerdo con los rendimientos de fracción liviana

y pesada alcanzaría el 90% de rendimiento, como se puede ver en la tabla 7, que es un resultado comparable con los mejores rendimientos reportado en la literatura (tabla 2).

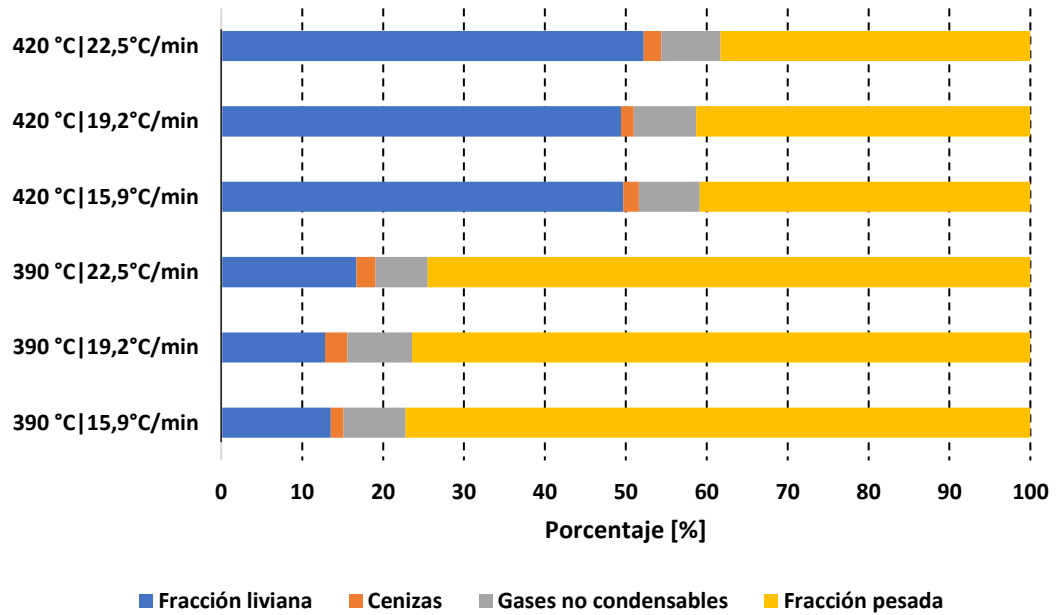


Figura 36. Rendimientos de los productos obtenidos de la pirólisis de aceite usado de motor. Fuente [Autores]

8. CONCLUSIONES

- Se seleccionó y construyó un prototipo de evaporización-condensación para ser usado en la pirólisis de aceites usados de motor. Con base en la literatura, fue instrumentado para controlar y adquirir datos de las temperaturas en las secciones de calentamiento, condensación y recuperación que permiten identificar los factores experimentales que afectan el proceso de pirólisis.
- Se caracterizó el prototipo identificando las condiciones máximas de operación y la repetibilidad experimental observando una máxima velocidad de calentamiento de 22.5 °C/min y máxima temperatura de 460 °C, por lo tanto, se estableció un marco experimental de tres velocidades de calentamiento (15.9 °C/min, 19.2 °C/min y 22.5 °C/min) y dos temperaturas de pirólisis (390 °C y 420 °C).
- Se utilizó un diseño experimental factorial 2² con un punto centrado en una de sus caras (velocidad de calentamiento); concluyendo que los rendimientos de los productos líquidos están directamente relacionados con la temperatura de pirólisis. Además, el mejor rendimiento de producto líquido (fracción liviana) de 52.2% se presentó con una temperatura de pirólisis de 420 °C y una velocidad de calentamiento de 22.5 °C/min. También se observa que la totalidad del producto líquido obtenido (fracción liviana y pesada) alcanza en promedio el 90% de rendimiento para todos los experimentos.
- El poder calorífico obtenido para el grupo de experimentos no presenta gran variabilidad en relación con los factores experimentales. El valor promedio de poder calorífico fue de 45 598.9 ± 282 KJ/Kg con un valor máximo de 46 053 KJ/Kg, que son resultados superiores al promedio de los datos reportados para el diésel comercial (43 100 KJ/Kg).
- La densidad de los productos líquidos (fracción liviana) muestra una mayor relación de su variabilidad con la temperatura de pirólisis, donde a mayor densidad se requiere temperaturas de pirólisis mayores. La densidad promedio para el diésel comercial es de 850 Kg/m³, por otro lado, la del combustible obtenido con mayor poder calorífico es de 420 °C y 22.5 °C/min con 795.2 Kg/m³; a su vez la densidad más comparable es de 793.4 Kg/m³ a 420 °C y 15.9 °C/min.
- El análisis de composición permitió determinar una similitud de los resultados obtenidos a 420 °C y 22.5 °C/min con la distribución de fracciones de hidrocarburos presentada para el diésel comercial. Sin embargo, las diferencias mostradas para el resto de las pruebas en relación con los combustibles comerciales plantean la necesidad de procesos adicionales para optimizar esta respuesta como lo es la destilación fraccionada.

9. PRODUCTOS DE DIVULGACIÓN CIENTÍFICA

- Participación en el programa XXVI veranos de la ciencia de la universidad de Guanajuato.
- Artículo científico para la revista jóvenes en la ciencia producto del trabajo desarrollado en el programa de veranos de la ciencia. Con el nombre: *Caracterización del proceso de pirólisis de aceite usado de motor.*
- Artículo científico para el II congreso internacional de ingeniería mecánica (COIIM). Con el nombre: *Influencia de la velocidad de calentamiento en la pirólisis de aceite lubricante usado.*
- Ponencia en el II congreso internacional de ingeniería mecánica (COIIM). Con el nombre: *Influencia de la velocidad de calentamiento en la pirólisis de aceite lubricante usado.*
- Artículo científico para la revista *Waste Management Journal* (Q₁ – IF=7.145). Con el título de: *Heat rate and pyrolysis temperature influence in to pyrolysis of waste lubricating oil.* (en desarrollo).

10.RECOMENDACIONES Y TRABAJOS FUTUROS

- Debido a la contingencia de conocimiento mundial (COVID-19) se dificultó la posibilidad de realizar esta tesis en equipos más tecnificados pues se cuenta con la cooperación del doctor José Manuel Riesco Ávila experto en termofluidos, sistemas energéticos y ahorro de energía quien recomienda continuar la investigación en cooperación de las instituciones, a través de grupos de investigación como el grupo de investigación de ingeniería mecánica de la universidad de pamplona (GIIMUP) o el grupo de investigación en combustibles alternativos y motores térmicos de la Universidad de Guanajuato (CMT.UG).
- Desarrollar esta experimentación con un equipo más tecnificado, con marcos experimentales más amplios que permitan un panorama más amplio del fenómeno de pirólisis en aceites usados de motor.
- Evaluar la factibilidad de escalamiento a niveles industriales de la pirólisis de aceite lubricantes usado y otros residuos como proceso de revalorización en la región.
- Continuar con la cooperación interinstitucional internacional del programa de ingeniería mecánica de la Universidad de Pamplona y el departamento de Ingeniería Mecánica del Campus Irapuato-Salamanca de la Universidad de Guanajuato.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] U. Energy Information Administration, "International Energy Outlook 2020 (IEO2020)," Accessed: Jul. 08, 2021. [Online]. Available: www.eia.gov.
- [2] L. Li *et al.*, "Review and outlook on the international renewable energy development," *Energy Built Environ.*, Dec. 2020, doi: 10.1016/j.enbenv.2020.12.002.
- [3] N. Patel and K. P. Shadangi, "Characterization of waste engine oil (WEO) pyrolytic oil and diesel blended oil: Fuel properties and compositional analysis," *Mater. Today Proc.*, vol. 33, pp. 4933–4936, Jan. 2020, doi: 10.1016/j.matpr.2020.02.679.
- [4] R. Maceiras, V. Alfonsín, and F. J. Morales, "Recycling of waste engine oil for diesel production," *Waste Manag.*, vol. 60, pp. 351–356, Feb. 2017, doi: 10.1016/j.wasman.2016.08.009.
- [5] C. Nerín, C. Domeño, R. Moliner, M. J. Lázaro, I. Suelves, and J. Valderrama, "Behaviour of different industrial waste oils in a pyrolysis process: Metals distribution and valuable products," *J. Anal. Appl. Pyrolysis*, vol. 55, no. 2, pp. 171–183, Jul. 2000, doi: 10.1016/S0165-2370(99)00097-2.
- [6] C. T. Pinheiro, M. J. Quina, and L. M. Gando-Ferreira, "Management of waste lubricant oil in Europe: A circular economy approach," <https://doi.org/10.1080/10643389.2020.1771887>, vol. 51, no. 18, pp. 2015–2050, 2020, doi: 10.1080/10643389.2020.1771887.
- [7] R. Abu-Ellella, M. E. Ossman, R. Farouq, and M. Abd-Elfatah, "Used Motor Oil Treatment: Turning Waste Oil Into Valuable Products," 2015. Accessed: Mar. 06, 2021. [Online]. Available: www.iscientific.org/Journal.html.
- [8] J. A. G. U. Iñigo González Canal, "ACEITES USADOS DE COCINA. PROBLEMÁTICA AMBIENTAL, INCIDENCIAS EN REDES DE SANEAMIENTO Y COSTE DEL TRATAMIENTO EN DEPURADORAS," 2017. Accessed: Mar. 01, 2021. [Online]. Available: <http://www.rafrinor.com>.
- [9] A. Santhoshkumar and A. Ramanathan, "Recycling of waste engine oil through pyrolysis process for the production of diesel like fuel and its uses in diesel engine," *Energy*, vol. 197, p. 117240, Apr. 2020, doi: 10.1016/j.energy.2020.117240.
- [10] Y. Deng, R. Dewil, L. Appels, R. Ansart, J. Baeyens, and Q. Kang, "Reviewing the thermo-chemical recycling of waste polyurethane foam," *J. Environ. Manage.*, vol. 278, p. 111527, Jan. 2021, doi: 10.1016/j.jenvman.2020.111527.
- [11] F. Martins, C. Felgueiras, and M. Smitková, "Fossil fuel energy consumption in European countries," in *Energy Procedia*, Oct. 2018, vol. 153, pp. 107–111, doi: 10.1016/j.egypro.2018.10.050.
- [12] O. Arpa, R. Yumrutaş, and Ö. Kaşka, "Desulfurization of diesel-like fuel produced from waste lubrication oil and its utilization on engine performance and exhaust emission," *Appl. Therm. Eng.*, vol. 58, no. 1–2, pp. 374–381, Sep.

- 2013, doi: 10.1016/j.applthermaleng.2013.04.035.
- [13] C. Tóth, D. Sági, and J. Hancsók, "Diesel Fuel Production by Catalytic Hydrogenation of Light Cycle Oil and Waste Cooking Oil Containing Gas Oil," *Top. Catal.*, vol. 58, no. 14–17, pp. 948–960, Oct. 2015, doi: 10.1007/s11244-015-0463-0.
- [14] I. Hamawand, T. Yusaf, and S. Rafat, "Recycling of Waste Engine Oils Using a New Washing Agent," *Energies*, vol. 6, no. 2, pp. 1023–1049, Feb. 2013, doi: 10.3390/en6021023.
- [15] B. Van De Beld, E. Holle, and J. Florijn, "The use of pyrolysis oil and pyrolysis oil derived fuels in diesel engines for CHP applications," *Appl. Energy*, vol. 102, pp. 190–197, Feb. 2013, doi: 10.1016/J.APENERGY.2012.05.047.
- [16] "Ley 1252 de 2008 Nivel Nacional." <https://www.alcaldiabogota.gov.co/sisjur/normas/Norma1.jsp?i=33965> (accessed Mar. 04, 2021).
- [17] C. T. Pinheiro, V. R. Ascensão, C. M. Cardoso, M. J. Quina, and L. M. Gando-Ferreira, "An overview of waste lubricant oil management system: Physicochemical characterization contribution for its improvement," *J. Clean. Prod.*, vol. 150, pp. 301–308, May 2017, doi: 10.1016/j.jclepro.2017.03.024.
- [18] A. Mishra, H. Siddiqi, U. Kumari, I. D. Behera, S. Mukherjee, and B. C. Meikap, "Pyrolysis of waste lubricating oil/waste motor oil to generate high-grade fuel oil: A comprehensive review," *Renew. Sustain. Energy Rev.*, vol. 150, p. 111446, Oct. 2021, doi: 10.1016/J.RSER.2021.111446.
- [19] A. Martínez Villegas, *MOTORES DE COMBUSTIÓN INTERNA*. 2007.
- [20] "I," in *Dictionary of Energy*, Elsevier, 2015, pp. 301–322.
- [21] K. Holmberg, P. Andersson, and A. Erdemir, "Global energy consumption due to friction in passenger cars," *Tribol. Int.*, vol. 47, pp. 221–234, Mar. 2012, doi: 10.1016/J.TRIBOINT.2011.11.022.
- [22] N. Thachnatharen, M. Khalid, A. Arulraj, and N. Sridewi, "Tribological performance of hexagonal boron nitride (hBN) as nano-additives in military grade diesel engine oil," *Mater. Today Proc.*, May 2021, doi: 10.1016/J.MATPR.2021.04.145.
- [23] R. M. Rajkumar *et al.*, "Studies on tribological behaviour of ZnO nanorods suspended in SAE 20w 40 engine oil," *Solid State Commun.*, vol. 328, p. 114235, Apr. 2021, doi: 10.1016/J.SSC.2021.114235.
- [24] J. C. J. Bart, E. Gucciardi, and S. Cavallaro, "Lubricants: properties and characteristics," in *Biolubricants*, Elsevier, 2013, pp. 24–73.
- [25] G. Alejandro and A. Ortiz, "Implantación de Análisis de Aceite en Motores de Combustión Interna de Ciclo Diesel," 2009.
- [26] H. Yamagata, "The cylinder," in *The Science and Technology of Materials in Automotive Engines*, Elsevier, 2005, pp. 10–52.
- [27] G. W. Stachowiak and A. W. Batchelor, "Engineering Tribology: Fourth Edition," *Eng. Tribol. Fourth Ed.*, pp. 1–852, 2013.
- [28] "Future Challenges of the Lubricants Industry," 2018.
- [29] J. A. Delgado Mitrano, "EVALUACIÓN TÉCNICA, ECONÓMICA Y AMBIENTAL DE UN SISTEMAPARA EL REUSO DE ACEITES

LUBRICANTES COMO COMBUSTIBLE ALTERNO EN LOS SECADORES DE MINERAL DE HIERRO DEORINOCO IRON S.C.S,” Universidad de oriente, Puerto la cruz, 2011.

- [30] J. L. Martín Pantoja, “La gestión de los aceites usados,” *Ing. Química*, 2007.
- [31] J. Ewen, C. Gattinoni, F. Thakkar, N. Morgan, H. Spikes, and D. Dini, “A Comparison of Classical Force-Fields for Molecular Dynamics Simulations of Lubricants,” *Materials (Basel)*., vol. 9, no. 8, p. 651, Aug. 2016, doi: 10.3390/ma9080651.
- [32] “S-OIL SEVEN.” <http://www.s-oil7.com/mobile/esp/knowledge/basic/classfiList.html> (accessed Mar. 03, 2021).
- [33] P. N. Belkhode, V. N. Ganvir, A. C. Shende, and S. D. Shelare, “Utilization of waste transformer oil as a fuel in diesel engine,” *Mater. Today Proc.*, Feb. 2021, doi: 10.1016/j.matpr.2021.02.008.
- [34] ISO 14001, “Organización Internacional para la Estandarización (ISO) (2015),” *Norma Int. - Suiza*, vol. 3°, p. 48, 2015, [Online]. Available: www.iso.org.
- [35] “Gestión de Residuos Posconsumo (17) | Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible.” <https://www.minambiente.gov.co/index.php/component/content/article/10-asuntos-ambientales-y-sectorial-y-urbana/asuntos-ambientales-y-sectorial-y-urbana-articulos/189-plantilla-asuntos-ambientales-y-sectorial-y-urbana-17> (accessed Mar. 04, 2021).
- [36] Groupement Européen de l’Industrie de la Régénération, “Waste Framework Directive revision: European waste oil re-refining industry position,” 2016.
- [37] J. G. Speight, “Synthesis gas and the Fischer–Tropsch process,” *Refin. Futur.*, pp. 427–468, Jan. 2020, doi: 10.1016/B978-0-12-816994-0.00012-9.
- [38] A. Saravanan, R. V. Hemavathy, T. R. Sundararaman, S. Jeevanantham, P. S. Kumar, and P. R. Yaashikaa, “Solid waste biorefineries,” *Refin. Biomass Residues Sustain. Energy Bioprod. Technol. Adv. Life Cycle Assessment, Econ.*, pp. 3–17, Jan. 2020, doi: 10.1016/B978-0-12-818996-2.00001-6.
- [39] J. A. Garcia-Nunez *et al.*, “Historical Developments of Pyrolysis Reactors: A Review,” *Energy and Fuels*, vol. 31, no. 6, pp. 5751–5775, Jun. 2017, doi: 10.1021/ACS.ENERGYFUELS.7B00641.
- [40] P. Basu, “Biomass gasification, pyrolysis and torrefaction: Practical design and theory,” *Biomass Gasification, Pyrolysis Torrefaction Pract. Des. Theory*, pp. 1–564, Jan. 2018, doi: 10.1016/C2016-0-04056-1.
- [41] G. Almaguer and D. Rodríguez, “Diseño experimental para degradación térmica solar de biomasa (pirólisis y gasificación),” *Jovenes en la Cienc. - Rev. Divulg. científica*, no. 1, pp. 2246–2250, 2017, [Online]. Available: <http://www.jovenesenlaciencia.ugto.mx/index.php/jovenesenlaciencia/article/view/1879>.
- [42] M. Balat, M. Balat, E. Kirtay, and H. Balat, “Main routes for the thermo-conversion of biomass into fuels and chemicals. Part 1: Pyrolysis systems,” *Energy Convers. Manag.*, vol. 50, no. 12, pp. 3147–3157, Dec. 2009, doi:

- 10.1016/J.ENCONMAN.2009.08.014.
- [43] T. Tam and A. Bhatnagar, "High-performance ballistic fibers and tapes," *Light. Ballist. Compos. Mil. Law-Enforcement Appl. Second Ed.*, pp. 1–39, Jan. 2016, doi: 10.1016/B978-0-08-100406-7.00001-5.
- [44] S. C. Moldoveanu, "General information about pyrolysis," in *Analytical Pyrolysis of Natural Organic Polymers*, Elsevier, 2021, pp. 3–27.
- [45] A. A. Boateng, "Introduction," *Pyrolysis Biomass Fuels Chem.*, pp. 1–21, Jan. 2020, doi: 10.1016/B978-0-12-818213-0.00001-1.
- [46] X. Li, J. Zhai, H. Li, and X. Gao, "An integration recycling process for cascade utilization of waste engine oil by distillation and microwave-assisted pyrolysis," *Fuel Process. Technol.*, vol. 199, p. 106245, Mar. 2020, doi: 10.1016/J.FUPROC.2019.106245.
- [47] X. Li, J. Zhai, H. Li, and X. Gao, "An integration recycling process for cascade utilization of waste engine oil by distillation and microwave-assisted pyrolysis," *Fuel Process. Technol.*, vol. 199, p. 106245, Mar. 2020, doi: 10.1016/j.fuproc.2019.106245.
- [48] A. G. Razo Garcia and J. M. Riesco Ávila, "Obtención de Combustible Alternativo Mediante Pirólisis de Aceite Lubricante Residual | Razo García | JÓVENES EN LA CIENCIA," 2019. <http://www.jovenesenlaciencia.ugto.mx/index.php/jovenesenlaciencia/article/view/3104> (accessed Mar. 02, 2021).
- [49] M. P. Mesa Upegui and C. I. Ortíz Rodríguez, "EVALUACIÓN DEL PROCESO DE PIROLISIS PARA LA PRODUCCIÓN DE DIESEL A NIVEL LABORATORIO A PARTIR DE RESIDUOS PLÁSTICOS DE INDUSTRIAS DE ALIMENTOS," 2016. Accessed: Mar. 02, 2021. [Online]. Available: <https://repository.uamerica.edu.co/bitstream/20.500.11839/477/1/6111667-2016-2-IQ.pdf>.
- [50] A. Santhoshkumar and R. Anand, "Microwave-assisted fast pyrolysis of hazardous waste engine oil into green fuels," in *Advances in Eco-Fuels for a Sustainable Environment*, Elsevier, 2019, pp. 119–155.
- [51] S. S. Lam, A. D. Russell, C. L. Lee, S. K. Lam, and H. A. Chase, "Production of hydrogen and light hydrocarbons as a potential gaseous fuel from microwave-heated pyrolysis of waste automotive engine oil," *Int. J. Hydrogen Energy*, vol. 37, no. 6, pp. 5011–5021, Mar. 2012, doi: 10.1016/j.ijhydene.2011.12.016.
- [52] S. S. Lam, A. D. Russell, and H. A. Chase, "Microwave pyrolysis, a novel process for recycling waste automotive engine oil," *Energy*, vol. 35, no. 7, pp. 2985–2991, Jul. 2010, doi: 10.1016/j.energy.2010.03.033.
- [53] N. Patel, K. P. Shadangi, and P. K. Kar, "Characterization of waste engine oil derived pyrolytic char (WEOPC): SEM, EDX and FTIR analysis," *Mater. Today Proc.*, no. xxxx, 2020, doi: 10.1016/j.matpr.2020.09.138.
- [54] S. Uçar, S. Karagöz, J. Yanik, M. Saglam, and M. Yuksel, "Copyrolysis of scrap tires with waste lubricant oil," *Fuel Process. Technol.*, vol. 87, no. 1, pp. 53–58, Dec. 2005, doi: 10.1016/J.FUPROC.2005.06.001.
- [55] M. Siva, S. Onenc, S. Uçar, and J. Yanik, "Influence of oily wastes on the

- pyrolysis of scrap tire,” *Energy Convers. Manag.*, vol. 75, pp. 474–481, Nov. 2013, doi: 10.1016/J.ENCONMAN.2013.06.055.
- [56] M. J. Lazaro, R. Moliner, I. Suelves, A. A. Herod, and R. Kandiyoti, “Characterisation of tars from the co-pyrolysis of waste lubricating oils with coal,” *Fuel*, vol. 80, no. 2, pp. 179–194, Jan. 2001, doi: 10.1016/S0016-2361(00)00084-3.
- [57] M. J. Lázaro, R. Moliner, I. Suelves, C. Domeo, and C. Nerín, “Co-pyrolysis of a mineral waste oil/coal slurry in a continuous-mode fluidized bed reactor,” *J. Anal. Appl. Pyrolysis*, vol. 65, no. 2, pp. 239–252, Dec. 2002, doi: 10.1016/S0165-2370(02)00003-7.
- [58] * Riesco-Ávila, J. M. A , Rodríguez-Valderrama, C. -Gutiérrez, G. -Ordaz, and R.-G. A. G. A , Martínez-Martínez, “Combustibles alternativos Obtención de combustible alternativo para motores de combustión interna mediante pirólisis de aceite lubricante residual.”
- [59] N. Miskolczi, N. Borsodi, F. Buyong, A. Angyal, and P. T. Williams, “Production of pyrolytic oils by catalytic pyrolysis of Malaysian refuse-derived fuels in continuously stirred batch reactor,” *Fuel Process. Technol.*, vol. 92, no. 5, pp. 925–932, May 2011, doi: 10.1016/J.FUPROC.2010.12.012.
- [60] D. Lesmana and H. S. Wu, “Pyrolysis of waste oil in the presence of a spent catalyst,” *J. Environ. Chem. Eng.*, vol. 3, no. 4, pp. 2522–2527, Dec. 2015, doi: 10.1016/J.JECE.2015.09.019.
- [61] A. Demirbas, “Gasoline-like Fuel from Waste Engine Oil via Catalytic Pyrolysis,” <http://dx.doi.org/10.1080/15567030701258469>, vol. 30, no. 16, pp. 1433–1441, Oct. 2008, doi: 10.1080/15567030701258469.
- [62] O. Arpa, R. Yumrutas, and A. Demirbas, “Production of diesel-like fuel from waste engine oil by pyrolytic distillation,” *Appl. Energy*, vol. 87, no. 1, pp. 122–127, Jan. 2010, doi: 10.1016/J.APENERGY.2009.05.042.
- [63] N. Zandi-Atashbar, A. A. Ensafi, and A. H. Ahoor, “Nano-CeO₂/SiO₂ as an efficient catalytic conversion of waste engine oil into liquid fuel,” *J. Clean. Prod.*, vol. 166, pp. 1010–1019, Nov. 2017, doi: 10.1016/J.JCLEPRO.2017.08.103.
- [64] S. E. Alavi, M. A. Abdoli, F. Khorasheh, F. Nezhadbahadori, and A. B. Moghaddam, “Nanomaterial-assisted pyrolysis of used lubricating oil and fuel recovery,” <https://doi.org/10.1080/15567036.2020.1807655>, 2020, doi: 10.1080/15567036.2020.1807655.
- [65] A. Permsubscul, T. Vitidsant, and S. Damronglerd, “Catalytic cracking reaction of used lubricating oil to liquid fuels catalyzed by sulfated zirconia,” *Korean J. Chem. Eng. 2007 241*, vol. 24, no. 1, pp. 37–43, Jan. 2007, doi: 10.1007/S11814-007-5006-3.
- [66] Y. Zouad, L. Tarabet, K. Khiari, and R. Mahmoud, “Effect of heating rate and additives (MgO and Al₂O₃) on a diesel like-fuel issued from waste engine oil pyrolysis,” <https://doi.org/10.1080/10916466.2019.1581810>, vol. 37, no. 10, pp. 1184–1193, May 2019, doi: 10.1080/10916466.2019.1581810.
- [67] I. Ahmad *et al.*, “Catalytic Pyrolysis of Used Engine Oil over Coal Ash into Fuel-like Products,” *Energy and Fuels*, vol. 30, no. 1, pp. 204–218, Jan. 2015,

doi: 10.1021/ACS.ENERGYFUELS.5B02316.

- [68] M. Balat, "Diesel-Like Fuel Obtained by Catalytic Pyrolysis of Waste Engine Oil.," <http://dx.doi.org/10.1260/014459808786933735>, vol. 26, no. 3, pp. 197–208, Jun. 2008, doi: 10.1260/014459808786933735.
- [69] "¿Qué son los diseños de superficie de respuesta, los diseños centrales compuestos y los diseños de Box-Behnken? - Minitab." <https://support.minitab.com/es-mx/minitab/18/help-and-how-to/modeling-statistics/doe/supporting-topics/response-surface-designs/response-surface-central-composite-and-box-behnken-designs/> (accessed Mar. 01, 2021).
- [70] D. Montgomery, *Diseño y análisis de experimentos*. 2004.
- [71] F. A. Candelas *et al.*, "Experiences on using Arduino for laboratory experiments of Automatic Control and Robotics," *IFAC-PapersOnLine*, vol. 48, no. 29, pp. 105–110, Jan. 2015, doi: 10.1016/j.ifacol.2015.11.221.
- [72] V. Cárdenas, Michelle; Peñaranda, "Análisis comparativo de algoritmos de control pid, fuzzy y predictivo aplicados a para la captación de energía solar usando paneles fotovoltaicos.," 2018, [Online]. Available: <https://www.dspace.espol.edu.ec/handle/123456789/46062>.
- [73] C. González Morcillo, "Lógica Difusa. Técnicas de Softcomputing. Una introducción práctica. Carlos González Morcillo. - PDF Free Download," 2011. <https://docplayer.es/10189658-Logica-difusa-tecnicas-de-softcomputing-una-introduccion-practica-carlos-gonzalez-morcillo-carlos-gonzalez-uclm-es.html> (accessed Mar. 04, 2021).
- [74] D. Ibrahim, "Advanced PIC32 Projects," *Des. Embed. Syst. with 32-Bit PIC Microcontrollers MikroC*, pp. 359–442, Jan. 2014, doi: 10.1016/B978-0-08-097786-7.00008-7.
- [75] ICONTEC, "NORMA TÉCNICA NTC COLOMBIANA 2289 BARRAS CORRUGADAS Y LISAS DE ACERO DE BAJA ALEACIÓN, PARA REFUERZO DE CONCRETO E: LOW-ALLOY STEEL DEFORMED AND PLAIN BARS FOR CONCRETE REINFORCEMENT CORRESPONDENCIA: esta norma es modificada (MOD) respecto a la norma ASTM A 706/A 706M:2006," 2012.
- [76] ICONTEC, "NORMA TÉCNICA NTC COLOMBIANA 1560 COLOMBIANA 1560," 2007.
- [77] "Arduino Mega 2560 Rev3 | Arduino Official Store." <https://store.arduino.cc/usa/mega-2560-r3> (accessed Aug. 25, 2021).
- [78] M. Integrated, "MAX6675 Cold-Junction-Compensated K-Thermocouple-to-Digital Converter (0°C to +1024°C) Data Sheet." <https://datasheets.maximintegrated.com/en/ds/MAX6675.pdf> (accessed Mar. 01, 2021).
- [79] M. Integrated, "DS18B20 Programmable Resolution 1-Wire Digital Thermometer Data Sheet." <https://datasheets.maximintegrated.com/en/ds/DS18B20.pdf> (accessed Mar. 01, 2021).
- [80] "(PDF) ZMPT101B Datasheet - voltage transformer operating guide." <http://www.datasheet.es/PDF/1031464/ZMPT101B-pdf.html> (accessed Aug.

- 25, 2021).
- [81] "(PDF) SSR-25DA Datasheet - DC to AC Solid State Relay." <http://www.datasheet.es/PDF/789331/SSR-25DA-pdf.html> (accessed Aug. 25, 2021).
- [82] Mobil TM, "Mobil Special 15W-40 y 20W-50." <https://www.mobil.com/es-mx/passenger-vehicle-lube/pds/gl-xx-mobil-special-15w40-20w50> (accessed Jul. 19, 2021).
- [83] ASTM, "ASTM D1298-12b(2017) Método de prueba estándar para determinar la densidad, la densidad relativa o la gravedad API del petróleo crudo y los productos líquidos derivados del petróleo mediante el Método de densímetro." <https://www.astm.org/Standards/D1298-SP.htm> (accessed Jul. 19, 2021).
- [84] ASTM, "ASTM D445-17a Método de prueba estándar para determinación de la viscosidad cinemática de líquidos transparentes y opacos (y cálculo de la viscosidad dinámica)." <https://www.astm.org/DATABASE.CART/HISTORICAL/D445-17A-SP.htm> (accessed Jul. 19, 2021).
- [85] ISO, "ISO 2909:2002(en), Petroleum products — Calculation of viscosity index from kinematic viscosity," 2002. <https://www.iso.org/obp/ui/#iso:std:iso:2909:ed-3:v1:en> (accessed Jul. 19, 2021).
- [86] A. Santhoshkumar and R. Anand, "Microwave-assisted fast pyrolysis of hazardous waste engine oil into green fuels," *Adv. Eco-Fuels a Sustain. Environ.*, pp. 119–155, Jan. 2019, doi: 10.1016/B978-0-08-102728-8.00005-X.

ANEXOS

ANEXO 1: ARTÍCULO ESCRITO PARA EL XXVI VERANO DE LA CIENCIA



Caracterización del proceso de pirólisis de aceite usado de motor

José Manuel Riesco Ávila¹, Aranza Bernal Ramírez¹, Karla Donjuan Martínez¹, Itzel Lona Fonseca¹, Denilson Nava Sosa¹, Cristina Fonseca Yepez², Edward Johan Villamizar Cuadros³

¹División de Ingenierías, Campus Irapuato-Salamanca, Universidad de Guanajuato.

²División de Ciencias Naturales y Exactas, Campus Guanajuato, Universidad de Guanajuato.

³Universidad de Pamplona, Colombia.

Resumen

Los aceites lubricantes usados son considerados como residuos peligrosos debido a su alta concentración de metales pesados, sustancias orgánicas y otros contaminantes que quedan de los aditivos. En este trabajo, se propone una alternativa para reciclar estos aceites residuales, convirtiéndolos en combustibles con propiedades similares a las de los usados tradicionalmente en motores de combustión interna. Usando una rampa de calentamiento de 22.5 °C/min y una temperatura máxima de pirólisis de 420 °C, se obtuvieron rendimientos de conversión de 60% en masa.

Palabras clave: Pirólisis; aceite lubricante usado.

Introducción

La creciente demanda de energía a nivel mundial debido al aumento de la población, el agotamiento de los recursos petroleros que ha obligado a realizar exploraciones en lugares cada vez más desafiantes y difíciles y el alto costo de los combustibles derivados del petróleo, ha motivado a los investigadores a buscar nuevas fuentes de energía. Por otro lado, uno de los principales problemas de nuestra sociedad es la generación y disposición de residuos sólidos, un problema que debe ser resuelto en condiciones económicas y respetuosas con el medio ambiente. En los últimos años, una importante cantidad de investigaciones se han enfocado en el desarrollo de nuevas tecnologías que permitan reciclar o reutilizar materiales de desecho como fuente de energía. Una alternativa para la conversión de materiales que no son fácilmente reprocessados es la pirólisis, un proceso termoquímico que implica la descomposición del material orgánico a temperaturas elevadas en ausencia de oxígeno. Este proceso descompone las macromoléculas en productos de menor peso molecular (líquidos, gases y carbón residual). Estos productos pueden ser útiles como combustibles o materias primas para otros procesos.

ANEXO 2: CONSTANCIA DE PARTICIPACIÓN EN XXVI VERANO DE LA CIENCIA

UNIVERSIDAD DE GUANAJUATO

XXVI
de
Verano
de
La
Ciencia
Universidad de Guanajuato

Otorga la presente
CONSTANCIA
a
EDWARD JOHAN VILLAMIZAR CUADROS

Por su participación como estudiante
en el **XXVI Verano de la Ciencia** de la Universidad de Guanajuato
en el proyecto:

RECICLAJE DE RESIDUOS MEDIANTE PIRÓLISIS PARA LA OBTENCIÓN DE COMBUSTIBLES

Guanajuato, Gto. 28 de julio de 2021
La verdad os hará libres


Dr. Mauro Napsuciale Mendivil
Dirección de Apoyo a la Investigación y al Posgrado

ANEXO 3: ARTÍCULO ESCRITO PARA EL II COIIM



Influencia de la velocidad de calentamiento en la pirólisis de aceite lubricante usado

Rate heating influence in to pyrolysis of waste lubricating oil

Edward J. Villamizar-Cuadros¹, James R. Vera-Rozo², Elkin G. Florez-Serrano¹, José M. Riesco-Ávila²

¹ GIMUP, Departamento de Ingeniería Mecánica, Universidad de Pamplona, Norte de Santander, Colombia.
Email: eflorez@unipamplona.edu.co

² División de Ingenierías, Campus Irapuato-Salamanca, Universidad de Guanajuato, México.
Email: riesco@ugto.mx

Abstract: Used motor oil is a waste that causes great pollution due to the presence of heavy metals and compounds derived from hydrocarbons. One of the alternatives for the correct treatment of this waste is recycling and revaluation by the pyrolysis process, which allows obtaining alternative fuels and low percentages of waste. In this work, the pyrolysis of the lubricating oil used is evaluated by means of a design of experiments that compares three heating speeds (22.5, 19.2 and 15.9 °C/min) with a maximum pyrolysis temperature of 420 ° C. For the characterization of the products obtained, the density, calorific value and carbon count analysis by gas chromatography are determined. The highest yield of 52.2% occurs at a heating rate of 22.5 °C/min. The composition analysis of the liquid product of pyrolysis at a heating rate of 22.5 °C/min shows percentage of carbons similar to commercial diesel.

Keywords: Pyrolysis, waste engine oil, heat rate.

ANEXO 4: CONSTANCIA DE ACEPTACIÓN DEL ARTIUCLO ESCRITO PARA EL II COIIM

De: coiim2021 UG <coiim2021@ugto.mx>

Enviado: sábado, 21 de agosto de 2021 12:12 a. m.

Para: riesco <riesco@ugto.mx>

Asunto: Notificación de evaluación de artículo COIIM 2021

José Manuel Riesco Ávila

Presente.

Además de saludarle y desearle éxito en sus labores diarias, nos permitimos por este medio informarle que el Comité Organizador del **II Congreso Internacional de Ingeniería Mecánica 2021 (COIIM 2021)**, ha decidido **ACEPTAR** para su presentación el trabajo:

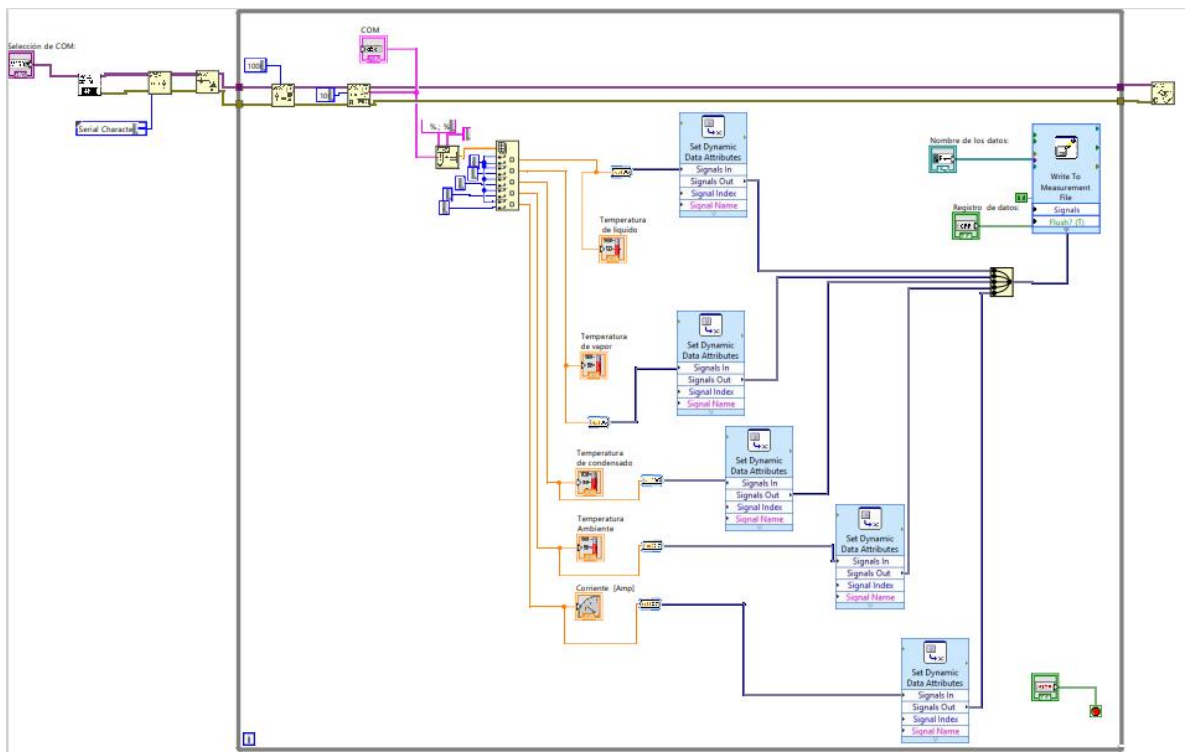
“A-TF-12 Influencia de la velocidad de calentamiento en la pirólisis de aceite lubricante usado”

El Comité Organizador lo felicita a usted y a sus colaboradores por la aceptación del trabajo antes mencionado que será publicado las memorias del congreso **COIIM 2021**, el cual se realizará los días 26 y 27 de agosto de 2021, donde se utilizará como soporte la plataforma ZOOM para las salas donde se presentarán las ponencias. En breve le haremos llegar el programa y la información de las salas ZOOM.

ANEXO 5: CRONOGRAMA DE PONENCIAS II COIIM

| II Congreso Internacional de Ingeniería Mecánica (COIIM 2021) | | | | |
|---|---|--|--|---|
| 27 de agosto | | | | |
| | SALA 1 Link para participantes: https://us02web.zoom.us/j/4145489692 | SALA 2 Link para participantes: https://us02web.zoom.us/j/9021553677 | SALA 3 para participantes: https://us02web.zoom.us/my/ustaeventos | SALA 4 Link para participantes: https://us02web.zoom.us/j/5875808104 |
| 8:00-8:20 | A-DR-37 Sistema de control difuso tipo MIMO, para un sistema elevador de voltaje en dos etapas | A-DM-54 Materiales de herramientas utilizados en el proceso de friction stir welding (FSW) del acero: una revisión | A-TF-03 Taylor bubble characteristics by image processing | A-TF-04 Validation of a methodology for CFD simulation of a H-Darrieus vertical axis wind turbine |
| 8:20-8:40 | A-DR-02 El Gráfico de Control de Cpk | A-DM-20 Diseño estructural de un nanosatélite tipo CubeSat | A-TF-24 Validación de una simulación por CFD de la transferencia de calor en placas planas | A-TF-44 Simulación Termodinámica Mediante Thermo-Calc para la producción de aceros nitrogenados |
| 8:40-9:00 | A-DR-46 Control robusto H [∞] para la mitigación de las deflexiones en una viga apoyada como puente | A-DM-06 Resistencia al desgaste en depósitos de soldadura con alto contenido de Cr sobre un acero ASTM a128 | A-TF-57 Disponibilidad de bagazo de caña de azúcar en ingenios para la producción de biocombustibles lignocelulósicos de segunda generación | A-TF-51 Fabricación de briquetas a base de residuos de madera, polvo de carbón y aditivos |
| 9:00-9:20 | A-DR-39 Control PSO e IPSD en sistema fotovoltaico bajo condiciones de sombreado parcial | A-DM-16 Cálculo de la vida de elementos de maquinaria de obras públicas: Caso del brazo articulado de una retroexcavadora | A-TF-31 Estimación de la temperatura dentro de hornos solares tipo caja de aletas reflectantes empleando una red neuronal artificial | A-TF-60 Potencial eólico de Boyacá como criterio para determinar la ubicación de turbina eólica de eje vertical |
| 9:20-9:30 | Break | | | |
| 9:30-9:50 | A-ED-07 Habilidades blandas en el Ingeniero Mecánico: Caso de estudio en egresados de la Universidad de Pamplona de Colombia | A-DM-23 Análisis Comparativo de la Eficacia Protectora de la Jaula Interna Antivuelcos en los Formatos Tubular y Laminar para Unidades Vehiculares Mineras Tipo Pick-Up en el Perú | A-TF-12 Influencia de la velocidad de calentamiento en la pirólisis de aceite lubricante usado | A-TF-67 Diseño de un perfil aerodinámico para bajos números de Reynolds mediante herramientas computacionales |
| 9:50-10:10 | A-DR-61 Los estudiantes y maestros no deben confiar en los libros | A-DM-45 Rendimiento de diferentes texturas aplicadas a herramientas de metal duro recubiertas de TiAlN aplicadas en mecanizado de hierro fundido vermicular clase 450 | A-TF-13 Comparación del biodiesel obtenido tradicionalmente con el producido por bomba de engranajes | A-TF-68 Simulación aerodinámica de un aerogenerador de baja potencia y velocidad de viento |
| 10:10-10:30 | A-ED-62 Desarrollo de juegos para adultos mayores en época de pandemia | A-DM-66 Adecuación de un sistema para transporte de alimento avícola de la empresa Santa Anita Nápoles - Barranquilla | A-TF-17 Diseño y modelado aerodinámico de álabes para un aerogenerador de energía eléctrica | A-TF-70 Análisis teórico de una estructura porosa bimodal para tubos de calor |
| 10:30-10:50 | A-DM-59 Desarrollo de un banco didáctico para modelo de turbina eólica de eje vertical | A-DM-50 ClassroomCleaner: Robot para desinfección de mesas y sillas con luz ultravioleta | A-TF-64 Modelado y simulación de sistema de inyección secundaria de aire en una caldera acotubular bagacera para incrementar su eficiencia térmica | A-TF-72 Simulación numérica y diseño de experimentos en celda de combustible de óxido sólido con reformado interno de metano |
| 10:50-11:00 | Break | | | |

ANEXO 6: DIAGRAMA DE BLOQUES DE LA PROGRAMACIÓN REALIZADA EN LABVIEW



ANEXO 7: CÓDIGO DE PROGRAMACIÓN REALIZADO EN ARDUINO PARA EL CONTROL DEL EQUIPO PIROLIZADOR

```

#include <OneWire.h>
#include <DallasTemperature.h>
#include "max6675.h"

#define CURRENT_SENSOR A0 // pin AO de
Arduino, donde va la salida del sensor

float amplitud_current; //amplitud corriente
float effective_value; //corriente efectiva
//termo2
int thermoDO = 46; //Verde azul violeta LIQUIDO
int thermoCS = 42;
int thermoCLK = 44;
//termo3
int thermoDO1 = 52; //amarillo naraja rojo VAPOR
int thermoCS1 = 50;
int thermoCLK1 = 48;

//int SP = 600; //setpoint

MAX6675 thermocouple(thermoCLK, thermoCS,
thermoDO);

MAX6675 thermocouple1(thermoCLK1,
thermoCS1, thermoDO1);

OneWire ourWire(13); //Se establece el
pin 2(?) O 13 como bus OneWire

DallasTemperature sensors(&ourWire); //Se
declara una variable u objeto para nuestro sensor

DeviceAddress address1 = {0x28, 0x80, 0x42,
0x56, 0xB5, 0x1, 0x3C, 0x1F}; //dirección del sensor
1
DeviceAddress address2 = {0x28, 0xCC, 0x82,
0xBC, 0x1E, 0x19, 0x1, 0x89}; //dirección del sensor
2

void setup() {
delay(1000);
Serial.begin(9600);
sensors.begin(); //Se inicia el sensor
pins_init();
pinMode(12, OUTPUT);
digitalWrite(12, HIGH);
pinMode(53, OUTPUT);
digitalWrite(53, HIGH);

pinMode(3, OUTPUT); //SSR switching on/off pin
}

void loop() {

int sensor_max;
sensor_max = getMaxValue();

sensors.requestTemperatures(); //envía el
comando para obtener las temperaturas
float temp1= sensors.getTempC(address1); //Se
obtiene la temperatura en °C del sensor 1
float temp2= sensors.getTempC(address2); //Se
obtiene la temperatura en °C del sensor 2

//Serial.print("sensor_max = ");
//Serial.println(sensor_max);

amplitud_current=(float)(sensor_max-
512)/1024*5/100*1000000;
// para 5Amperes, modifica el valor de 5 para
sensor de 20A o 30A
effective_value=amplitud_current/1.414/1000;

//minimum_current=1/1024*5/185*1000000/1.414=
18.7(mA)
//solo para corriente sinusoidal
//Serial.println("La amplitud de la corriente
es(en mA)");
//Serial.println(amplitud_current,1); //solo 1
numero despues del punto decimal
//Serial.println("El valor efectivo de la corriente
es(en mA)");
//Serial.println(effective_value,1);
//Serial.print("On OFF");

//condicionales de SetPoint y pwm

// if((thermocouple.readCelsius())<= 420){ //La
Temperatura esta por debajo de SP entonces se
enciende la resistencia

```

```

        if((thermocouple.readCelsius())<= 250){
            analogWrite(3, 120);
            delay(5);
        }

        if((thermocouple.readCelsius())>= 250 &&
(thermocouple.readCelsius()) <= 350){
            analogWrite(3, 200);
            delay(5);
        }

        if((thermocouple.readCelsius())>= 350 &&
(thermocouple.readCelsius()) <= 500){
            analogWrite(3, 255);
            delay(5);
        }

        //Serial.println("Resistencia prendida");
        // delay(5);
        // }

        if((thermocouple.readCelsius())>= 500){ //La
Temperatura esta por encima de SP entonces se
apaga la resistencia
            analogWrite(3, 0);
            //Serial.println("Resistencia Apagado");
            delay(5);
        }

        //

//Serial.print("  Temperatura Liq = ");
Serial.print(thermocouple.readCelsius());
Serial.print(";");

//Serial.print("  Temperatura Vap = ");
Serial.print(thermocouple1.readCelsius());
Serial.print(";");

//Serial.print("  Temperatura Cond = ");
Serial.print(temp2);
Serial.print(";");

//Serial.print("Temperatura H2O = ");
Serial.print(temp1);
Serial.print(";");

Serial.print(effective_value);
Serial.println(";");

delay(100);
}

void pins_init()
{
    pinMode(CURRENT_SENSOR, INPUT);
}
/*Function: muestreo por 1000ms y despliegue del
valor maximo del pin de salida */
int getMaxValue()
{
    int sensorValue; //valor de lectura del
sensor
    int sensorMax = 0;
    uint32_t start_time = millis();
    while((millis()-start_time) < 1000) // muestreo de
1000ms
    {
        sensorValue =
        analogRead(CURRENT_SENSOR);
        if (sensorValue > sensorMax)
        {
            /*maximo valor del muestreo*/
            sensorMax = sensorValue;
        }
    }
    return sensorMax;
}

```

ANEXO 8: DATASHEET DE COMPONENTES DEL ESQUEMA ELÉCTRICO Y DE CONTROL

DS12B20

DS18B20

Programmable Resolution
1-Wire Digital Thermometer

General Description

The DS18B20 digital thermometer provides 9-bit to 12-bit Celsius temperature measurements and has an alarm function with nonvolatile user-programmable upper and lower trigger points. The DS18B20 communicates over a 1-Wire bus that by definition requires only one data line (and ground) for communication with a central microprocessor. In addition, the DS18B20 can derive power directly from the data line ("parasite power"), eliminating the need for an external power supply.

Each DS18B20 has a unique 64-bit serial code, which allows multiple DS18B20s to function on the same 1-Wire bus. Thus, it is simple to use one microprocessor to control many DS18B20s distributed over a large area. Applications that can benefit from this feature include HVAC environmental controls, temperature monitoring systems inside buildings, equipment, or machinery, and process monitoring and control systems.

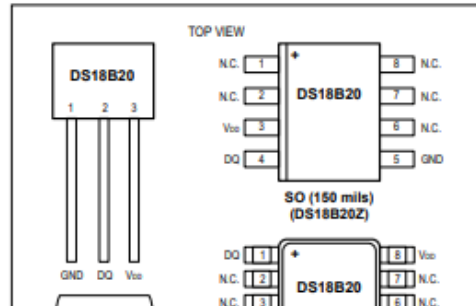
Applications

- Thermostatic Controls
- Industrial Systems
- Consumer Products
- Thermometers
- Thermally Sensitive Systems

Benefits and Features

- Unique 1-Wire® Interface Requires Only One Port Pin for Communication
- Reduce Component Count with Integrated Temperature Sensor and EEPROM
 - Measures Temperatures from -55°C to +125°C (-67°F to +257°F)
 - ±0.5°C Accuracy from -10°C to +85°C
 - Programmable Resolution from 9 Bits to 12 Bits
 - No External Components Required
- Parasitic Power Mode Requires Only 2 Pins for Operation (DQ and GND)
- Simplifies Distributed Temperature-Sensing Applications with Multidrop Capability
 - Each Device Has a Unique 64-Bit Serial Code Stored in On-Board ROM
- Flexible User-Definable Nonvolatile (NV) Alarm Settings with Alarm Search Command Identifies Devices with Temperatures Outside Programmed Limits
- Available in 8-Pin SO (150 mils), 8-Pin µSOP, and 3-Pin TO-92 Packages

Pin Configurations



MAX6675

MAX6675 Cold-Junction-Compensated K-Thermocouple- to-Digital Converter (0°C to +1024°C)

General Description

The MAX6675 performs cold-junction compensation and digitizes the signal from a type-K thermocouple. The data is output in a 12-bit resolution, SPI-compatible, read-only format.

This converter resolves temperatures to 0.25°C, allows readings as high as +1024°C, and exhibits thermocouple accuracy of 8 LSBs for temperatures ranging from 0°C to +700°C.

The MAX6675 is available in a small, 8-pin SO package.

Applications

- Industrial
- Appliances
- HVAC

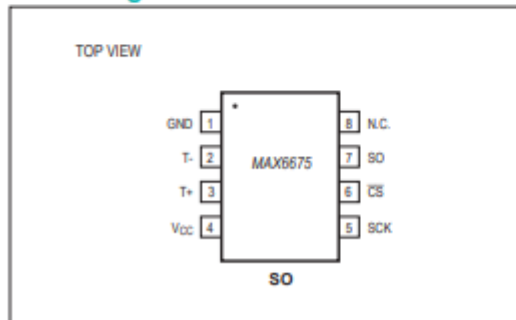
Features

- Direct Digital Conversion of Type -K Thermocouple Output
- Cold-Junction Compensation
- Simple SPI-Compatible Serial Interface
- 12-Bit, 0.25°C Resolution
- Open Thermocouple Detection

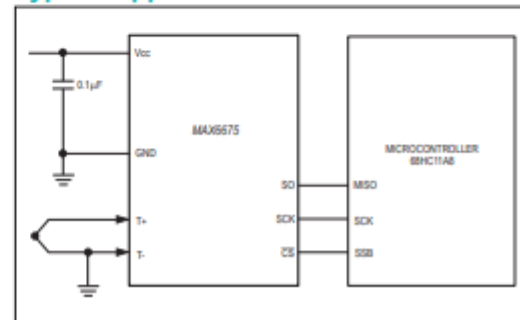
Ordering Information

| PART | TEMP RANGE | PIN-PACKAGE |
|------------|----------------|-------------|
| MAX6675ISA | -20°C to +85°C | 8 SO |

Pin Configuration



Typical Application Circuit



Relé de estado sólido

OPTO 22

DATA SHEET
Form 0859-180904

SOLID-STATE RELAYS

Features

- > Rugged, epoxy encapsulation construction
- > 4,000 volts of optical isolation
- > Subjected to full load test and six times the rated current surge before and after encapsulation
- > Unique heat-spreader technology
- > Guaranteed for life



Opto 22 Power Series SSR

OVERVIEW

In 1974, Opto 22 introduced the first liquid epoxy-filled line of power solid-state relays (SSR). This innovation in SSR design greatly improved the reliability and reduced the cost of manufacturing. At that time, we also incorporated into our manufacturing process 100% testing under full-load conditions of every relay we produced.

By 1978, Opto 22 had gained such a reputation for reliability that we were recognized as the world's leading manufacturer of solid-state relays. Through continuous manufacturing improvements and the same 100% testing policy established over 40 years ago, Opto 22 is

still recognized today for the very high quality and reliability of all our solid-state relays.

DESCRIPTION

Opto 22 offers a complete line of SSRs, from the rugged 120/240/380-volt **AC Series** to the small footprint **MP Series**, designed for mounting on printed circuit boards. All Opto 22 SSRs feature 4,000 volts of optical isolation, and most are UL and CSA recognized. The innovative use of room-temperature liquid epoxy encapsulation, coupled with Opto 22's unique heat-spreader technology, are key to mass producing the world's most reliable solid-state relays.

Part Numbers

| Part | Description |
|---------------------|-----------------------------|
| AC Switching | |
| 120A10 | 120 VAC, 10 Amp, AC Control |
| 120A25 | 120 VAC, 25 Amp, AC Control |
| 240A10 | 240 VAC, 10 Amp, AC Control |
| 240A25 | 240 VAC, 25 Amp, AC Control |

| Part | Description |
|---------------------|--|
| AC Switching | |
| 575D15-12 | 575 VAC, 15 Amp, DC Control, Transient Proof |
| 575D45-12 | 575 VAC, 45 Amp, DC Control, Transient Proof |
| 575D30-HS | 575 VAC, 30 Amp, DC Control, Transient Proof, with integrated heatsink |
| 575Di45-12 | 575 VAC, 45 Amp, DC Control, Transient Proof, with LED Indicators |

Arduino MEGA 2560

Arduino MEGA 2560



Product Overview

The Arduino Mega 2560 is a microcontroller board based on the ATmega2560 ([datasheet](#)). It has 54 digital input/output pins (of which 14 can be used as PWM outputs), 16 analog inputs, 4 UARTs (hardware serial ports), a 16 MHz crystal oscillator, a USB connection, a power jack, an ICSP header, and a reset button. It contains everything needed to support the microcontroller; simply connect it to a computer with a USB cable or power it with a AC-to-DC adapter or battery to get started. The Mega is compatible with most shields designed for the Arduino Duemilanove or Diecimila.

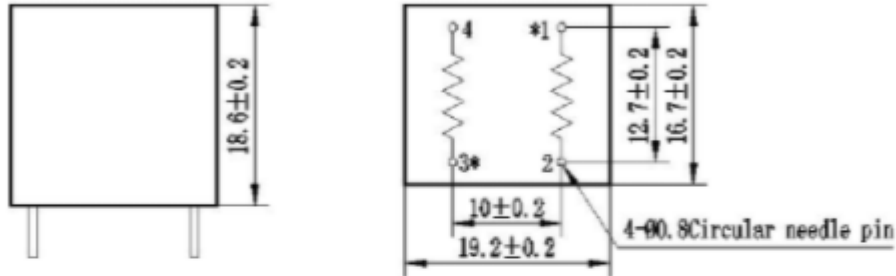
Analizador de corriente

ZMPT101B

Current-type Voltage Transformer

Small size, high accuracy, good consistency, for voltage and power measurement

Structural parameters:



Remarks: primary input: 1, 2 pins secondary output: 3, 4pins
Or

primary input:: 3, 4 pins secondary output::1, 2pins
** Same polarity

Front view

Bottom view

The main technical parameters:

| | |
|-----------------------|--|
| Model | ZMPT101B |
| Rated input current | 2mA |
| Rated output current | 2mA |
| turns ratio | 1000:1000 |
| phase angle error | $\leq 20'$ (input 2mA, sampling resistor 100 Ω) |
| operating range | 0~1000V 0~10mA (sampling resistor 100 Ω) |
| linearity | $\leq 0.2\%$ (20%~120%) |
| Permissible error | $-0.3\% \leq f \leq +0.2\%$ (input 2mA, sampling resistor 100 Ω) |
| isolation voltage | 4000V |
| application | voltage and power measurement |
| Encapsulation | Epoxy |
| installation | PCB mounting (Pin Length>3mm) |
| Operating temperature | -40°C~+80°C |
| Case Material | ABS (Note: ABS CASE is NOT available for wave-soldering) |

ANEXO 9: Informes de análisis de composición de carbonos

Experimento 1



INFORME DE ANALISIS PRELIMINAR
 UNIVERSIDAD DE GUANAJUATO
 DIVISION DE INGENIERIA CAMPUS IRAPUATO-SALAMANCA
 LABORATORIO DE CARACTERIZACION DE COMBUSTIBLES ALTERNATIVOS



| Informe de muestra | |
|----------------------------|--|
| Empresa o proyecto: | Muestra Tesis Edward Villamizar – UNIVERSIDAD DE PAMPLONA. |
| Producto: | EXPERIMENTO 1 |
| Fecha de muestreo: | 26 de Junio de 2021 |
| Fecha de respuesta: | 02 de Agosto de 2021 |

| PRUEBA DE ANALISIS | UNIDADES | METODO | ESPECIFICACIONES*** | A* | B** |
|----------------------------------|----------|-------------|---------------------|--------|--------|
| Gravedad específica a 20 °C | - | ASTM-D1298 | Informar | 0.7847 | 0.7758 |
| Apariencia ASTM | - | ASTM D-4176 | - | Oscura | Oscura |
| Poder calorífico | MJ/kg | ASTM D-4809 | Informar | 45.77 | 46.05 |
| C ₇ -C ₁₀ | % Wt | ISO-17034 | Máx. 18 | 30.14 | 31.85 |
| C ₁₁ -C ₁₄ | % Wt | ISO-17034 | Máx. 32 | 34.95 | 35.87 |
| C ₁₅ -C ₃₀ | % Wt | ISO-17034 | Mín. 50 | 34.91 | 31.58 |

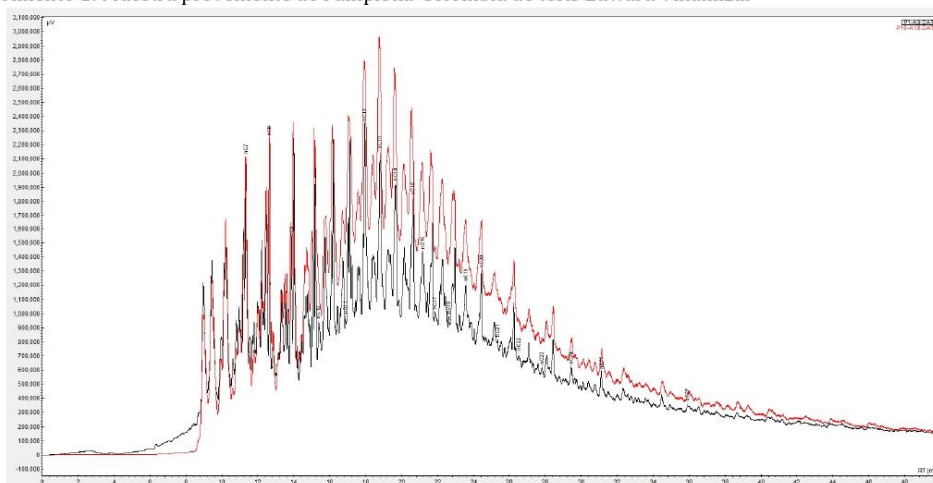
* Muestra 1: Etiquetada como prueba 1 (Temperatura 420 y Rampa 19.2 °C/min)

** Muestra 2: Etiquetada como prueba 10 (Temperatura 420 y Rampa 19.2 °C/min)

*** Especificaciones del diésel fósil.

Especificaciones del producto:

Experimento 1: Muestra proveniente de Pamplona-Colombia de tesis Edward Villamizar



Mtro. James Vera
 T.P. SN230-122743

James R. Vera-Rozo

Analista. Mtro en Ing. James Vera
jr.verarozo@ugto.mx

Experimento 2



INFORME DE ANALISIS PRELIMINAR
 UNIVERSIDAD DE GUANAJUATO
 DIVISION DE INGENIERIA CAMPUS IRAPUATO-SALAMANCA
 LABORATORIO DE CARACTERIZACIÓN DE COMBUSTIBLES ALTERNATIVOS



| Informe de muestra | |
|----------------------------|--|
| Empresa o proyecto: | Muestra Tesis Edward Villamizar – UNIVERSIDAD DE PAMPLONA. |
| Producto: | EXPERIMENTO 2 |
| Fecha de muestreo: | 27 de Junio de 2021 |
| Fecha de respuesta: | 02 de Agosto de 2021 |

| PRUEBA DE ANALISIS | UNIDADES | METODO | ESPECIFICACIONES*** | A* | B** |
|-----------------------------|----------|-------------|---------------------|--------|--------|
| Gravedad específica a 20 °C | - | ASTM-D1298 | Informar | 0.6724 | 0.6632 |
| Apariencia ASTM | - | ASTM D-4176 | - | Oscura | Oscura |
| Poder calorífico | MJ/kg | ASTM D-4809 | Informar | 45.33 | 45.36 |
| C7-C10 | % Wt | ISO-17034 | Máx. 18 | 49.28 | 50.66 |
| C11-C14 | % Wt | ISO-17034 | Máx. 32 | 34.51 | 33.56 |
| C15-C30 | % Wt | ISO-17034 | Mín. 50 | 16.21 | 15.35 |

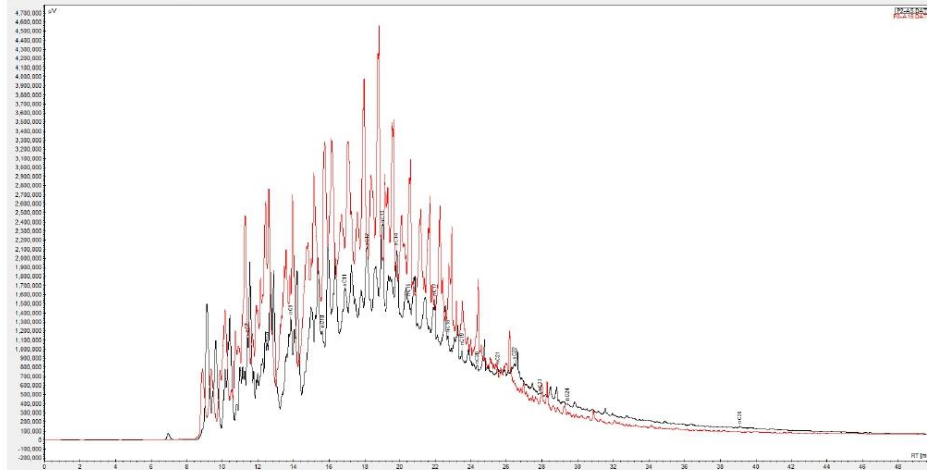
* Muestra 1: Etiquetada como prueba 2 (Temperatura 390 y Rampa 22.5 °C/min)

** Muestra 2: Etiquetada como prueba 8 (Temperatura 390 y Rampa 22.5 °C/min)

*** Especificaciones del diésel fósil.

Especificaciones del producto:

Experimento 2: Muestra proveniente de Pamplona-Colombia de tesis Edward Villamizar



Mtro. James Vera
 T.P. SN230-122743

James R. Vera-Rozo

Analista. Mtro en Ing. James Vera

jr.verarozo@ugto.mx

Experimento 3



INFORME DE ANALISIS PRELIMINAR
 UNIVERSIDAD DE GUANAJUATO
 DIVISION DE INGENIERIA CAMPUS IRAPUATO-SALAMANCA
 LABORATORIO DE CARACTERIZACIÓN DE COMBUSTIBLES ALTERNATIVOS



| Informe de muestra | |
|----------------------------|--|
| Empresa o proyecto: | Muestra Tesis Edward Villamizar – UNIVERSIDAD DE PAMPLONA. |
| Producto: | EXPERIMENTO 3 |
| Fecha de muestreo: | 28 de Junio de 2021 |
| Fecha de respuesta: | 02 de Agosto de 2021 |

| PRUEBA DE ANALISIS | UNIDADES | METODO | ESPECIFICACIONES | A* | B** |
|-----------------------------|----------|-------------|------------------|--------|--------|
| Gravedad específica a 20 °C | - | ASTM-D1298 | Informar | 0.6588 | 0.6429 |
| Apariencia ASTM | - | ASTM D-4176 | - | Oscura | Oscura |
| Poder calorífico | MJ/kg | ASTM D-4809 | Informar | 45.37 | 45.24 |
| C7-C10 | % Wt | ISO-17034 | Máx. 18 | 47.78 | 47.78 |
| C11-C14 | % Wt | ISO-17034 | Máx. 32 | 27.28 | 27.28 |
| C15-C30 | % Wt | ISO-17034 | Mín. 50 | 24.51 | 24.51 |

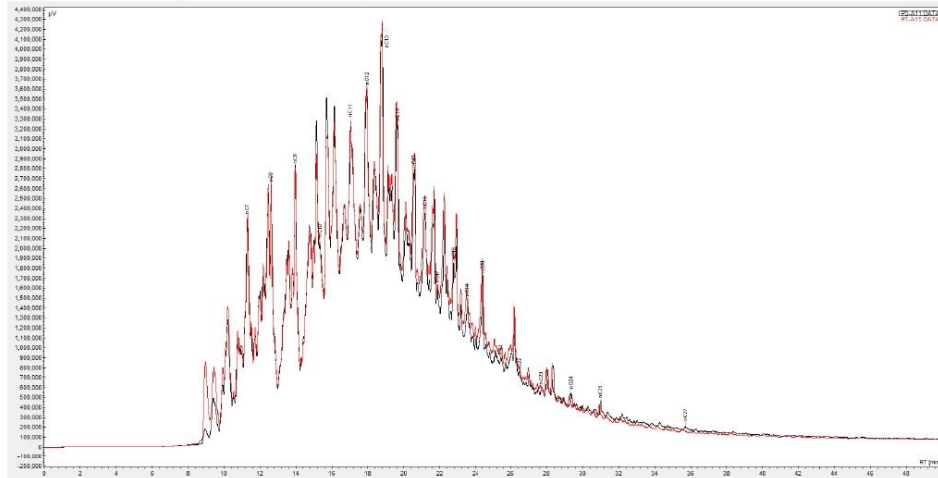
* Muestra 1: Etiquetada como prueba 3 (Temperatura 390 y Rampa 19.2 °C/min)

** Muestra 2: Etiquetada como prueba 7 (Temperatura 390 y Rampa 19.2 °C/min)

*** Especificaciones del diésel fósil.

Especificaciones del producto:

Experimento 3: Muestra proveniente de Pamplona-Colombia de tesis Edward Villamizar



Mr. James Vera
 T.P. SN230-122743

James R. Vera-Rozo

Analista. Mtro en Ing. James Vera

jr.verarozo@ugto.mx

Experimento 4



INFORME DE ANALISIS PRELIMINAR
 UNIVERSIDAD DE GUANAJUATO
 DIVISION DE INGENIERIA CAMPUS IRAPUATO-SALAMANCA
 LABORATORIO DE CARACTERIZACIÓN DE COMBUSTIBLES ALTERNATIVOS



| Informe de muestra | |
|----------------------------|--|
| Empresa o proyecto: | Muestra Tesis Edward Villamizar – UNIVERSIDAD DE PAMPLONA. |
| Producto: | EXPERIMENTO 4 |
| Fecha de muestreo: | 29 de Julio de 2021 |
| Fecha de respuesta: | 02 de Agosto de 2021 |

| PRUEBA DE ANALISIS | UNIDADES | METODO | ESPECIFICACIONES | A* | B** |
|-----------------------------|----------|-------------|------------------|--------|--------|
| Gravedad especifica a 20 °C | - | ASTM-D1298 | Informar | 0.7934 | 0.7758 |
| Apariencia ASTM | - | ASTM D-4176 | - | Oscura | Oscura |
| Poder calorifico | MJ/kg | ASTM D-4809 | Informar | 45.90 | 46.05 |
| C7-C10 | % Wt | ISO-17034 | Máx. 18 | 31.14 | 31.85 |
| C11-C14 | % Wt | ISO-17034 | Máx. 32 | 32.93 | 35.87 |
| C15-C30 | % Wt | ISO-17034 | Mín. 50 | 35.93 | 31.58 |

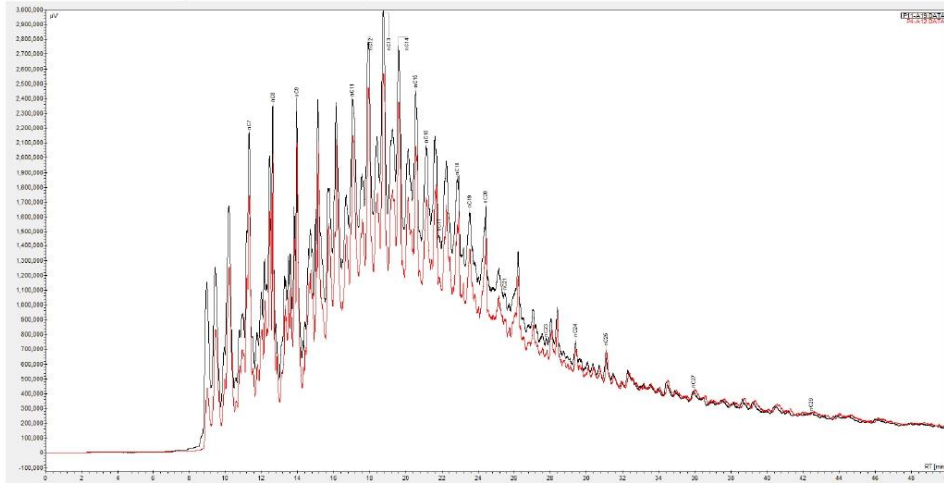
* Muestra 1: Etiquetada como prueba 4 (Temperatura 420 y Rampa 15.9 °C/min)

** Muestra 2: Etiquetada como prueba 11 (Temperatura 420 y Rampa 15.9 °C/min)

*** Especificaciones del diésel fósil.

Especificaciones del producto:

Experimento 4: Muestra proveniente de Pamplona-Colombia de tesis Edward Villamizar



Mtro. James Vera
 T.P. SN230-122743

James R. Vera-Rozo

Analista. Mtro en Ing. James Vera

jr.verarozo@ugto.mx

Experimento 5



INFORME DE ANALISIS PRELIMINAR
 UNIVERSIDAD DE GUANAJUATO
 DIVISION DE INGENIERIA CAMPUS IRAPUATO-SALAMANCA
 LABORATORIO DE CARACTERIZACIÓN DE COMBUSTIBLES ALTERNATIVOS



| Informe de muestra | |
|----------------------------|--|
| Empresa o proyecto: | Muestra Tesis Edward Villamizar – UNIVERSIDAD DE PAMPLONA. |
| Producto: | EXPERIMENTO 5 |
| Fecha de muestreo: | 30 de Junio de 2021 |
| Fecha de respuesta: | 02 de Agosto de 2021 |

| PRUEBA DE ANALISIS | UNIDADES | METODO | ESPECIFICACIONES | A* | B** |
|-----------------------------|----------|-------------|------------------|--------|--------|
| Gravedad especifica a 20 °C | - | ASTM-D1298 | Informar | 0.6182 | 0.6105 |
| Apariencia ASTM | - | ASTM D-4176 | - | Oscura | Oscura |
| Poder calorífico | MJ/kg | ASTM D-4809 | Informar | 45.46 | 45.30 |
| C7-C10 | % Wt | ISO-17034 | Máx. 18 | 48.20 | 45.46 |
| C11-C14 | % Wt | ISO-17034 | Máx. 32 | 25.40 | 26.57 |
| C15-C30 | % Wt | ISO-17034 | Mín. 50 | 24.60 | 24.82 |

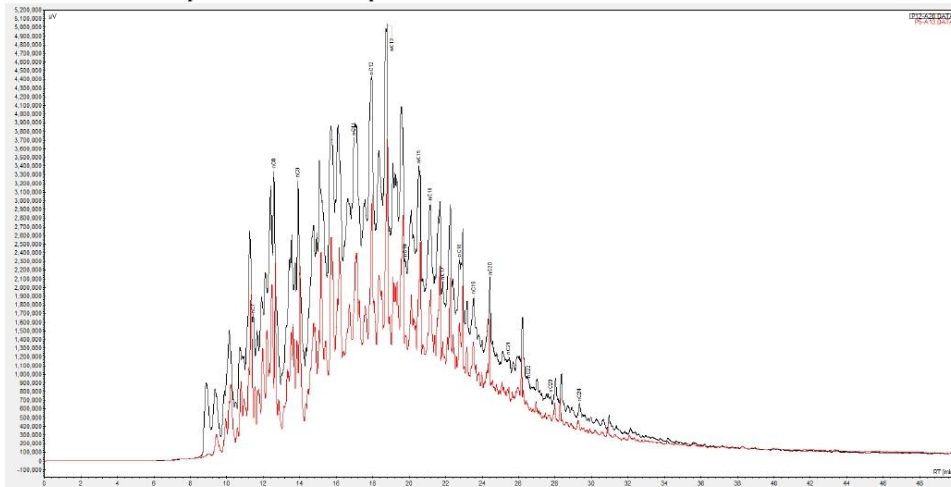
* Muestra 1: Etiquetada como prueba 5 (Temperatura 390 y Rampa 15.9 °C/min)

** Muestra 2: Etiquetada como prueba 12 (Temperatura 390 y Rampa 15.9 °C/min)

*** Especificaciones del diésel fósil.

Especificaciones del producto:

Experimento 5: Muestra proveniente de Pamplona-Colombia de tesis Edward Villamizar



Mtro. James Vera
 T.P. SN230-122743

James R. Vera-Rozo

Analista. Mtro en Ing. James Vera

jr.verarozo@ugto.mx

Experimento 6



INFORME DE ANALISIS PRELIMINAR
 UNIVERSIDAD DE GUANAJUATO
 DIVISION DE INGENIERIA CAMPUS IRAPUATO-SALAMANCA
 LABORATORIO DE CARACTERIZACIÓN DE COMBUSTIBLES ALTERNATIVOS



| Informe de muestra | |
|----------------------------|--|
| Empresa o proyecto: | Muestra Tesis Edward Villamizar - UNIVERSIDAD DE PAMPLONA. |
| Producto: | EXPERIMENTO 6 |
| Fecha de muestreo: | 1 de Julio de 2021 |
| Fecha de respuesta: | 02 de Agosto de 2021 |

| PRUEBA DE ANALISIS | UNIDADES | METODO | ESPECIFICACIONES | A* | B** |
|----------------------------------|----------|-------------|------------------|--------|--------|
| Gravedad especifica a 20 °C | - | ASTM-D1298 | Informar | 0.7838 | 0.7925 |
| Apariencia ASTM | - | ASTM D-4176 | - | Oscura | Oscura |
| Poder calorifico | MJ/kg | ASTM D-4809 | Informar | 45.81 | 45.76 |
| C ₇ -C ₁₀ | % Wt | ISO-17034 | Máx. 18 | 21.55 | 20.37 |
| C ₁₁ -C ₁₄ | % Wt | ISO-17034 | Máx. 32 | 27.52 | 32.13 |
| C ₁₅ -C ₃₀ | % Wt | ISO-17034 | Mín. 50 | 50.48 | 47.15 |

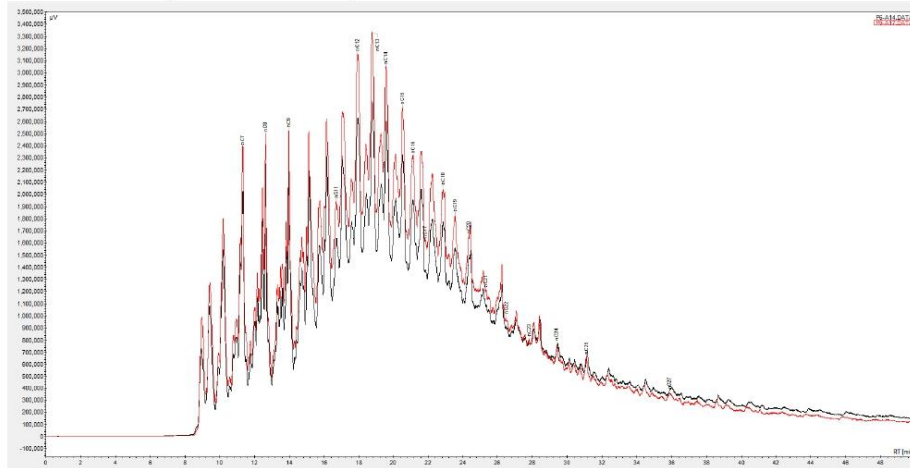
* Muestra 1: Etiquetada como prueba 6 (Temperatura 420 y Rampa 22.5 °C/min)

** Muestra 2: Etiquetada como prueba 9 (Temperatura 420 y Rampa 22.5 °C/min)

*** Especificaciones del diésel fósil.

Especificaciones del producto:

Experimento 6: Muestra proveniente de Pamplona-Colombia de tesis Edward Villamizar



Mtro. James Vera
 I.P. SN230-122743

James R. Vera-Rozo
 Analista. Mtro en Ing. James Vera
jr.verarozo@ugto.mx

Diesel



INFORME DE ANALISIS PRELIMINAR
 UNIVERSIDAD DE GUANAJUATO
 DIVISION DE INGENIERIA CAMPUS IRAPUATO-SALAMANCA
 LABORATORIO DE CARACTERIZACIÓN DE COMBUSTIBLES ALTERNATIVOS



| Informe de muestra | |
|----------------------------|--|
| Empresa o proyecto: | Muestra Tesis Edward Villamizar – UNIVERSIDAD DE PAMPLONA. |
| Producto: | Diesel 1 |
| Fecha de muestreo: | 02 de Agosto de 2021 |
| Fecha de respuesta: | 02 de Agosto de 2021 |

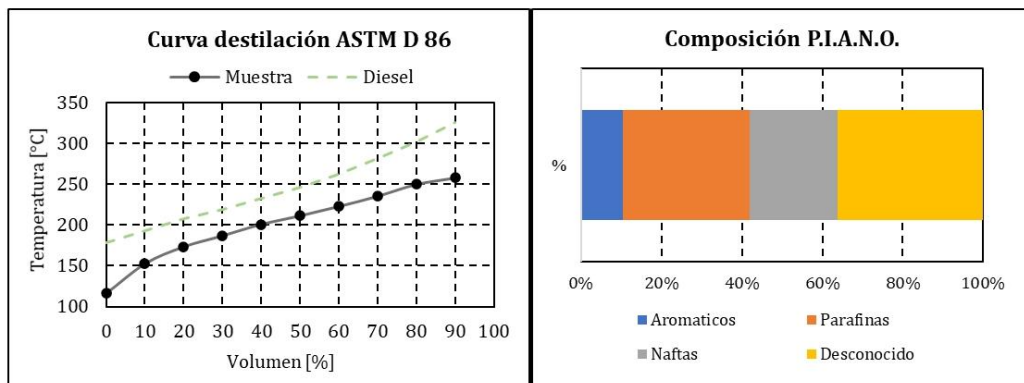
| PRUEBA DE ANALISIS | UNIDADES | METODO | ESPECIFICACIONES | RESULTADO |
|-----------------------------------|----------|-------------|-------------------|-----------|
| xGravedad específica a 20 °C | - | ASTM-D1298 | Informar | 0.8520 |
| xDestilación D-86 TIE* | °C | ASTM-D86 | Informar | 116.0 |
| xDestilación D-86 al 10% | °C | ASTM-D86 | Máx. 275.0 | 152.5 |
| xDestilación D-86 al 50% | °C | ASTM-D86 | Informar | 211.5 |
| xDestilación D-86 al 90% | °C | ASTM-D86 | Max 345.0 | 258.0 |
| xDestilación D-86 TFE** | °C | ASTM-D86 | Informar | 310.0 |
| Temperatura de Nublamiento | °C | ASTM-D2500 | Informar | <0 |
| xÍndice de cetano | - | ASTM D-4737 | Min 48 | 30.85 |
| Agua y sedimentos | % Vol | ASTM D-2709 | Max 0.05 | 5.752 |
| xViscosidad cinemática a 40°C | cSt | ASTM D-445 | Max 4.1 / Min 1.9 | 3.263 |
| Cenizas | % Wt | ASTM D-482 | Max 0.01 | 0.03 |
| Apariencia ASTM | - | ASTM D-4176 | - | Oscura |
| Poder calorífico | MJ/kg | ASTM D-4809 | Informar | 46.72 |
| Contenido de Aromáticos | % | ASTM D-6729 | 10 | 8.53 |
| xC ₇ -C ₁₀ | % Wt | ISO-17034 | Máx. 3 | 9.11 |
| xC ₁₁ -C ₁₄ | % Wt | ISO-17034 | Máx. 3 | 38.2 |
| xC ₁₅ -C ₃₀ | % Wt | ISO-17034 | Mín. 94 | 52.68 |

*TIE: Temperatura inicio de ebullición

**TFE: Temperatura fin de ebullición

Especificaciones del producto:

Diesel 1: Muestra proveniente de Pamplona-Colombia de tesis Edward Villamizar



Analista. Mtro en Ing. James Vera

Costos



PRESUPUESTO MUESTRAS UNIVERSIDAD DE PAMPLONA
UNIVERSIDAD DE GUANAJUATO
DIVISION DE INGENIERIA CAMPUS IRAPUATO-SALAMANCA
LABORATORIO DE CARACTERIZACIÓN DE COMBUSTIBLES ALTERNATIVOS



| Informe de muestra | |
|---------------------|---|
| Empresa o proyecto: | Muestra Tesis Edward Villamizar – UNIVERSIDAD DE PAMPLONA |
| Producto: | - |
| Fecha de muestreo: | 02 de agosto de 2021 |
| Fecha de respuesta: | 02 de agosto de 2021 |

| Prueba | Cantidad | Precio unitario* | Precio* |
|--|----------|------------------|--------------------|
| Análisis de composición de carbonos (ISO 17034) | 12 | 100.00 | \$1 200.00 |
| Poder calorífico líquido (ASTM D240) | 12 | 16.50 | \$198.00 |
| TOTAL | | | \$1 398.00* |

*Todos los precios son USD (American Dollar)

Todos los costos se condonan función del trabajo de cooperación con el estudiante de Doctorado James R. Vera-Rozo y cooperación internacional para la generación de relaciones de investigación. Constancia de la participación en veranos de la ciencia UG 2021.