

**UNIVERSIDAD NACIONAL DE SAN ANTONIO ABAD DEL CUSCO**

**FACULTAD DE INGENIERÍA DE PROCESOS**

**ESCUELA PROFESIONAL DE INGENIERÍA PETROQUÍMICA**



**TESIS**

**EVALUACIÓN DEL RENDIMIENTO DEL PROCESO DE PIRÓLISIS  
CATALÍTICA AL VACÍO DE NEUMÁTICOS FUERA DE USO**

**PRESENTADO POR:**

Br. LUIS CARLOS CHAVEZ PACHECO

Br. ALVARO GONZALES TRUJILLANO

**PARA OPTAR AL TITULO PROFESIONAL DE  
INGENIERO PETROQUIMICO**

**ASESOR:**

MSc. URIEL RAUL FERNANDEZ BERNAOLA

**COASESOR:**

MSc. WILLIAMS JAVIER RAMOS VASQUEZ

**CUSCO-PERÚ**

**2024**

# INFORME DE ORIGINALIDAD

(Aprobado por Resolución Nro.CU-303-2020-UNSAAC)

El que suscribe, Asesor del trabajo de investigación/tesis titulada: EVALUACIÓN DEL RENDIMIENTO DEL PROCESO DE PIRÓLISIS CATALÍTICA AL VACÍO DE NEUMÁTICOS FUERA DE USO

presentado por: LUIS CARLOS CHAVEZ PACHECO con DNI Nro.: 75904978 presentado por: ALVARO GONZALES TRUJILLANO con DNI Nro.: 72757015 para optar el título profesional/grado académico de INGENIERO PETROQUIMICO

Informo que el trabajo de investigación ha sido sometido a revisión por 2 veces, mediante el Software Antiplagio, conforme al Art. 6° del **Reglamento para Uso de Sistema Antiplagio de la UNSAAC** y de la evaluación de originalidad se tiene un porcentaje de 6 %.

Evaluación y acciones del reporte de coincidencia para trabajos de investigación conducentes a grado académico o título profesional, tesis

Porcentaje	Evaluación y Acciones	Marque con una (X)
Del 1 al 10%	No se considera plagio.	X
Del 11 al 30 %	Devolver al usuario para las correcciones.	
Mayor a 31%	El responsable de la revisión del documento emite un informe al inmediato jerárquico, quien a su vez eleva el informe a la autoridad académica para que tome las acciones correspondientes. Sin perjuicio de las sanciones administrativas que correspondan de acuerdo a Ley.	

Por tanto, en mi condición de asesor, firmo el presente informe en señal de conformidad y adjunto la primera página del reporte del Sistema Antiplagio.

Cusco, 12 de diciembre de 2024

Firma

Post firma Uriel Raul Fernandez Bernola

Nro. de DNI 43130855

ORCID del Asesor https://orcid.org/0000-0002-9386-702X

Se adjunta:

1. Reporte generado por el Sistema Antiplagio.
2. Enlace del Reporte Generado por el Sistema Antiplagio: oid: 27259°475683039

# Luis Chavez

## TESISS FINAL PARA EMPASTAR V6 (1).docx

 Universidad Nacional San Antonio Abad del Cusco

---

### Detalles del documento

Identificador de la entrega

trn:oid:::27259:415683039

Fecha de entrega

12 dic 2024, 11:05 p.m. GMT-5

Fecha de descarga

12 dic 2024, 11:10 p.m. GMT-5

Nombre de archivo

TESISS FINAL PARA EMPASTAR V6 (1).docx

Tamaño de archivo

19.0 MB

246 Páginas

39,831 Palabras

215,836 Caracteres

# 6% Similitud general

El total combinado de todas las coincidencias, incluidas las fuentes superpuestas, para ca...

## Filtrado desde el informe

- ▶ Bibliografía
- ▶ Texto citado
- ▶ Texto mencionado
- ▶ Coincidencias menores (menos de 15 palabras)

## Exclusiones

- ▶ N.º de coincidencias excluidas

## Fuentes principales

- 6%  Fuentes de Internet
- 0%  Publicaciones
- 4%  Trabajos entregados (trabajos del estudiante)

## Marcas de integridad

### N.º de alertas de integridad para revisión

No se han detectado manipulaciones de texto sospechosas.

Los algoritmos de nuestro sistema analizan un documento en profundidad para buscar inconsistencias que permitirían distinguirlo de una entrega normal. Si advertimos algo extraño, lo marcamos como una alerta para que pueda revisarlo.

Una marca de alerta no es necesariamente un indicador de problemas. Sin embargo, recomendamos que preste atención y la revise.

## **Dedicatorias**

*Dedico esta tesis con profundo agradecimiento a mis queridos padres, Franklin Chávez y Marcelina Pacheco, cuyo amor incondicional y constante apoyo han sido mi fuente inagotable de fortaleza y motivación. A mis hermanos, Diego Aliaga y Marcia Chávez, y a mi fiel compañera de cuatro patas y una cola chocolate, por su inquebrantable aliento y comprensión. Gracias a cada uno de ustedes, he logrado alcanzar un objetivo más en mi vida profesional. Su presencia en mi vida ha sido invaluable y siempre será recordada con eterna gratitud y amor.*

**Luis Carlos Chávez Pacheco**

*A mi querida madre Lesly Emperatriz Trujillano Ormachea, por su sacrificio y esfuerzo para ayudarme a cumplir este anhelado objetivo, quien aun habiendo dificultades en el camino siempre me brindan su cariño y comprensión. A mis queridos abuelos Emperatriz Ormachea y Raúl Trujillano, que siempre quisieron verme cumplir este gran objetivo, si bien ya no se encuentran conmigo sé que me observan con una gran sonrisa desde el cielo en este momento.*

**Alvaro Gonzales Trujillano**

## **Agradecimientos**

*Quiero expresar mi más sincero y profundo agradecimiento a todas las personas que han sido parte fundamental en la realización de esta tesis y en mi formación académica. A mi asesor, Uriel Fernández, y a mi coasesor, Williams Ramos, cuya invaluable guía, dedicación y apoyo constante han sido pilares esenciales en este proceso. Extiendo mi gratitud a las personas del Laboratorio de Normalización de Petróleo y Derivados, y al grupo de Procesos Termoquímicos, especialmente al Magister Victor Pretell, Carlin Mendoza y Carlomagno Núñez, por su valiosa colaboración y conocimientos compartidos. A mi compañero de tesis, Alvaro Gonzales, y a su madre Lesly Trujillano, por su colaboración y apoyo incondicional. A mis queridos amigos, Luis Paullo, Richard Medina, Marcelo Cárdenas y Ricardo Gonzales, por su sincera amistad y apoyo desinteresado. A mis amigos de la facultad, Dax Alexander, Keren Orosco, María Fernanda Corazao, Gian Salazar, Heberth Alarcón, Alex Roa, Royer Meza y a todos aquellos que, aunque no mencionados, han contribuido de alguna manera en este arduo camino, les agradezco profundamente. A todos ustedes, gracias de corazón por su apoyo y comprensión; su presencia y ayuda han sido invaluableles y siempre serán recordadas con gratitud y aprecio.*

***Luis Carlos Chávez Pacheco***

*A Dios por la gran familia que me dio, a mi madre por su apoyo y siempre creer que lograre todas mis metas y sueños. A todos mis familiares que me reciben con una gran sonrisa cuando nos encontramos y me dan ánimos para seguir adelante. A mis docentes que me brindaron todo su conocimiento para mi formación profesional; en especial a mi asesor y coasesor quienes siempre estuvieron dispuestos a brindarnos todo su apoyo para lograr este trabajo. A mi compañero de tesis y su querida madre por su paciencia y dedicación durante este largo camino para realizar este trabajo, gracias por siempre buscar soluciones a los problemas que se tuvo y así lograr este gran objetivo.*

***Alvaro Gonzales Trujillano***

## Tabla de contenido

<b>Dedicatorias.....</b>	<b>i</b>
<b>Agradecimientos.....</b>	<b>ii</b>
<b>Tabla de contenido.....</b>	<b>iii</b>
<b>Lista de figuras.....</b>	<b>viii</b>
<b>Lista de tablas.....</b>	<b>xiv</b>
<b>Nomenclatura.....</b>	<b>xvii</b>
<b>Resumen.....</b>	<b>xviii</b>
<b>Abstract.....</b>	<b>xix</b>
<b>CAPITULO I: GENERALIDADES.....</b>	<b>1</b>
1.1. Introducción.....	1
1.2. Planteamiento del problema.....	3
1.2.1. Problema general.....	7
1.2.2. Problemas específicos.....	7
1.3. Justificación.....	8
1.4. Objetivos.....	10
1.4.1. Objetivo general.....	10
1.4.2. Objetivos específicos.....	10
<b>CAPÍTULO II: MARCO TEÓRICO.....</b>	<b>11</b>
2.1. Antecedentes de la investigación.....	11
2.1.1. Antecedentes nacionales.....	11

2.1.2. Antecedentes internacionales.....	12
2.2. Marco conceptual.....	17
2.2.1. Neumáticos.....	17
2.2.2. Neumáticos Fuera de Uso (NFU).....	20
2.2.3. Tipos de cauchos.....	20
2.2.4. Aplicación de los neumáticos fuera de uso en la actualidad.....	26
2.2.5. Procedimientos de Manejo de Neumáticos Usados.....	26
2.2.6. Proceso de pirólisis.....	27
2.2.7. Tipos de pirólisis.....	28
2.2.8. Tipos de Reactores de Pirólisis.....	33
2.2.9. Proceso de pirólisis en neumáticos fuera de uso.....	36
2.3. Variables de operación en un proceso de pirolisis catalítica.....	44
2.3.1. Tamaño de partícula.....	44
2.3.2. Temperatura.....	44
2.3.3. Relación catalizadora/materia prima.....	45
2.3.4. Rendimiento de productos líquidos.....	45
<b>CAPÍTULO III: MATERIALES Y METODOS.....</b>	<b>46</b>
3.1. Hipótesis y especificación de variables.....	46
3.1.1. Hipótesis general de investigación.....	46
3.1.2. Hipótesis específica de investigación.....	46
3.2. Identificación de variables e indicadores.....	46
3.2.1. Variables independientes.....	46
3.2.2. Variables dependientes.....	47
3.2.3. Variable interviniente.....	47

3.3. Tipo y diseño de investigación .....	47
3.3.1. Tipo, enfoque y alcance de la investigación .....	47
3.3.2. Diseño Experimental.....	47
3.4. Ámbito de estudio .....	52
3.5. Población de estudio .....	53
3.6. Unidad de análisis .....	53
3.7. Tamaño de muestra .....	53
3.8. Técnicas de selección de muestra .....	54
3.9. Método experimental .....	55
3.10. Materiales, equipos e instrumentos.....	58
3.11 Equipos .....	59
3.12. Instrumentos.....	63
3.13. Procedimiento experimental .....	66
<b>CAPÍTULO IV: RESULTADOS Y DISCUSIONES .....</b>	<b>98</b>
4.1. Resultados .....	98
4.1.1. Caracterización de la materia prima NFU y E-cat FCC.....	98
4.1.2. Determinación de rendimientos de los productos líquidos ..	103
4.2. Análisis estadístico.....	105
4.2.1. Análisis estadístico para el rendimiento de productos líquidos .....	105
4.2.2. Prueba de normalidad para el rendimiento de productos líquidos .....	107
4.2.3. Análisis de la Influencia de la Temperatura y % Catalizador/ MP en el rendimiento de productos líquidos .....	108

4.2.4. Análisis estadístico para el rendimiento de productos gaseosos .....	122
4.2.5. Prueba de normalidad para el rendimiento de productos gaseosos .....	125
4.2.6. Análisis de la Influencia de la Temperatura y % Catalizador/MP en el rendimiento de productos gaseosos .....	126
4.2.7. Análisis estadístico para el rendimiento de productos sólidos .....	138
4.2.8. Prueba de normalidad para el rendimiento de productos sólidos .....	140
4.2.9. Análisis de la Influencia de la Temperatura y % Catalizador/MP en el rendimiento de productos sólidos .....	141
4.3. Presentación de resultados (Discusión de resultados finales).....	153
4.3.1 Discusión acerca de la caracterización de la materia prima..	153
4.3.2. Discusión acerca del rendimiento de los productos obtenidos de la pirolisis.....	157
4.3.3. Caracterización del producto líquido obtenido por pirolisis	165
4.3.4. Discusión acerca de la caracterización del producto líquido. ....	170
4.3.5. Discusión acerca de la caracterización de los productos sólidos y Ecat FCC caracterización de los productos solidos .....	175
<b>CONCLUSIONES .....</b>	<b>179</b>
<b>RECOMENDACIONES .....</b>	<b>180</b>
<b>BIBLIOGRAFIA .....</b>	<b>181</b>

**APENDICE.....193**

**ANEXOS.....216**

## Lista de figuras

<b>Figura 1</b> Producción de hidrocarburos líquidos durante los años 2013 al 2023 .....	2
<b>Figura 2</b> Producción de combustibles líquidos en el Perú durante los años 2013 al 2023 .....	4
<b>Figura 3</b> Toneladas de neumáticos procedentes de camiones cisterna para el transporte de hidrocarburos líquidos.....	7
<b>Figura 4</b> Esquema de componentes estructurales de un neumático .....	18
<b>Figura 5</b> Estructura del catalizador utilizado en la unidad de craqueo catalítico fluidizado (FCC) .....	30
<b>Figura 6</b> Reactor batch .....	33
<b>Figura 7</b> Reactor de horno rotatorio .....	34
<b>Figura 8</b> Reactor tubular tipo tornillo.....	35
<b>Figura 9</b> Reactor tubular horizontal al vacío .....	35
<b>Figura 10</b> Proceso de pirolisis aplicado a neumáticos fuera de uso .....	36
<b>Figura 11</b> Análisis termogravimétrico de un neumático fuera de uso .....	37
<b>Figura 12</b> Análisis FTIR de los líquidos de pirolisis .....	42
<b>Figura 13</b> Representación de una muestra como subgrupo.....	54
<b>Figura 14</b> Neumáticos fuera de uso .....	54
<b>Figura 15</b> Esquema experimental de la pirolisis para los NFU .....	56
<b>Figura 16</b> Diagrama de bloques de la pirolisis para los NFU .....	56
<b>Figura 17</b> Diagrama de flujo de la pirolisis para los NFU .....	57
<b>Figura 18</b> Horno de pirolisis.....	59
<b>Figura 19</b> Reactor de pirolisis.....	60
<b>Figura 20</b> Sistema de enfriamiento .....	60
<b>Figura 21</b> Bomba de vacío .....	61
<b>Figura 22</b> Sistema de venteo de gases .....	62
<b>Figura 23</b> Sistema de recolección de datos LabQuest Mini .....	63
<b>Figura 24</b> Balanza digital.....	63
<b>Figura 25</b> Termocupla y sensor tipo K .....	64
<b>Figura 26</b> Software Logger pro .....	65

<b>Figura 27</b> Vernier TMB-BT .....	65
<b>Figura 28</b> Pesaje del reactor .....	66
<b>Figura 29</b> Sistema de enfriamiento .....	67
<b>Figura 30</b> Introducción del reactor al horno .....	67
<b>Figura 31</b> Conexión del sistema de enfriamiento con el sistema de vacío .....	68
<b>Figura 32</b> Sistema experimental para la pirolisis de NFU.....	68
<b>Figura 33</b> Muestra de catalizador, neumáticos fuera de uso e introducción al reactor .....	69
<b>Figura 34</b> Control del sistema de vacío .....	70
<b>Figura 35</b> Pesado de productos líquidos.....	71
<b>Figura 36</b> Almacenamiento de productos líquidos .....	72
<b>Figura 37</b> Residuos solidos.....	72
<b>Figura 38</b> Neumático Fuera Uso de la Compañía Petro Galaxy.....	73
<b>Figura 39</b> Cortes de neumático fuera de uso para muestra .....	74
<b>Figura 40</b> Tamaño de neumático cortado .....	74
<b>Figura 41</b> Muestra de 150 g. para reactor de pirolisis 2.5cm x 2.5cm.....	74
<b>Figura 42</b> NFU triturado para el análisis TGA .....	75
<b>Figura 43</b> E-cat pesado para alimentación al reactor.....	75
<b>Figura 44</b> Pesado para determinación para determinación del poder calorífico .....	76
<b>Figura 45</b> Bomba calorimétrica armada .....	76
<b>Figura 46</b> Instalación de equipo para determinación de poder calorífico.....	77
<b>Figura 47</b> Sistema de calorimétrico.....	77
<b>Figura 48</b> NFU rallado en crisol de TGA para análisis termogravimétrico .....	79
<b>Figura 49</b> Equipo TGA - 4000 para para análisis termogravimétrico .....	81
<b>Figura 50</b> Instalación para análisis en la TGA.....	82
<b>Figura 51</b> Determinación de la densidad aparente.....	82
<b>Figura 52</b> Porta muestra de materia prima y catalizador listo para pesar y cargar .....	83
<b>Figura 53</b> Adición de catalizador a la porta muestra de materia prima .....	83
<b>Figura 54</b> Armado y carga del reactor de Pirolisis .....	84

<b>Figura 55</b> Peso del reactor armado con porta muestra de materia prima y catalizador .....	84
<b>Figura 56</b> Acondicionamiento de la termo cupla en el reactor.....	84
<b>Figura 57</b> Lectura de la temperatura en el reactor el software Logger Pro.....	85
<b>Figura 58</b> Programación de la temperatura de operación en el reactor .....	85
<b>Figura 59</b> Recolector pesado antes de Reactor .....	86
<b>Figura 60</b> Reactor, sistema de vacío y sistema de enfriamiento en funcionamiento .....	86
<b>Figura 61</b> Producto líquido pesado después de la pirolisis.....	86
<b>Figura 62</b> Recolección de producto líquido del recolector.....	87
<b>Figura 63</b> Rotulado de los productos líquidos.....	87
<b>Figura 64</b> Recolección y almacenamiento de productos sólidos .....	87
<b>Figura 65</b> Recolección y almacenamiento de productos líquidos .....	88
<b>Figura 66</b> Medición del volumen del producto líquido para la destilación D-86.....	88
<b>Figura 67</b> E-cat de base de bandeja .....	91
<b>Figura 68</b> E-cat usado, recuperado y tratado.....	91
<b>Figura 69</b> Baño de viscosidad cinemática BVI-003 .....	92
<b>Figura 70</b> Equipo de viscosidad cinemática HK-265.....	92
<b>Figura 71</b> Peso de jeringa para análisis Equipo de análisis de humedad de humedad .....	93
<b>Figura 72</b> Equipo de análisis de humedad “ASTM D4377” Karl Fischer.....	93
<b>Figura 73</b> Centrifuga para tratamiento de líquido pirolítico .....	94
<b>Figura 74</b> Destilación ASTM D86.....	94
<b>Figura 75</b> Control de temperatura y %V de Destilación ASTM D86.....	95
<b>Figura 76</b> Peso de líquido pirolítico análisis de poder calorífico .....	95
<b>Figura 77</b> Análisis de poder calorífico “ASTM D240” .....	96
<b>Figura 78</b> Densímetro DMA 35N.....	96
<b>Figura 79</b> Análisis de densidad “ASTM D5002” .....	97
<b>Figura 80</b> Equipo para el análisis FTIR.....	97
<b>Figura 81</b> Análisis próximo TGA para determinación de cenizas y carbón .....	100
<b>Figura 82</b> Análisis termogravimétrico del NFU.....	101

<b>Figura 83</b> Efectos principales de la temperatura y % de Catalizador /MP para el rendimiento .....	106
<b>Figura 84</b> Prueba de normalidad para el rendimiento de productos líquidos.....	108
<b>Figura 85</b> Informe resumido de la Regresión Múltiple para el Rendimiento .....	110
<b>Figura 86</b> Informe resumido de la regresión múltiple para el rendimiento .....	113
<b>Figura 87</b> Informe resumido de la regresión simple para el rendimiento de productos líquidos vs temperatura.....	115
<b>Figura 88</b> Informe resumido de la regresión simple para el rendimiento de productos líquidos vs la relación catalizador/ materia prima.....	117
<b>Figura 89</b> Interacción del rendimiento de los productos líquidos de la pirolisis .....	118
<b>Figura 90</b> Informe de predicción para la obtención del mayor rendimiento de productos líquidos.....	120
<b>Figura 91</b> Grafica de malla para la pirolisis térmica y catalítica .....	121
<b>Figura 92</b> Grafica de malla considerando el punto máximo para la pirolisis térmica y catalítica .....	122
<b>Figura 93</b> Efectos principales de la temperatura y % de Catalizador /MP para el rendimiento de productos gaseosos.....	124
<b>Figura 94</b> Prueba de normalidad para el rendimiento de productos gaseosos.....	126
<b>Figura 95</b> Informe resumido de la regresión múltiple para el rendimiento de productos gaseosos .....	128
<b>Figura 96</b> Informe resumido de la regresión múltiple para el rendimiento de productos gaseosos .....	131
<b>Figura 97</b> Informe resumido de la regresión simple para el rendimiento de productos gaseosos vs temperatura.....	133
<b>Figura 98</b> Informe resumido de la regresión simple para el rendimiento de productos gaseosos vs la relación catalizador/ materia prima.....	135
<b>Figura 99</b> Interacción del rendimiento de los productos gaseosos de la pirolisis.....	136
<b>Figura 100</b> Efectos principales de la temperatura y % de Catalizador /MP para el rendimiento de productos sólidos .....	139
<b>Figura 101</b> Prueba de normalidad para el rendimiento de productos sólidos .....	141
<b>Figura 102</b> Informe resumido de la regresión múltiple para el rendimiento de productos sólidos.....	143
<b>Figura 103</b> Informe resumido de la regresión múltiple para el rendimiento de productos sólidos.....	146

<b>Figura 104</b> Informe resumido de la regresión simple para el rendimiento de productos sólidos vs temperatura.....	148
<b>Figura 105</b> Informe resumido de la regresión simple para el rendimiento de productos sólidos vs la relación catalizador/ materia prima.....	150
<b>Figura 106</b> Interacción del rendimiento de los productos sólidos de la pirólisis .....	151
<b>Figura 107</b> Análisis termogravimétrico a diferentes velocidades de calentamiento.....	156
<b>Figura 108</b> Rendimiento de los productos de la pirólisis térmica .....	158
<b>Figura 109</b> Rendimiento de los productos de la pirólisis catalítica al 10% .....	160
<b>Figura 110</b> Rendimiento de los productos para la pirólisis catalítica al 20% .....	161
<b>Figura 111</b> Análisis termogravimétrico a la muestra con 0, 10% y 20% de catalizador .....	162
<b>Figura 112</b> Espectrofotometría de la muestra líquida maximizada obtenida al 17.76% de relación E-cat/MP y a 500°C.....	174
<b>Figura 113</b> Análisis termogravimétrico al catalizador E-cat, catalizador gastado y regenerado .....	177
<b>Figura 114</b> Regeneración del catalizador E-cat .....	178
<b>Figura 115</b> Espectrofotometría de la muestra líquida obtenida para 500°C y 0% E-cat .....	199
<b>Figura 116</b> Espectrofotometría de la muestra líquida obtenida para 500°C y 10% E- .....	200
<b>Figura 117</b> Espectrofotometría de la muestra líquida obtenida para 500°C y 20% E-cat.....	201
<b>Figura 118</b> Experimento a 500 °C – 0% E-cat.....	202
<b>Figura 119</b> Experimento a 550 °C – 0% E-cat.....	202
<b>Figura 120</b> Experimento a 600 °C – 0% E-cat.....	203
<b>Figura 121</b> Experimento a 650 °C – 0% E-cat.....	203
<b>Figura 122</b> Experimento a 500 °C – 10% E-cat.....	204
<b>Figura 123</b> Experimento a 550 °C – 10% E-cat.....	204
<b>Figura 124</b> Experimento a 600 °C – 10% E-cat.....	205
<b>Figura 125</b> Experimento a 650 °C – 10% E-cat.....	205
<b>Figura 126</b> Experimento a 500 °C – 20% E-cat.....	206
<b>Figura 127</b> Experimento a 550 °C – 20% E-cat.....	206
<b>Figura 128</b> Experimento a 600 °C – 20% E-cat.....	207

<b>Figura 129</b> Experimento a 650 °C – 20% E-cat.....	207
<b>Figura 130</b> Caracterización de líquido pirolítico con curva ASTM D86 Software “DWSIM .....	209
<b>Figura 131</b> Elección de 30 pseudocomponentes para líquido de pirolisis - Software “DWSIM” .....	210
<b>Figura 132</b> Pseudocomponentes para el líquido de pirolisis -Software “DWSIM.....	210
<b>Figura 133</b> Elección de métodos y correlaciones para la caracterización por curva ASTM D86 de líquido de pirolisis -Software “DWSIM” .....	211
<b>Figura 134</b> Resultados de la caracterización con 30 pseudocomponentes para líquido de pirolisis-Software “DWSIM”.....	211
<b>Figura 135</b> Resultados de los valores estimados por el software a 15.566 °C o 60°F de poder calorífico bruto, densidad y viscosidad cinemática para comparación con reales de laboratorio- Software “DWSIM” .....	212
<b>Figura 136</b> Resultados de los valores estimados por el software a 37.8 °C de la viscosidad cinemática para comparación con reales de laboratorio- Software “DWSIM” .....	212
<b>Figura 137</b> Caracterización de líquido pirolítico con curva ASTM D86 para rendimiento más representativo - Software “DWSIM” .....	213
<b>Figura 138</b> Elección de 30 pseudocomponentes para líquido de pirolisis -Software “DWSIM” .....	213
<b>Figura 139</b> Pseudocomponentes para el líquido de pirolisis- Software “DWSIM” .....	214
<b>Figura 140</b> Resultados de la caracterización con 30 pseudocomponentes para líquido de pirolisis-Software “DWSIM”.....	214
<b>Figura 141</b> Resultados de los valores estimados por el software a 15.566 °C o 60°F de poder calorífico bruto, densidad y viscosidad cinemática para comparación con reales de laboratorio - Software “DWSIM” .....	215
<b>Figura 142</b> Resultados de los valores estimados por el software a 37.8 °C de la viscosidad cinemática para comparación con reales de laboratorio-Software “DWSIM”.....	215

## Lista de tablas

<b>Tabla 1</b> Composición porcentual de materiales que componen un neumático.....	19
<b>Tabla 2</b> Composición porcentual química de un neumático.....	19
<b>Tabla 3</b> Tipos de elastómeros .....	20
<b>Tabla 4</b> Tipos de pirólisis.....	32
<b>Tabla 5</b> Rendimiento de productos líquidos a través de varios reactores.....	40
<b>Tabla 6</b> Número de experimentos y repeticiones.....	49
<b>Tabla 7</b> Arreglo general del diseño factorial 4x3.....	50
<b>Tabla 8</b> Clasificación de neumáticos según el tipo de vehículo .....	52
<b>Tabla 9</b> Caracterización típica de catalizador de equilibrio de FCC.....	89
<b>Tabla 10</b> Condiciones operativas para la regeneración del catalizador. ....	90
<b>Tabla 11</b> Características de la materia prima.....	98
<b>Tabla 12</b> Propiedades del catalizador .....	103
<b>Tabla 13</b> Rendimiento de los productos de pirolisis en (%m/m).....	104
<b>Tabla 14</b> Diseño Experimental Factorial 4x3x3 utilizado para el tratamiento estadístico de productos líquidos .....	105
<b>Tabla 15</b> Descriptivos estadísticos para el rendimiento de productos líquidos.....	107
<b>Tabla 16</b> Información de los factores.....	109
<b>Tabla 17</b> Análisis de varianza de rendimiento de productos líquidos respecto a la temperatura y % de Catalizador/MP .....	109
<b>Tabla 18</b> Resumen del modelo para la regresión lineal múltiple.....	111
<b>Tabla 19</b> Análisis para el modelo de regresión múltiple .....	112
<b>Tabla 20</b> Análisis de varianza del rendimiento respecto a la temperatura.....	114
<b>Tabla 21</b> Resumen del modelo para la regresión lineal .....	114
<b>Tabla 22</b> Análisis de varianza de rendimiento respecto a la relación catalizador/materia prima.....	116
<b>Tabla 23</b> Resumen del modelo para la regresión lineal .....	116
<b>Tabla 24</b> Diseño Experimental Factorial 4x3x3 utilizado para el tratamiento estadístico de productos gaseosos.....	123

<b>Tabla 25</b> Descriptivos estadísticos para el rendimiento de productos gaseosos.....	125
<b>Tabla 26</b> Información de los factores.....	127
<b>Tabla 27</b> Análisis de varianza de rendimiento de productos gaseosos respecto a la temperatura y % de Catalizador/MP .....	127
<b>Tabla 28</b> Resumen del modelo para la regresión lineal múltiple.....	129
<b>Tabla 29</b> Análisis para el modelo de regresión múltiple .....	130
<b>Tabla 30</b> Análisis de varianza del rendimiento respecto a la temperatura.....	132
<b>Tabla 31</b> Resumen del modelo para la regresión lineal .....	132
<b>Tabla 32</b> Análisis de varianza de rendimiento respecto a la relación catalizador/materia prima .....	134
<b>Tabla 33</b> Resumen del modelo para la regresión lineal .....	134
<b>Tabla 34</b> Diseño Experimental Factorial 4x3x3 utilizado para el tratamiento estadístico de productos sólidos .....	138
<b>Tabla 35</b> Descriptivos estadísticos para el rendimiento de productos sólidos .....	140
<b>Tabla 36</b> Información de los factores.....	142
<b>Tabla 37</b> Análisis de varianza de rendimiento de productos sólidos respecto a la temperatura y % de Catalizador/MP .....	142
<b>Tabla 38</b> Resumen del modelo para la regresión lineal múltiple.....	144
<b>Tabla 39</b> Análisis para el modelo de regresión múltiple .....	145
<b>Tabla 40</b> Análisis de varianza del rendimiento respecto a la temperatura.....	147
<b>Tabla 41</b> Resumen del modelo para la regresión lineal .....	147
<b>Tabla 42</b> Análisis de varianza de rendimiento respecto a la relación catalizador/materia prima .....	149
<b>Tabla 43</b> Resumen del modelo para la regresión lineal .....	149
<b>Tabla 44</b> Comparación de las características de la materia prima.....	153
<b>Tabla 45</b> Comparación de características y resultados para la pirolisis térmica .....	164
<b>Tabla 46</b> Comparación de características y resultados para la pirolisis catalítica .....	165
<b>Tabla 47</b> Resultados obtenidos mediante laboratorio para la caracterización de productos líquidos para la pirolisis térmica y catalítica .....	168
<b>Tabla 48</b> Estimación de propiedades fisicoquímicas utilizando las curvas de destilación de la ASTM D86 ..	169

<b>Tabla 49</b> Cálculo del error para las características estimadas y de laboratorio .....	170
<b>Tabla 50</b> Comparación de resultados de las propiedades del producto líquido con las especificaciones técnicas del diésel B5 y diésel N°2. ....	171
<b>Tabla 51</b> Comparación de resultados de las propiedades del producto líquido con investigaciones realizadas. ....	173
<b>Tabla 52</b> Poder calorífico superior en MJ/kg de los sólidos de la pirólisis vs combustibles de uso típico. ....	176
<b>Tabla 53</b> Matriz de Consistencia para la Obtención de Combustibles Líquidos por Pirólisis al Vacío de Neumáticos Fuera de Uso de Cisternas .....	193
<b>Tabla 54</b> Tabla de Operalización de Variables.....	196
<b>Tabla 55</b> Resultados experimentales obtenidos al trabajar con una relación E-cat/Materia prima de 0%. .	208
<b>Tabla 56</b> Resultados experimentales obtenidos al trabajar con una relación E-cat/Materia prima de 10%. .	208
<b>Tabla 57</b> Resultados experimentales obtenidos al trabajar con una relación E-cat/Materia prima de 20%. .	209

## Nomenclatura

Aceites de pirólisis: TPO.

Acrilonitrilo: ACN.

American Society for Testing and Materials: ASTM.

Análisis termogravimétrico : TGA

Benceno, tolueno, etilbenceno y xileno: BTEX.

Catalizador de equilibrio: E-Cat.

Caucho butadieno: BR.

Caucho de nitrilo: NBR.

Caucho natural: CN o NR.

Cauchos fluorados: CFM-FKM.

Craqueo catalítico fluidizado: FCC.

Espectroscopia Infrarroja por Transformada de Fourier: FTIR

Estireno-butadieno: SBR.

Etileno-propileno: EPM-EPDM.

Hidrocarburos aromáticos monocíclicos: MAH.

Isobutileno-isopreno: IIR.

Materia prima: MP.

Miles de barriles de Petróleo: MBLS.

Ministerio del ambiente: MINAM.

Morderita protonada: HMOR.

Neumáticos fuera de uso: NFU.

Organismo de Evaluación y Fiscalización Ambiental: OEFA.

Organismo Supervisor de la Inversión en Energía y Minería: OSINERGMIN.

Tamaño de partícula: TP.

## Resumen

La investigación titulada "Evaluación del rendimiento de combustibles líquidos producidos por pirólisis catalítica al vacío de neumáticos fuera de uso" ha evaluado los rendimientos de los productos líquidos obtenidos mediante el proceso de pirólisis catalítica al vacío de neumáticos fuera de uso (NFU). Se identificaron la temperatura de operación y la relación óptima entre catalizador y materia prima, para obtener el mayor rendimiento de producto líquido, basándose en antecedentes previos. La materia prima utilizada consistió en neumáticos fuera de uso recolectados y reducidos de tamaño a 25x25 mm. Las pruebas experimentales se llevaron a cabo en un reactor tubular horizontal semicontinuo existente, equipado con un sistema de vacío, refrigeración, recolección y venteo de gases. Se añadió el catalizador de equilibrio de la unidad de craqueo catalítico fluidizado (FCC). El reactor operó a una presión de vacío de -20 inHg durante 3 horas, con una velocidad de calentamiento promedio de 8 °C/min. Se realizaron pruebas de pirólisis a temperaturas de 500, 550, 600 y 650 °C, variando la relación catalizador/materia prima en 0%, 10% y 20% según corresponda. Las condiciones óptimas que maximizan la producción se obtuvieron a través de la regresión lineal múltiple utilizando el software estadístico Minitab. Además, se llevó a cabo los análisis de las características fisicoquímicas del producto líquido obtenido en el punto de máximo rendimiento, los cuales son: ASTM D240, ASTM D5002, ASTM D86, ASTM D287, ASTM D445, ASTM D4377, ASTM D4292 y la ASTM D86. Para poder determinar la composición química del producto líquido se realizó la técnica analítica de Espectroscopia Infrarroja por Transformada de Fourier (FTIR). El mayor rendimiento de producto líquido fue de 52.40 (%m/m) a la temperatura de 500 °C y la relación catalizador/materia prima de 17.77%, del análisis de calidad se caracterizó como un crudo "selva".

**Palabras claves:** pirólisis, catalizador, residuos, combustibles, neumáticos fuera de uso.

### Abstract

The research entitled “Evaluation of the Yield of Liquid Fuels Produced by Vacuum Catalytic Pyrolysis of End-of-Life Tires” has evaluated the yields of liquid products obtained by the vacuum catalytic pyrolysis process of end-of-life tires (ENDT). The optimum operating temperature and catalyst to feedstock ratio were identified, to obtain the highest liquid product yield, based on previous background. The feedstock used consisted of end-of-life tires collected and reduced in size to 25x25 mm. The experimental tests were carried out in an existing semi-continuous horizontal tubular reactor, equipped with a vacuum, cooling, gas collection and venting system. The equilibrium catalyst from the fluidized catalytic cracking (FCC) unit was added. The reactor operated at a vacuum pressure of -20 inHg for 3 hours, with an average heating rate of 8 °C/min. Pyrolysis tests were performed at temperatures of 500, 550, 600 and 650 °C, varying the catalyst/raw material ratio by 0%, 10% and 20% as appropriate. The optimal conditions that maximize production were obtained through multiple linear regression using the Minitab statistical software. In addition, the analysis of the physicochemical characteristics of the liquid product obtained at the point of maximum yield was carried out, which are: ASTM D240, ASTM D5002, ASTM D86, ASTM D287, ASTM D445, ASTM D4377, ASTM D4292 and ASTM D86. In order to determine the chemical composition of the liquid product, the analytical technique of Fourier Transform Infrared Spectroscopy (FTIR) was performed. The highest liquid product yield was 52.40 (%m/m) at a temperature of 500 °C and the catalyst/raw material ratio was 17.77%, from the quality analysis it was characterized as a “selva” crude.

**Keywords:** pyrolysis, catalyst, waste, fuels, end-of-life tire

## **CAPITULO I: GENERALIDADES**

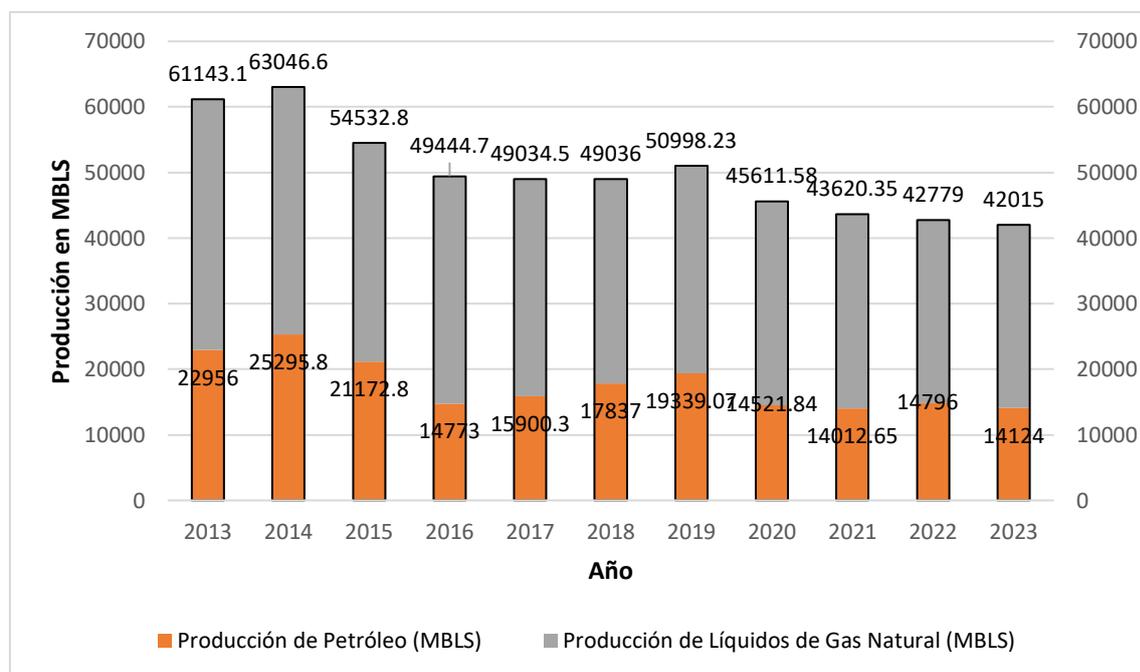
### **1.1. Introducción**

Existen serias dificultades energéticas por el abastecimiento de combustibles no solo a nivel regional, también a nivel mundial generando así un incremento de precios en los combustibles, así como desabastecimiento en diversas zonas. Asu vez, la tendencia energética mundial sigue orientada hacia la energía verde y sostenible (OSINERGMIN, 2021).

Petroperú asegura su suministro de petróleo crudo mediante la explotación nacional como se muestra en la figura 1 y a través de importaciones. En el caso de las adquisiciones locales peruanas, la mayor parte proviene de la región de Talara y se compra a precios internacionales. Una proporción menor proviene de la selva norte del Perú. Por otro lado, el petróleo crudo importado y sus derivados son obtenidos de Ecuador, Estados Unidos y Colombia. El Perú se caracteriza por ser un importador neto de petróleo y sus derivados, lo que lo hace vulnerable a las fluctuaciones del mercado mundial que se ve, reflejadas en los precios globales. Factores geopolíticos, tecnológicos y especulativos también tienen un impacto significativo, afectando así a los mercados locales, sin que se implementen medidas para mitigar estos efectos (Aquino y Francesqui, 2018).

**Figura 1**

Producción de hidrocarburos líquidos durante los años 2013 al 2023



*Nota. La producción fiscalizada nacional de hidrocarburos líquidos donde se consigna la suma de la producción de petróleo y líquidos de gas natural a nivel nacional en miles de barriles (MBLS). Adaptado de la revista estadística en cifras de hidrocarburos y el anuario estadístico de hidrocarburos (MINEM, 2024)*

En el ámbito de la obtención de combustibles, se exploran diversas alternativas, entre las cuales se destaca el proceso de pirólisis. Este método implica la descomposición térmica de materiales en ausencia de oxígeno, lo que facilita la ruptura de cadenas largas de hidrocarburos. Con la evolución de las técnicas, ha surgido una variante más eficiente y respetuosa con el medio ambiente conocida como pirólisis catalítica. Este proceso permite la producción de combustibles y productos químicos utilizando neumáticos desechados o fuera de uso (NFU). La pirólisis catalítica produce líquidos, sólidos y gases como productos. De entre estos, se considera de mayor relevancia el rendimiento del producto líquido, destacando el aceite de pirólisis o TPO (por sus siglas en inglés, Thermal Pyrolysis Oil). Este

aceite, de color marrón oscuro, está compuesto por una variedad de hidrocarburos. Además, contiene altas concentraciones de productos químicos específicos de alto valor agregado, como isopreno, estireno y limoneno (Arabiourrutia et al., 2020).

Por otro lado, los catalizadores usados en el craqueo catalítico fluidizado (FCC) en las refinerías de petróleo, pueden ser reutilizados en la degradación térmica de neumáticos de desecho o neumáticos fuera de uso (NFU) para resolver así, los graves problemas ambientales causados por los catalizadores gastados de FCC (considerados como residuos sólidos peligrosos) (C. Wang et al., 2019).

Durante el proceso experimental, se tomaron en consideración dos variables principales: la temperatura (°C) y la cantidad de catalizador utilizado en relación con la materia prima (%m/m). La operación se llevó a cabo con un tamaño de partícula constante de 25x25 mm y manteniendo una presión absoluta de 9.92 inHg o la presión de vacío estable de -20 inHg.

En este estudio, se realizó una investigación experimental en el laboratorio del grupo de investigación en procesos termoquímicos y energéticos de la Universidad Nacional de Ingeniería (UNI), para la degradación térmica por pirólisis catalítica de neumáticos fuera de uso procedentes de camiones cisterna, utilizando catalizadores de equilibrio (E-Cat) procedentes de una refinería local.

El propósito de esta investigación es obtener combustibles líquidos a través de la pirólisis catalítica de neumáticos usados, específicamente aquellos provenientes de camiones cisternas utilizados en el transporte y distribución de hidrocarburos líquidos. Este estudio es un posible aporte hacia la diversificación de la matriz energética nacional.

## **1.2. Planteamiento del problema**

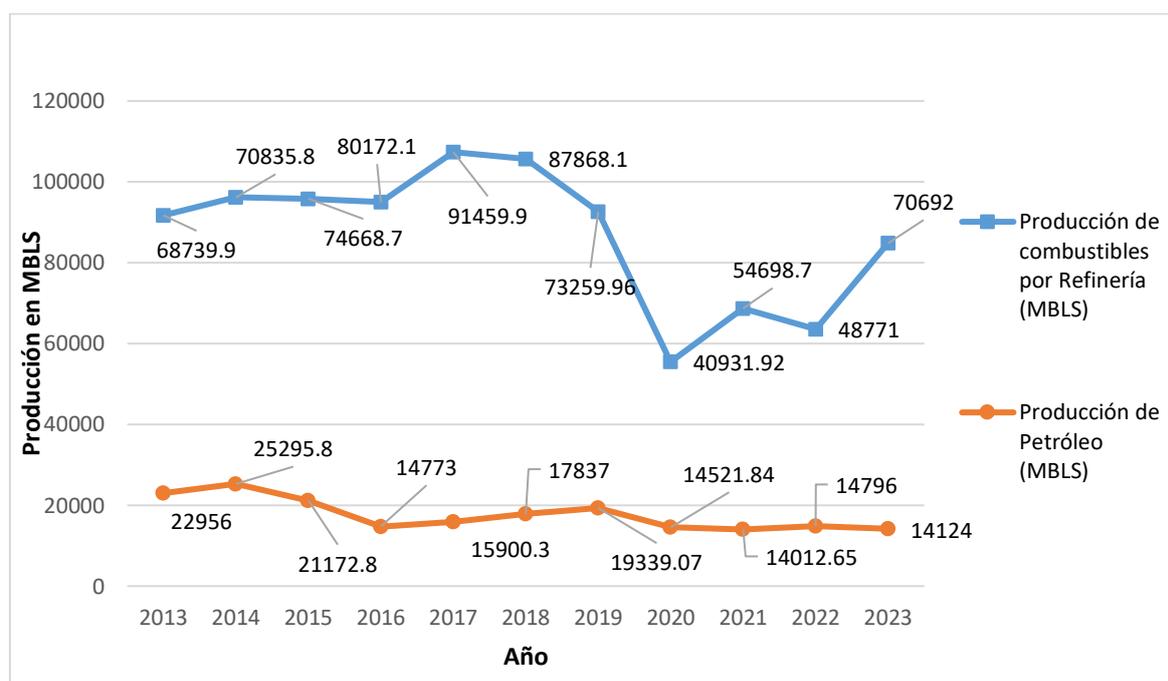
El consumo de hidrocarburos del país sigue dependiendo de las importaciones de petróleo y derivados, siendo el diésel el producto del sector externo más dependiente. El

papel de una refinería de petróleo es fundamental para transformar el petróleo (principalmente importado) para producir derivados y satisfacer la demanda interna de combustible (OSINERGMIN, 2021).

Según datos publicados en la página oficial del Ministerio de Energía y Minas (MINEM), El Perú importa más del doble en combustibles líquidos que el petróleo crudo que produce como se muestra en la figura 2.

**Figura 2**

Producción de combustibles líquidos en el Perú durante los años 2013 al 2023



*Nota. La producción fiscalizada nacional de combustibles líquidos por refinería donde se consigna la suma de los productos terminados a nivel nacional en miles de barriles (MBLS).*

*Adaptado de la revista estadística en cifras de hidrocarburos y el anuario estadístico de hidrocarburos (MINEM, 2024)*

Las importaciones de petróleo son cruciales para la industria de hidrocarburos en el Perú, ya que la producción nacional no puede satisfacer la demanda interna (Aquino y Francesqui, 2018).

Por ello, es fundamental conocer los datos relacionados con la importación de petróleo en el país. La capacidad instalada de las refinerías nacionales fue diseñada para procesar aproximadamente 240 mil barriles por día (MBPD) (MINEM, 2023). Sin embargo, en 2023, la producción nacional de petróleo crudo alcanzó solo los 40 MBPD (equivalentes a 14124 MBLS o miles de barriles), lo que sugiere que se debería importar un aproximado de 200 MBPD de crudo para cubrir la capacidad de refinación instalada.

A pesar de esta diferencia, la demanda nacional total de combustibles líquidos para 2024 es de aproximadamente 218.33 MBPD, según el Sistema de Control de Órdenes de Pedido (SCOP) de (OSINERGMIN, 2024). Además, la demanda total de productos refinados en 2023 fue de 279.12 MBPD (o 100484 MBLS), según (MINEM, 2024). Cabe destacar que la demanda de productos distintos a combustibles líquidos, como gasolinas, gasoholes, diésel, combustibles para aviación y buques, asciende a 60.79 MBPD, cifra que supera ampliamente la producción nacional de crudo.

En el proceso de craqueo catalítico fluidizado (FCC) se utiliza catalizadores de equilibrio (E-Cat), los cuales pueden ser aplicados en el proceso de pirólisis. La legislación actual en el Perú considera al catalizador gastado como un residuo peligroso, el Organismo de Evaluación y Fiscalización Ambiental (OEFA) es el ente encargado, de hacer que el generador de los residuos disponga adecuadamente de ellos. De lo antes mencionado aún no se cuenta con datos oficiales recopilados y publicados sobre el volumen del catalizador dispuesto anualmente en los rellenos de seguridad (Ramos y Pretell, 2020).

Además, al finalizar su vida útil, la disposición inadecuada de estos catalizadores usados en procesos petroquímicos como el FCC representa una seria preocupación ambiental

debido a la presencia de elementos como metales pesados y otros compuestos nocivos en su composición. Esta situación puede resultar en una significativa contaminación ambiental (Naranjo et al., 2024).

Debido al aumento del uso de los vehículos en los últimos años, se ha suscitado un incremento exponencial en la producción, uso y eliminación de neumáticos en todo el mundo, generando un impacto ambiental significativo. Debido a esto, se sigue utilizando métodos como la quema directa o la quema al aire libre (Ochoa y Mahecha, 2018).

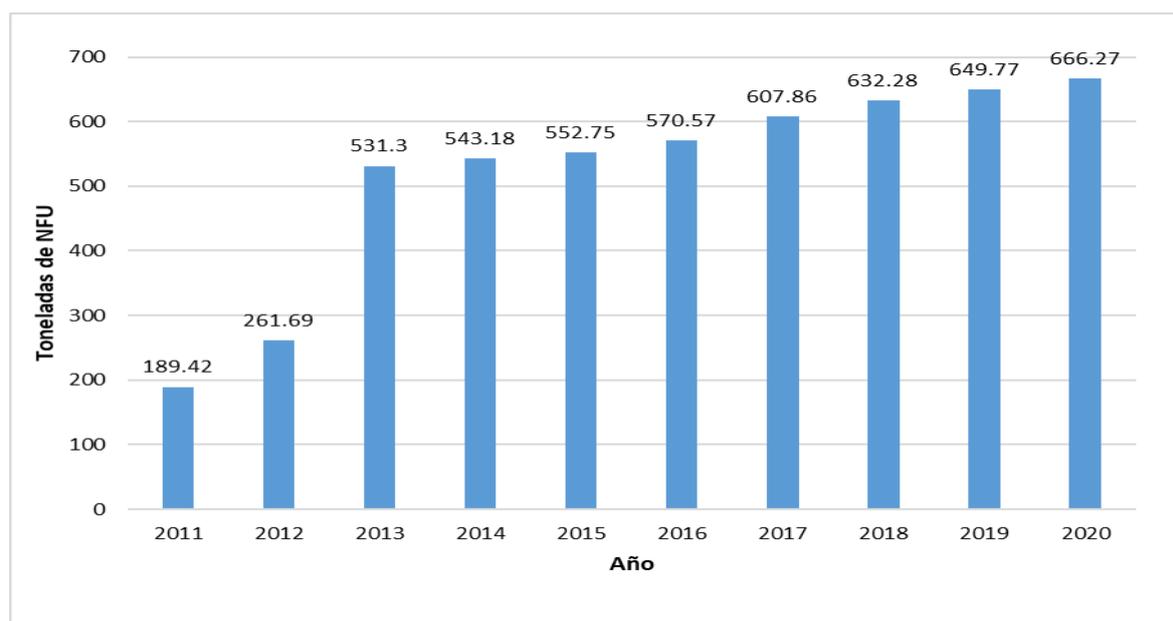
Actualmente, no se cuenta con datos actualizados sobre la cantidad de neumáticos fuera de uso en el país. Sin embargo, según información proporcionada por el Ministerio del Ambiente (MINAM), en el año 2018 ingresaron al mercado cerca de 3.6 millones de neumáticos a nivel nacional, equivalente a 67 mil toneladas, de los cuales 840 000 mil neumáticos pertenecen a camiones y buses con peso promedio para el neumático de 52.5 kilos respectivamente (Ministerio del Ambiente, 2021).

Por otro lado, el Organismo Supervisor de la Inversión en Energía y Minería (OSINERGMIN) cuenta con información histórica de registros hábiles de las empresas registradas y encargadas del transporte de hidrocarburos. De la cantidad de vehículos inscritos, en su página web, como se muestra en el anexo 6. Se puede recabar datos e información para realizar el estimado de los neumáticos utilizados por los camiones cisterna para el transporte de hidrocarburos líquidos en la región Cusco, se consideró que los camiones cisterna como mínimo tienen 6 neumáticos y pesan en promedio 52.5 kg. Donde se muestra que para el año 2020 dichas empresas tuvo un equivalente de 666.27 toneladas de neumáticos solo para camiones cisternas encargados del transporte de hidrocarburos líquidos (gasolinas y diésel) como se muestra en la figura 3, que serán residuos al fin de su vida útil.

*Toneladas de neumáticos procedentes de camiones cisterna para el transporte de hidrocarburos líquido*

### **Figura 3**

Toneladas de neumáticos procedentes de camiones cisterna para el transporte de hidrocarburos líquidos



Nota. *Adaptado de (OSINERGMIN, 2022).*

#### ***1.2.1. Problema general***

- ¿Cuál es el rendimiento de los combustibles líquidos obtenidos mediante la pirólisis catalítica al vacío utilizando E-Cat, a partir de neumáticos fuera de uso?

#### ***1.2.2. Problemas específicos***

- ¿Cuál es el efecto de la temperatura y la relación del catalizador (E-Cat) con respecto a la alimentación de la materia prima, así como la interacción entre estos factores, sobre el rendimiento de los productos líquidos obtenidos mediante pirólisis catalítica al vacío de neumáticos fuera de uso?

- ¿Cuáles son los parámetros de temperatura y la relación del catalizador (E-Cat) con la materia prima que logren un mayor rendimiento de productos líquidos obtenidos mediante pirólisis catalítica al vacío de neumáticos fuera de uso?

- ¿Cuáles son las propiedades fisicoquímicas de los combustibles líquidos obtenidos bajo las condiciones que resultaron en un mayor rendimiento en la pirólisis catalítica al vacío de neumáticos fuera de uso?

### **1.3. Justificación**

El Perú produjo en el año 2016 alrededor de un millón setecientos cincuenta mil neumáticos fuera de uso, es decir, 45 000 toneladas de NFU (Velarde et al., 2018).

Según cifras del MINAM para el año 2021 la cifra anual de neumáticos desechados fue de 45.650 millones de unidades (MINAM, 2021).

Debido al incremento de residuos sólidos nacionales e internacionales y el impacto ambiental que estos generan, el reciclaje de desechos con énfasis en el medio ambiente y la sustentabilidad, motivan a investigar las diferentes aplicaciones de la pirólisis térmica como catalítica al vacío utilizando neumáticos fuera de uso. En la actualidad, el sector minero y de transporte son los principales consumidores de neumáticos, estos generan todo tipo de residuos entre cambios de aceite y el fin de la vida útil de los neumáticos, produciendo daños ambientales (Pretell et al., 2021).

En el país, no existe una investigación científica que utilice los NFU procedentes de camiones cisterna como materia prima de la pirólisis catalítica utilizando catalizadores E-Cat, pero existen investigaciones en pirólisis que toman como materia prima plásticos en general y neumáticos a partir de vehículos menores o los utilizados en minería, siendo las investigaciones más cercanas realizadas por Pretell et al. (2021) que toman como materia prima a los NFU provenientes de la industria minera y a su vez realizaron una investigación para reutilizar el catalizador (E-Cat) y su posterior aplicación en la pirólisis de plásticos. A

nivel internacional se tiene basta bibliografía de investigaciones realizadas en pirólisis y sus distintas formas, tomando como antecedentes los estudios aplicados a los NFU y catalizadores. Las investigaciones fueron realizadas conteniendo variables como la temperatura, el tamaño de partícula, la presión, la velocidad de calentamiento y diferentes tipos de catalizadores; sin embargo, son pocos los estudios de pirólisis catalítica a NFU utilizando catalizadores E-Cat, procedentes de la unidad de FCC teniendo en consideración la influencia en los rendimientos de los productos líquidos como son los trabajos realizados por C. Wang et al. (2019) en China y Arabiourrutia et al. (2020) en España.

El agotamiento de los combustibles fósiles y el aumento en la demanda de energía han impulsado a investigadores a explorar y desarrollar diversas fuentes de energía alternativas. La gestión de los residuos, como los Neumáticos Fuera de Uso (NFU), se presenta como una solución sostenible para satisfacer esta creciente demanda energética, convirtiendo estos desechos en recursos aprovechables y útiles (Mejia y Upegi, 2021).

Por las razones anteriormente mencionadas sobre la importación y demanda de combustibles y generación de residuos, en la actualidad en el mundo se están investigando métodos alternativos como el proceso de pirólisis catalítica y su aplicación en la producción de combustibles líquidos que ayuden a cubrir la demanda de energía y a su vez mitiguen el impacto ambiental generado por los NFU. Estos polímeros se pueden descomponer térmicamente en productos variables, como gases, líquidos y sólidos, cuyas cantidades relativas se pueden cambiar aplicando catalizadores y diferentes variables de operación como tamaño de partícula y temperatura. Utilizando diferentes catalizadores se han mejorado cualitativa y cuantitativamente las propiedades y los rendimientos de los productos líquidos (Hooshmand y Zandi-Atashbar, 2014).

## 1.4. Objetivos

### *1.4.1. Objetivo general*

- Evaluar el rendimiento de los combustibles líquidos obtenidos mediante la pirólisis catalítica al vacío utilizando E-Cat, a partir de neumáticos fuera de uso.

### *1.4.2. Objetivos específicos*

- Evaluar el efecto de la temperatura y la relación del catalizador (E-cat) con respecto a la alimentación de la materia prima, así como la interacción entre estos factores, sobre el rendimiento de los productos líquidos obtenidos mediante pirólisis catalítica al vacío de neumáticos fuera de uso.
- Determinar los parámetros de temperatura y la relación del catalizador (E-cat) con la materia prima que logren un mayor rendimiento de productos líquidos obtenidos mediante pirólisis catalítica al vacío de neumáticos fuera de uso.
- Evaluar las propiedades fisicoquímicas de los combustibles líquidos obtenidos bajo las condiciones que resultaron en un mayor rendimiento en la pirólisis catalítica al vacío de neumáticos fuera de uso.

## CAPÍTULO II: MARCO TEÓRICO

### 2.1. Antecedentes de la investigación

#### 2.1.1. Antecedentes nacionales

El trabajo de investigación realizado por Pretell et al. (2021), titulado “*Producción de Combustibles Líquidos por Pirólisis al Vacío de Neumáticos Usados*”, se centró en el rendimiento y la calidad de los combustibles líquidos obtenidos mediante la pirólisis al vacío de NFU. Los investigadores utilizaron un reactor horizontal tubular semicontinuo y una bomba de vacío. Se realizaron experimentos a escala de laboratorio y piloto, donde el máximo rendimiento de producto líquido se obtuvo a 550 °C y 30.52 kPa abs de presión, con una variación granulométrica de 25x25 mm. En estas condiciones, el rendimiento del producto líquido fue del 54,32%, el rendimiento del producto sólido fue del 39,87% y el rendimiento del gas fue del 5,81%.

El trabajo de tesis realizado por Peña (2023) “*Evaluación de la pirólisis catalítica de neumáticos en desuso con zeolita sintetizada a partir de puzolana y sintética como catalizadores*”, investigó la aplicación de las zeolitas sintetizadas en un proceso de pirólisis de neumáticos en desuso, en comparación con una zeolita sintética ZSM-5 y pirólisis térmica, además, se realizaron un análisis del rendimiento de los productos líquidos, sólidos y gases recuperados en relación a la influencia de las variables del proceso tipo de zeolita (PZ1, PZ2, PZ3 y ZSM-5), proporción catalizador/neumático (2% y 5%) y temperatura (450°C y 575 °C) con una rampa de calentamiento de 10 °C/min , el mayor rendimiento que obtuvieron en productos sólidos y líquidos corresponde al experimento realizado con la zeolita PZ3 – 5% proporción catalizador/neumático – 575 °C, donde se obtuvo 37.43% de recuperación de producto sólido y 53.87% de recuperación de producto líquido y por ultimo realizaron la caracterización mediante FTIR de los productos líquidos recuperados con la finalidad de evaluar la calidad y posibles aplicaciones.

### 2.1.2. Antecedentes internacionales

El trabajo de investigación realizado por Aravena (2016) *“Estudio de pirolisis catalítica de desechos provenientes del caucho”*, se centró en determinar el efecto de la temperatura de reacción, carga y tipo de catalizador sobre los productos de reacción. Para la pirólisis térmica y catalítica del caucho proveniente de desechos triturados a un tamaño de entre 2 y 5 mm de largo en un reactor tubular semibatch, evaluaron inicialmente con TGA el rango de temperaturas de degradación térmica del neumático que pusieron en mg, el cual dio dos picos (“picos”), donde el SBR se degradaba a altas temperaturas y el NR a bajas temperaturas, para este estudio utilizaron temperaturas de 450, 620, 680 y 750 °C, el tiempo de reacción fue dependiente de la velocidad de calentamiento, que iba de 60 a 90 °C/min, siendo mayores las del horno del experimento como también sus cargas de alimentación. Se utilizaron catalizadores modificados, incluyendo zeolitas naturales y sintéticas (mordenita protonada HMOR y HZSM-5) en proporciones 1:1 y 2:1. La pirolisis sin catalizador produjo un rendimiento de líquidos del 57%, mientras que, a la temperatura más alta de 750 °C, el rendimiento fue del 46%. El uso de HMOR aumentó el rendimiento de gases entre un 3% y un 5%. El estudio concluyó que los mejores rendimientos de productos condensables se obtienen a bajas temperaturas, incluso con catalizadores, siendo 450 °C la temperatura óptima.

El trabajo de investigación realizado por Tian et al. (2022) *“Study of waste rubber catalytic pyrolysis in a rotary kiln reactor with spent fluid-catalytic-cracking catalysts”*, investigó la aplicación de catalizadores de craqueo catalítico fluido (FCC) gastados en el proceso de pirólisis de caucho residual y analizó los mecanismos de pirólisis de los catalizadores FCC empleados en los residuos de caucho sin vulcanizar, caucho natural (NR), caucho de estireno-butadieno (SBR) y caucho de cis-1,4-polibutadieno (BR), como también de caucho vulcanizado (NR-S, SBR-S, BR-S), destacando su potencial para mejorar la

eficiencia y aumentar el rendimiento del producto líquido. Los catalizadores FCC agotados se incorporaron al horno de pirólisis en proporciones específicas, con una velocidad de calentamiento gradual de 60 a 120 °C/h hasta alcanzar la temperatura final de 400 °C. La estructura molecular del caucho desempeña un papel crucial en los rendimientos de aceite, donde el BR, con una estructura de cadena molecular regular, mostró una mayor energía de ruptura de enlaces químicos en comparación con el NR y el SBR, que contienen cadenas laterales, largas y fáciles de romper aumentando la formación de gases y disminuyendo el rendimiento de TPO. En el proceso de pirólisis térmica del caucho no vulcanizado, el caucho de butadieno (BR) mostró el mayor rendimiento de aceite de pirólisis o TPO, alcanzando un máximo del 83.67%. Este rendimiento fue superior al del caucho natural (NR) y el caucho estireno-butadieno (SBR). En contraste, el rendimiento de TPO disminuyó en los cauchos vulcanizados. Sin embargo, el rendimiento de TPO mejoró considerablemente cuando se aplicaron catalizadores de FCC gastados tanto en la pirólisis del caucho no vulcanizado como en el vulcanizado.

El trabajo de investigación realizado por R. K. Singh et al. (2019) "*Interaction of three categories of tyre waste during co-pyrolysis: Effect on product yield and quality*", se centró en la mezcla de tres residuos de llantas diferentes, neumático de vehículo ligero (LVT), neumático de vehículo mediano (MVT) y neumático de vehículo pesado (HVT), se pirolizó a 750 °C y se analizaron en una atmósfera inerte (nitrógeno) en el aparato TG (Análisis termogravimétrico), cada corrida se realizó en condiciones no isotérmicas con una masa de muestra de 15-20 mg, una velocidad de calentamiento de 20 °C/min y con proporciones variables (H: M: L) : (3:1:3, 1:3:1 y 1:1:3) y/o (1:1:1) , para evaluar el rendimiento de los productos y sus características. La fracción superior de LVT en la mezcla redujo la temperatura de degradación del neumático mixto debido a la presencia dominante de caucho natural (NR), una mayor fracción de HVT aumentó la temperatura de degradación

debido a una mayor presencia de (BR). MVT produjo un rendimiento alto de residuo carbonoso, ya que tenía el mayor contenido de cenizas y más caucho de estireno butadieno (SBR) y el rendimiento de aceite de pirolisis más bajo debido a menos presencia de NR y caucho butadieno (BR). HVT produjo el carbón más bajo y el máximo rendimiento de aceite (62,67 %), seguido del LVT (47,00 %) y MVT (45,17 %), debido a la presencia de NR, BR y bajo contenido de cenizas.

El trabajo de investigación realizado por Acosta et al. (2013) "*Estudio preliminar de la producción de aceite y carbón mediante pirolisis intermedia de caucho de llantas usadas*", se centró en el estudio de las variables de proceso como tamaño de partícula, tiempo de reacción y temperatura para ver su impacto en el rendimiento de los productos. El análisis termogravimétrico que realizaron fue dirigido a identificar los principales valores de temperatura en los cuales se presenta el proceso de descomposición térmica. La pirólisis intermedia del caucho de neumático usado lo realizaron en una atmósfera inerte con N<sub>2</sub> con una presión relativa de trabajo de 1 bar utilizando un reactor de lecho fijo, y una rampa de calentamiento de 30 °C/min en promedio y los rangos de cada variable utilizados fueron temperaturas entre 500 – 637 °C, Tr (Tiempo de reacción) entre 20 – 180 min y TP (tamaño de partícula) entre 0.85 – 2.1 mm. El sistema de pirólisis conto con control de temperatura, un sistema de enfriamiento de gases de salida equipado con dos trampas para gases condensables y un medidor de flujo de gases que se liberan a la atmosfera. El rendimiento adecuado que obtuvieron fue de  $52.50 \pm 1.63\%$  de aceite de pirolisis,  $38.94 \pm 1.05 \%$  de carbón y  $8.55 \pm 2.68\%$  de gas a las condiciones de (500 °C) de temperatura, tamaño de partícula de 0.85-1mm y tiempo de reacción de (180 min), el tamaño de partícula no tuvo una influencia directa dentro de los rangos seleccionados a comparación con la temperatura y que al realizar un análisis de la variable de respuesta, con el fin de maximizar el

rendimiento de aceite se encuentra que las mejores condiciones para la producción de aceite están dadas a temperaturas bajas (502 °C) y tiempos de reacción prolongados (192 min).

El trabajo de investigación realizado por B. Wang et al. (2021) "*Catalytic and noncatalytic fast pyrolysis of waste tires to produce high-value monocyclic aromatic hydrocarbons*", se centró en el estudio de la pirólisis rápida catalítica y no catalítica de llantas de desecho en un pirolizador analítico de 0.60 mg, acoplado con cromatografía de gases y espectrometría de masas para obtener valiosos hidrocarburos aromáticos monocíclicos (MAH), especialmente benceno, tolueno, etilbenceno, xileno, (BTEX). Los factores que influyen, como la velocidad de calentamiento (10-20000 °C/s), la atmósfera (He, H<sub>2</sub>, N<sub>2</sub>, CH<sub>4</sub>, O<sub>2</sub>), la temperatura (500-800 °C) y el tiempo de reacción (5-30 s) fueron realizados, donde se obtuvieron 40,91% MAH (contiene 17,98% de BTEX) a 500 °C/s, a 30s y 750 °C en atmósfera de helio, elegidos como parámetros adecuados para la pirólisis rápida según su influencia estudiada y sin catalizador. En comparación con el reactor de lecho fijo convencional, los microrreactores tienen menos materia prima, lo que da como resultado una mayor velocidad de calentamiento a la misma temperatura y un mayor tiempo de proceso. En el proceso de pirólisis catalítica rápida, investigaron catalizadores de zeolita. El catalizador H $\beta$  es beneficioso para la formación de hidrocarburos aromáticos, especialmente MAH (hasta 53.09 %), mientras que el contenido de BTEX fue solo de 9,05%. Los resultados indicaron que el catalizador H $\beta$  tiene una fuerte capacidad de aromatización y una débil selectividad por BTEX. El catalizador MCM-41Q conduce a la formación de BTEX (22.35%), ya que el contenido de MAH fue del 46.09%, lo que indica que el catalizador MCM-41Q tiene una fuerte selectividad por BTEX, pero su capacidad de aromatización es más débil que la del catalizador H $\beta$ .

El trabajo de investigación realizado por Ayanoglu & Yumrutaş (2016) "*Production of gasoline and diesel like fuels from waste tire oil by using catalytic pyrolysis*", se centró en

la pirólisis de neumáticos usados mediante el uso del método de destilación catalítica para obtener combustibles. El producto WTO (Aceite de pirólisis de neumáticos usados) tuvo una proporción del 40% se produjo con un 42% de carbón, y el 18% producto gaseoso de un tratamiento térmico en un reactor tubular cilíndrico de pirolisis. El WTO se mezcló con dos aditivos, zeolita natural y cal, en diferentes proporciones. Cada muestra se puso en una unidad de destilación pirolítica para obtener producto de combustibles ligero y pesado (mezcla). Determinaron las características de los combustibles producidos y realizaron también pruebas de destilación a cada uno. Como resultado de estas pruebas, la muestra de WTO mezclada con cal en una proporción del 10% en peso mostró los mejores resultados, adquirió las temperaturas de destilación óptimas y propiedades similares al del combustible diésel. Las características de esos combustibles livianos y pesados se asemejaron a las de la gasolina y el diésel, que se denominaron GLF (combustible similar a la gasolina) y DLF (combustible similar al diésel), respectivamente. Las fracciones de los combustibles producidos fueron el 18% en peso de WTO para el combustible ligero y el 70% en para el combustible pesado y el otro producto era el 12% de los residuos. La curva TG-DTG que desarrollaron de los desechos de llantas, contienen tres componentes principales como NR, SBR y BR, genero un pico agudo alrededor de 369.85 °C, un pico redondo en el rango de 399.85-459.85 °C y otro pico agudo alrededor de 459.85 °C en su curva DTG, la curva de degradación indica que la llanta de desecho estaba compuesta principalmente de SBR y NR.

El trabajo de investigación realizado por Velázquez et al. (2016) por "*Pirolisis convencional de neumáticos en desuso para la producción de combustibles líquidos*" analiza el proceso de pirolisis aplicado a neumáticos fuera de uso para generar productos líquidos, como combustibles, utilizaron un diseño factorial  $2^3$  con puntos centrales además de aplicar la regresión lineal múltiple para evaluar el impacto de tres variables principales: la temperatura (450 a 550 °C), la tasa de calentamiento (10 a 20 °C/min) y el tamaño de

partícula (1 a 3 mm). Los resultados sugieren que la tasa de calentamiento y sus interacciones no tienen un efecto estadísticamente significativo sobre el rendimiento del producto líquido, basándose en un modelo matemático con un 95% de nivel de confianza.

## **2.2. Marco conceptual**

### ***2.2.1. Neumáticos***

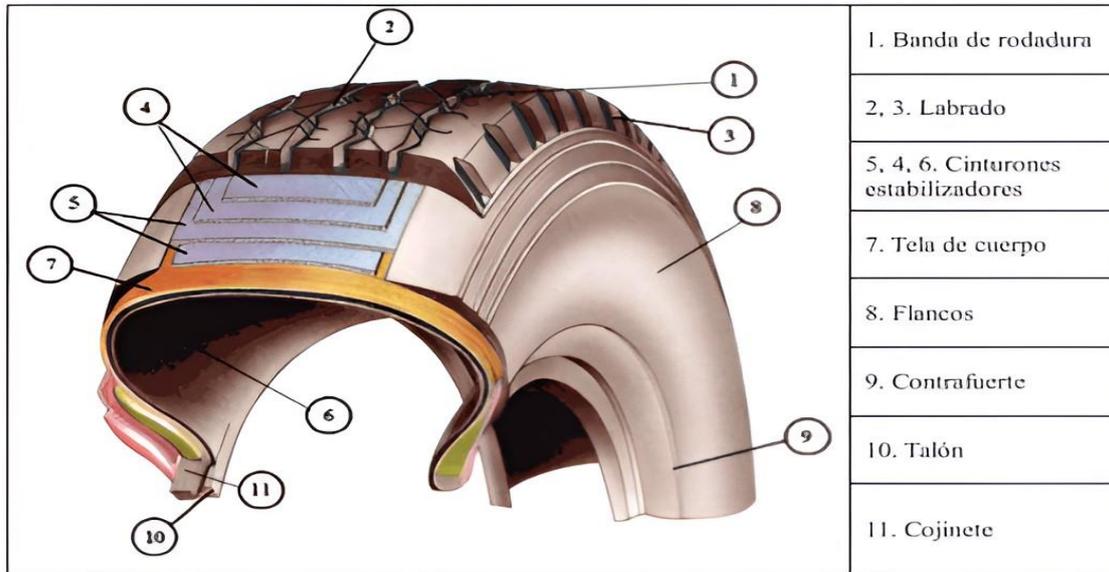
El MINAM (2021), define a los neumáticos como el componente mecánico de la rueda de un vehículo, fabricado a base de caucho, productos químicos, hilos textiles y/o alambres y otras materias.

El proceso de fabricación para los neumáticos es bastante complejo e involucra muchos insumos diferentes, que incluyen caucho natural, cauchos sintéticos, negro de humo, trementina, azufre, hilo, tela; así como, productos derivados del petróleo y aceites procesados que facilitan su construcción (ver la figura 4). En definitiva, la combinación de todos estos insumos y materias primas dan como resultado un producto resistente a altas temperaturas, al roce con diferentes suelos y diferentes climas. Debido a esta resistencia de los materiales ensamblados que componen el neumático, al final de su vida útil y sin intervención humana, se estima que el neumático se degrada en varios siglos (Grados, 2018).

Un neumático es una estructura muy compleja formada por más de doscientas partes. Su componente principal es el caucho, que supone la mitad de su masa y puede ser de dos tipos: natural o sintético. El caucho natural le da elasticidad al neumático, mientras que los diferentes tipos de caucho sintético le dan estabilidad térmica (Velarde et al., 2018).

**Figura 4**

Esquema de componentes estructurales de un neumático



*Nota.* Adaptado de (Meza, 2014).

El “negro de humo” es un compuesto carbonoso obtenido por combustión o pirólisis parcial de gas natural o de hidrocarburos pesados, permite obtener compuestos más resistentes a la rotura, al desgaste y confiere a los neumáticos su característico color negro. El ciclo de vida del neumático se refiere a todo el proceso desde la fabricación del neumático hasta la disposición final de los residuos, y se le ha dado el nombre de NFU (Olivares, 2016).

Los neumáticos son estructuras complejas formados principalmente por elastómeros (cauchos sintéticos y naturales), fibras reforzantes y aditivos como se ve en la tabla 1. Los neumáticos principalmente compuestos por cauchos naturales y sintéticos son cadenas largas de carbonos e hidrógenos esto se puede apreciar en la composición química como se observa en la tabla 2.

**Tabla 1**

Composición porcentual de materiales que componen un neumático

Material	Composición % masa	
	Automóviles	Camiones
Caucho Natural	14	27
Caucho sintético	27	14
Negro de humo	28	28
Acero	14	15
Antioxidantes y rellenos	17	16

*Nota. En la tabla 1 se observa la composición de los neumáticos varía de acuerdo al porcentaje en peso de sus componentes elastómeros. Adaptado de (Sebastián y Urrego, 2019).*

**Tabla 2**

Composición porcentual química de un neumático

Componentes	Composición (% masa)
Carbono	70-83%
Hidrogeno	5-7.5%
Nitrógeno	1.5%
Azufre	1.2-1.9%
Oxígeno	5%
Zinc	1.2-1.7%
Hierro	5-18%
Otros	5%

*Nota. En la tabla 2 se observa que los neumáticos están conformados por grandes cantidades de carbono e hidrógeno por ser derivados de los hidrocarburos. Adaptado de (Mejia y Upegi, 2021).*

Existen diferentes tipos de caucho como se observa en la tabla 3, el empleo y combinación de estos varía de acuerdo a las características que se desee obtener para el producto final.

**Tabla 3***Tipos de elastómeros*

<b>Tipos de Caucho</b>	
<b>Caucho Natural</b>	Caucho natural (CN o NR)
<b>Caucho Sintético</b>	Estireno-butadieno (SBR)
	Polibutadieno (BR)
	Isopreno sintético
	Etileno-propileno (EPM-EPDM)
	Isobutileno-isopreno (IIR)
	Caucho de nitrilo (NBR)
	Policloropreno (neopreno)

*Nota.* Adaptado de (Meza, 2014).

### **2.2.2. Neumáticos Fuera de Uso (NFU)**

El termino NFU se refiere a cada neumático que el generador (persona natural o jurídica, entidad pública o privada), que, en razón de sus actividades domésticas, industriales, comerciales, de servicios, administrativas o profesionales, utilizan neumáticos y generan residuos de estos, los cuales deben ser tratados según las reglamentaciones vigentes (MINAM, 2021).

### **2.2.3. Tipos de cauchos**

#### **a) Caucho Natural (CN)**

El caucho es un polímero compuesto por unidades encadenadas de un hidrocarburo elástico llamado isopreno o 2-metilbutadieno, el cual puede obtenerse del látex de diferentes plantas, tales como: *Castilloa elástica* (árbol de hule), *Ficus elástica* (árbol de caucho), *Urceola elástica* y *Funtumia elástica*. Esta elasticidad se debe a que estas cadenas se pueden estirar (alargar) y el entretrejo hace que el espiral se vuelva a enrollar una vez que la tensión

es liberada. El caucho natural (CN) o natural rubber en inglés (NR), es un elastómero que puede ser estirado también deformado y puede recuperar su forma original. (Reyes, 2015).

El caucho natural fue el primer elastómero conocido, ya que se obtenía en forma de látex como producto metabólico de algunas plantas. Actualmente, la mayor parte de este caucho proviene de plantaciones del árbol de (*Ficus elástica* H. brasiliensis). El procesamiento de concentración del látex contiene alrededor de 93,5% de poliisopreno, 2,1% de proteínas, 0,5% de carbohidratos, 2,4% de lípidos neutros, 1,2% glicolípidos y fosfolípidos, 0,2% componentes inorgánicos y 0,1% otros en masa (Bonilla, 2019).

### **b) Caucho Sintético**

Los cauchos sintéticos, técnicamente conocidos como elastómeros por sus propiedades elásticas y durabilidad, se preparan a partir de hidrocarburos insaturados provenientes del exceso residual de petróleo. Se obtiene artificialmente por reacciones químicas que condensan o polimerizan hidrocarburos insaturados (Reyes, 2015).

Los cauchos sintéticos son una especie de polímeros que forman parte de cadenas largas. Sus excepcionales características físicas, químicas y mecánicas los hacen distinguibles del caucho natural. Su aplicabilidad masiva se puede ilustrar por el hecho de que casi ha superado incluso el uso del caucho natural (Alarifi, 2022).

El caucho sintético representa alrededor del 60% de la producción total de caucho, es el más utilizado en el mundo y la industria de neumáticos es el mayor consumidor (Juárez et al., 2012).

- **Isopreno Sintético**

Las primeras ramas de la industria del caucho se centraron en la isomerización del dieno, especialmente del isopreno, ya que hasta ahora se conocía como un monómero de caucho natural. Se ha descubierto que el isopreno se puede convertir en productos similares

al caucho natural tratándolo con cloruro de hidrógeno y vulcanizándolo con azufre para hacerlo más flexible, duradero y resistente al calor (Al-lal et al., 2015).

Con el uso de catalizadores el isopreno se acerca a la composición del caucho natural, pero en la práctica varía algo en la longitud y estructura de moléculas (Criollo, 2014).

- **Isobutileno-Isopreno (IIR)**

Un tipo de caucho sintético es el caucho de butilo y fabricado mediante la polimerización de aproximadamente un 98 % de isobutileno y un 2 % de isopreno en masa. Se trata de un copolímero. La abreviatura para este caucho es IIR (de sus siglas en inglés, *Isobutylene Isoprene Rubber*), este caucho tiene una impermeabilidad excelente, y los largos segmentos de poliisobutileno de su cadena polimérica le dan buenas propiedades de flexión (García y Campoy, 2017).

Es un copolímero en solución de isobutileno, con porción de isopreno. El poliisobutileno es totalmente saturado y el isopreno proporciona dobles enlaces para su vulcanización (Criollo, 2014).

- **Caucho de Estireno-Butadieno (SBR)**

Es un copolímero de estireno y 1,3-butadieno. Una carga típica de estireno utilizada en los compuestos de caucho es del 25 % en masa. La presencia de butadieno durante la vulcanización favorece la reticulación con azufre, haciéndolo más flexible que el caucho natural. El estireno permite tener un caucho más duro y tenaz, permitiendo que no cristalice bajo grandes esfuerzos, por lo cual el SBR (de sus siglas en inglés *Styrene Butadiene Rubber*) se utiliza en mayor proporción para la fabricación de neumáticos debido a su mayor elasticidad (Meza, 2014).

Está conformado por 75% butadieno y 25% estireno en masa. Sin vulcanizar es soluble en la mayoría de los solventes hidrocarburos. Por eso, necesita aceleradores poderosos para vulcanizar (Criollo, 2014).

El estireno butadieno o SBR es más barato que el caucho natural, por lo que es más popular y se usa en la fabricación de neumáticos durante mucho tiempo, pero antes de eso, deben tratarse, porque aumentan su temperatura con facilidad y absorben fácilmente aceites y combustibles derramados (Castro, 2008).

- **Caucho de Etileno (EPDM)**

El caucho etileno-propileno-dieno tipo M también conocido como EPDM es un elastómero a base de etileno-propileno. Este material contiene entre 45 y 75% de etileno en masa; cuanto mayor el porcentaje de este más resistente es el caucho, es resistente a la temperatura, agentes químicos en general, abrasión y desgaste a su vez que es un buen aislante eléctrico pero susceptible de ser atacado por aceites y petróleos (Salvador, 2021).

Está conformado por hidrocarburos de etileno y propileno, el cual el etileno conforma el 50% al 65% en masa. Los dos tienen una resistencia a la luz solar, al ozono y al envejecimiento (Criollo, 2014).

- **Polibutadieno (BR)**

El butadieno, compuesto por dos enlaces dobles, puede dar origen a diversas estructuras poliméricas. Una de ellas es el polibutadieno vinilo-1,2 (polibutadieno), formado por la adición de solo uno de los enlaces dobles. En la actualidad, se reconocen tres configuraciones vinílicas posibles: isotáctica, sindiotáctica y atáctica (Bosques, 2014).

Los polibutadienos se utilizan en la industria de los neumáticos como componentes clave de los compuestos de caucho para mejorar las propiedades finales deseadas, como la reducción de la resistencia a la rodadura y la abrasión (Vallejo, 2011).

El polibutadieno proporciona a los neumáticos una alta resistencia al desgaste, buena resistencia a la temperatura y muy buen comportamiento frente al envejecimiento. Sin embargo, exhibe baja adherencia a una superficie húmeda generando deslizamiento por eso se mezcla con SBR o CN (Castro, 2008).

Sus principales características de este tipo de caucho es poseer una flexibilidad muy alta, sobrepasando al hule natural. Buena resistencia a la abrasión, y flexibilidad a baja temperatura (Criollo, 2014).

- **Caucho de Nitrilo (NBR)**

El caucho nitrilo o NBR (por sus siglas en inglés *Nitrile-Butadiene Rubber*) es un elastómero copolímero sintético de butadieno y acrilonitrilo, ampliamente usado, gracias a su relación costo/beneficio, en aplicaciones donde se requiere la combinación de propiedades como resistencia a grasas y aceites, tiene un valor bajo de compresión-set, posee resistencia al desgaste y resistencia al desgarre (Velasquez et al., 2015).

El butadieno proporciona flexibilidad a baja temperatura y todas las propiedades elásticas. El acrilonitrilo (ACN) es un componente altamente polar que hace del NBR un elastómero especial debido a su resistencia al aceite y la gasolina, así como a sus buenas propiedades mecánicas. Debido al efecto polar que provoca el grupo nitrilo, el caucho de nitrilo se comporta como un material semiconductor, por lo que no puede utilizarse para aislamiento eléctrico. Su resistencia a altas temperaturas y al envejecimiento se ve afectada al incrementarse el contenido de ACN (Orlando y Posada, 2019).

Es un copolímero de acrilonitrilo y butadieno, el acrilonitrilo varía desde 18% a 40%, cuando tiene mayor proporción de acrilonitrilo posee bajas propiedades físicas y alta resistencia al aceite (Criollo, 2014).

- **Cauchos Fluorados (FKM)**

Los fluoroelastómeros presentan enlaces carbono flúor en su estructura, son materiales de alto desempeño, muy estables térmica y químicamente. La estabilidad química y térmica de los fluoroelastómeros es proporcional al contenido de flúor. Estos materiales son utilizados cuando el ambiente es muy agresivo que ningún otro elastómero puede

mantener su integridad en él, soportando temperaturas de trabajo continuo de hasta 205 °C y una temperatura máxima de exposición de 300 °C. Las debilidades de estos elastómeros se encuentran en sus pobres propiedades mecánicas (Solorzano, 2010).

Los cauchos a base de flúor como son fluoro-carbono y fluoro-silicona están entre los elastómeros más caros del mercado (Criollo, 2014).

- **Policloropreno (Neopreno)**

El policloropreno es estructuralmente similar al caucho natural y se describió originalmente como un caucho natural sintético. La diferencia entre los dos es que el policloropreno contiene átomos de cloro en uno de los lugares donde el caucho natural tiene átomos de hidrógeno en las unidades monoméricas repetitivas que forman el polímero de cadena larga. La ventaja de este átomo de cloro es una mayor polaridad molecular, lo que contribuye en gran medida al desarrollo de la adhesión con diversas superficies. El policloropreno se desarrolló casi por accidente, mientras se realizaban experimentos con catalizadores de cloruro de cobre y gas acetileno en la década de 1920 (Varguez et al., 2016).

- **Caucho de silicona (VQM)**

Las siliconas son materiales poliméricos formados por cadenas alternas de átomos de silicio y oxígeno. El cual posee enlaces muy flexibles, y los ángulos formados por estos enlaces se pueden abrir y cerrar sin demasiada fuerza, lo que hace que toda la cadena principal sea flexible. Gracias a su estructura química se logran resultados técnicos y estéticos especiales difíciles de obtener con los productos tradicionales (Varón et al., 2013).

Poseen base de silicio, se distinguen por tener átomos alternados de silicio y oxígeno, tienen estabilidad térmica, aislamiento eléctrico, repele el agua y características anti adhesivas (Criollo, 2014).

#### **2.2.4. Aplicación de los neumáticos fuera de uso en la actualidad**

Los neumáticos usados en la actualidad tienen muchos usos y aplicaciones: utilizado para la generación de energía como combustibles en las industrias cementeras y para producir vapor, en construcción se utiliza como pavimento, asfalto, piso de piscina y aislamiento acústico, también está la recuperación medioambiental utilizado en la fabricación de techos eco-amigables, producción de pilas de combustible y tratamiento de aguas, a su vez sirve de materia prima para la producción de equipos de minería, elaboración de pegamentos industria automovilística , calzado y vestimenta en general (Sebastián y Urrego, 2019).

#### **2.2.5. Procedimientos de Manejo de Neumáticos Usados**

##### **a) Apilamiento**

Almacenar neumáticos en un espacio cerrado o abierto es una de las formas más comunes de almacenarlas. Esto es muy peligroso porque en algunas zonas especialmente calurosas puede convertirse en un caldo de cultivo propicio para elementos nocivos para la salud; además, del riesgo de incendio y explosión (Velarde et al., 2018).

##### **b) Entierro**

Consiste en depositar neumáticos en rellenos sanitarios. Para ello, se debe cortar el neumático. Son difíciles de compactar ya que tienden a flotar y a tomar demasiado volumen. La ventaja de este método de tratamiento es que el proceso degenerativo es lento (Velarde et al, 2018).

##### **c) Pirólisis**

La degradación térmica en ausencia de oxígeno permite que se rompan los enlaces químicos en los compuestos que forman los neumáticos, convirtiéndolos en simples cadenas de hidrocarburos. A través de este proceso, los compuestos originales de los neumáticos

(metales, carbono e hidrocarburos gaseosos) pueden reutilizarse en la producción de neumáticos nuevos u otras operaciones industriales (Velarde et al., 2018).

#### **d) Incineración**

Es un proceso costoso que produce contaminantes nocivos para la salud, como CO (monóxido de carbono), xileno, CO<sub>2</sub> (dióxido de carbono) y otros. El negro de humo también contiene una cantidad importante de hidrocarburos aromáticos que son nocivos para la salud cuando se inhalan (Velarde et al., 2018).

#### **e) Trituración criogénica**

Se realiza a una temperatura de -87 °C enfriado por nitrógeno líquido, lo que hace que la estructura del neumático sea quebradiza y fácil de moler. Esto requiere instalaciones especiales, por lo que a menudo no es económicamente viable. Además, el mantenimiento de los equipos tecnológicos se vuelve más complicado (Velarde et al., 2018).

#### **f) Trituración mecánica**

Molido mecánico de neumáticos. Los productos resultantes son de alta calidad porque están libres de contaminación, lo que facilita el uso de estos materiales en otros procesos y aplicaciones. Requiere una persona capacitada para separar los componentes (Velarde et al., 2018).

#### **g) Producción de energía**

Una vez preparados los neumáticos usados, se llevan a la caldera, donde se queman. El calor liberado hace que el agua disponible se evapore, convirtiéndola en vapor a alta presión y temperatura, que se envía a la turbina para su uso posterior. La energía tiene que ser convertida en otros procesos costosos para ser utilizada (Velarde et al., 2018).

### **2.2.6. Proceso de pirólisis**

Se considera un proceso termoquímico sin oxígeno, donde cualquier objeto en estudio sufre descomposición térmica y sin comburente, se utiliza para producir diversos

productos, como combustibles sólidos, líquidos y gaseosos. Así, el proceso brinda alguna oportunidad de convertir los desechos ricos en carbono en productos con valor para el mercado (Sebastián y Urrego, 2019).

La pirólisis es un proceso endotérmico que transfiere calor para descomponer las materias primas sin la adición de un gas reactivo, como aire u oxígeno. La eficiencia térmica de este proceso es de alrededor del 70% y puede incrementarse hasta el 90% con el uso de productos de pirólisis como combustible (Mejia y Upegi, 2021).

Semánticamente, termólisis es preferible a pirólisis porque piro, la palabra latina para fuego, implica la presencia de oxígeno y, por lo tanto, de intermediarios reactivos y portadores de oxígeno. La pirólisis, es un tratamiento que rompe los enlaces en condiciones no oxidantes (atmósfera inerte o vacío) y a temperaturas superiores a los 400 °C (Martínez et al., 2013).

#### **2.2.7. Tipos de pirólisis.**

Una clasificación general simple basada en las condiciones de operación (velocidad de calentamiento, tiempo de residencia volátil y temperatura) se puede dividir en pirólisis lenta y pirólisis rápida, la última de las cuales a veces se denomina flash, aunque el término también puede indicar una velocidad de calentamiento muy alta y un tiempo de residencia de vapor más corto que en la pirólisis rápida. También se puede clasificar en función del entorno utilizado como, hidropirólisis, pirólisis catalítica, pirólisis al vacío, y también según el sistema de calentamiento como pirólisis por microondas o plasma (Martínez et al., 2013).

##### **a) Pirólisis Catalítica**

En los últimos años, se han llevado a cabo nuevos estudios para explorar la aplicación de catalizadores usados o gastados en la pirólisis de neumáticos fuera de uso (NFU), dado que estos catalizadores aún poseen una alta actividad catalítica. El empleo de catalizadores

FCC gastados en la degradación térmica (pirólisis) de NFU puede mejorar la velocidad del proceso y la calidad de los productos obtenidos (C. Wang et al., 2019).

Los catalizadores FCC, utilizados en la industria del petróleo, presentan una estructura compleja en la que la zeolita es el componente principal, disperso en una matriz que incluye varios aditivos. Durante la operación normal de las unidades de FCC, estos catalizadores son sometidos a condiciones extremas en el regenerador, lo que provoca cambios significativos en su estructura y comportamiento. La exposición a altas temperaturas y vapor de agua puede causar la aluminización de la estructura de la zeolita, lo que resulta en la pérdida de microporosidad, la formación de material amorfo y una disminución de la actividad catalítica (Pertuz et al., 2023).

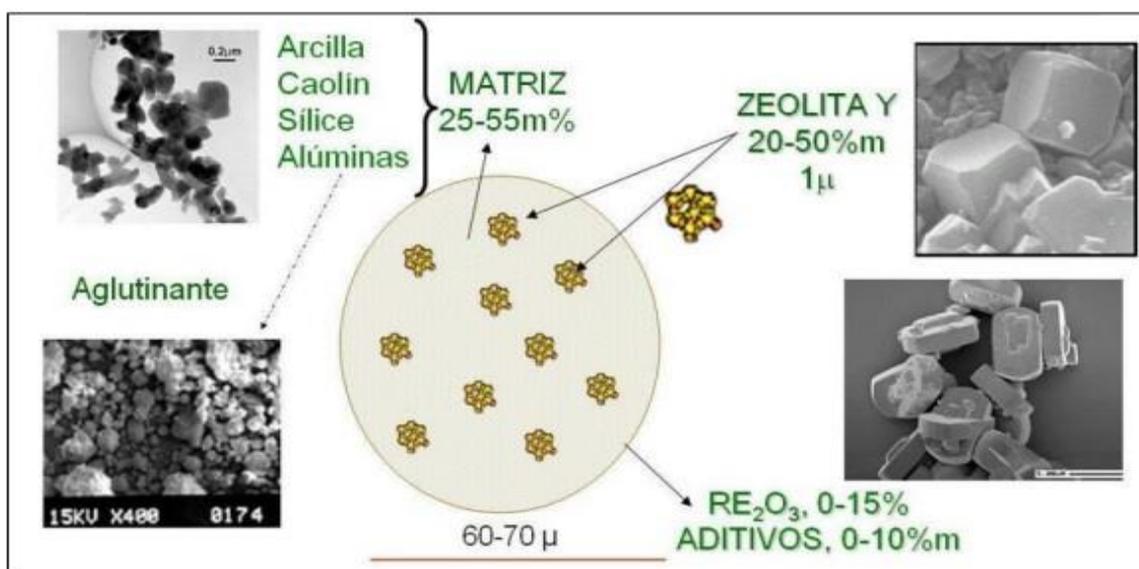
La pirólisis catalítica se define como un proceso pirolítico que incluye un material catalítico para mejorar el rendimiento y las propiedades de los productos obtenidos. La adición de un catalizador permite reducir la temperatura de descomposición y aumentar la selectividad de ciertos productos. Entre los catalizadores comúnmente empleados en este proceso se encuentran las zeolitas tipo Y y ZSM-5, la perlita expandida, y el rutenio (Ru/MCM-41) (Martínez et al., 2013; Navarro, 2007).

Actualmente, diferentes catalizadores han sido investigados por su rendimiento y efecto en la pirólisis. Gran parte de estos catalizadores también se utiliza en el refinamiento de hidrocarburos en la industria del petróleo. Las zeolitas, por ejemplo, son uno de los catalizadores más estudiados y empleados (Poblete, 2013). Adicionalmente, se ha demostrado que el catalizador E-cat, que es el catalizador circulante en la unidad de craqueo catalítico fluidizado (FCC), puede ser reactivado mediante tratamientos como la deshidratación y la calcinación, lo que elimina impurezas y recupera parcialmente su actividad catalítica (Ordoñez y Moreno, 2017).

En la figura 5 se muestra la estructura microporosa del catalizador utilizado en las unidades de craqueo catalítico fluidizado.

**Figura 5**

Estructura del catalizador utilizado en la unidad de craqueo catalítico fluidizado (FCC)



*Nota.* Adaptado de (Ordoñez & Moreno, 2017).

Al catalizador usado o gastado en la industria del petróleo constituido principalmente por zeolitas, se le trata como residuo peligroso. Su composición química está compuesta principalmente por sílice y alúmina con una proporción de hasta el 90% (Torres Castellanos y Torres Agredo, 2010).

El catalizador que perdió su actividad catalítica para la aplicación en la unidad de FCC catalizador E-cat o catalizador gastado, puede ser tratado para incrementar la actividad catalítica (E-cat tratado) y ser utilizado en los procesos de pirólisis, el análisis termogravimétrico (TGA) exhibe un comportamiento similar al E-Cat gastado, de acuerdo al análisis de espectroscopia de infrarrojo por transformada de Fourier (FTIR) realizado al catalizador E-Cat tratado y al E-Cat gastado, exhiben actividad catalítica debido a la presencia de sitios ácidos (debido a la presencia de Si y Al en su estructura) y se evidencia

que el catalizador tratado tiene mayor actividad debido al pretratamiento realizado (proceso de deshidratación y calcinación) donde se le eliminó el coque y otras impurezas. Por lo tanto, el catalizador E-Cat gastado y tratado, se pueden utilizar como catalizadores en procesos termoquímicos (Ramos y Pretell, 2020).

#### **b) Proceso de Pirólisis al Vacío**

La pirólisis al vacío es un concepto que permite un alto rendimiento de productos líquidos de pirólisis a partir de sustancias a base de carbono. El vacío minimiza las reacciones secundarias como el craqueo térmico y catalítico también las reacciones de repolimerización, recondensación. Si se produce el enfriamiento rápido de los productos en fase gaseosa, el rendimiento de líquidos orgánicos como los aceites de pirólisis aumentan a expensas de los subproductos sólidos y gaseosos. En resumen, las reacciones principales en la pirólisis implican la ruptura de enlaces para descomponer los compuestos orgánicos en productos más simples, mientras que las reacciones secundarias son aquellas que pueden generar productos no deseados o alterar la composición de los productos finales. La optimización de las condiciones de pirólisis y el control de las reacciones secundarias son importantes para obtener los productos deseados con la máxima eficiencia. (Pretell et al., 2021).

Como se puede ver en la tabla 4 el tiempo de residencia para pirólisis al vacío es entre 2 a 30 segundos, con velocidades de calentamiento medios y temperaturas alrededor de 400 °C y facilita la producción de biopetroleo.

**Tabla 4***Tipos de pirólisis*

<b>Proceso</b>	<b>Tiempo de residencia</b>	<b>Velocidad de calentamiento (°C/s)</b>	<b>Temperatura (°C)</b>	<b>Productos</b>	<b>Referencia</b>
<b>Carbonización</b>	Días	0.01-0.1	400	Bio-sólido	Martínez et al., 2013; McKendry, 2002
<b>Convencional</b>	5-60 min	0.1-1	500-600	Gas, líquidos, sólidos	Baray, 2016; McKendry, 2002
<b>Rápida</b>	0.5-5 s	>1000	500-650	Bioaceites	Baray, 2016; Mejia y Upegi, 2021; McKendry, 2002
<b>Flash (líquido)</b>	< 1 s	>1000	< 650	Bioaceites	Baray, 2016; McKendry, 2002
<b>Flash (gas)</b>	< 1 s	>1000	< 650	Químicos y gas	Baray, 2016; McKendry, 2002
<b>Ultra rápida</b>	< 0.5 s	>1000	> 700-1000	Químicos y gas	Martínez et al., 2013; McKendry, 2002
<b>Vacío</b>	2-30 s	10-200	400	Bioaceites	McKendry, 2002
<b>Hidropirólisis</b>	< 10 s	>1000	< 550	Bioaceites	Tessini et al., 2013; McKendry, 2002
<b>Metano pirólisis</b>	< 10 s	>1000	< 700	Químicos	McKendry, 2002

### 2.2.8. Tipos de Reactores de Pirólisis

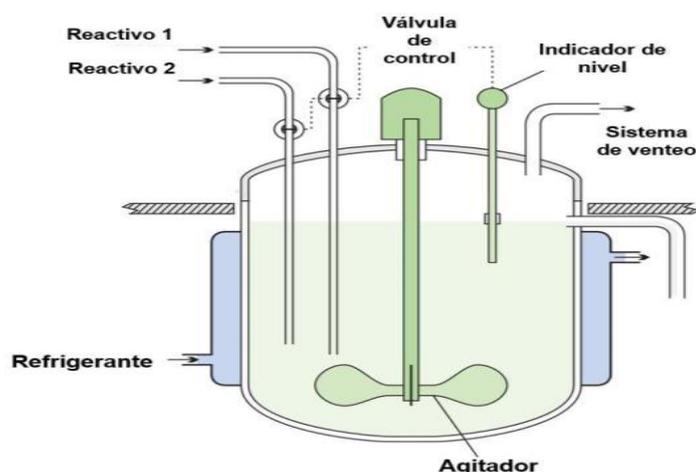
Existen diversos tipos de reactores utilizados en el proceso de pirólisis, cada uno con características particulares y aplicaciones específicas en la industria, como se ha documentado ampliamente en la literatura científica (Martínez et al., 2015). Estos reactores se pueden clasificar en tres categorías principales: continuos, discontinuos (batch) y semicontinuos.

**1. Reactores Discontinuos (Batch):** Un proceso discontinuo o por lotes se da cuando los reactivos son precargados y se vacían cuando la reacción se ha completado como se observa en la figura 6.

- **Reactor Batch:** Este tipo de reactor opera de manera intermitente y es ampliamente utilizado en estudios cinéticos debido a su capacidad para controlar y variar fácilmente las condiciones de funcionamiento. Al cargar los reactivos en el reactor, se permite que la reacción ocurra durante un período específico antes de descargar los productos. Esta característica lo hace ideal para procesos en los que se necesita un control riguroso de las variables de reacción (Campos y Arrazola, 2017).

#### Figura 6

*Reactor batch*



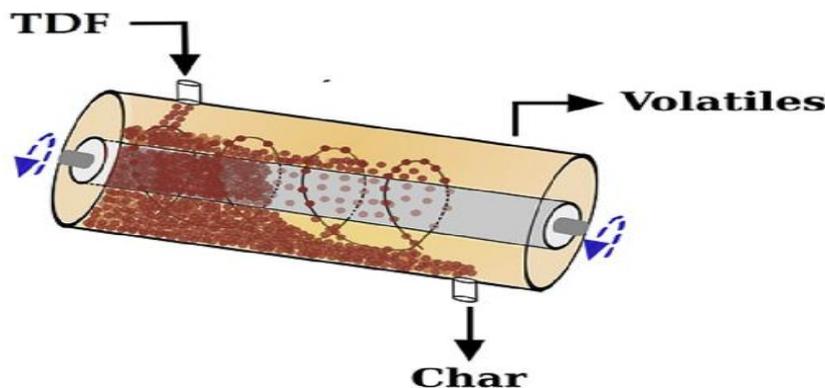
*Nota. Adaptado de (Campos & Arrazola, 2017).*

**2. Reactores Continuos:** En estos sistemas todos los reactivos son continuamente cargados al reactor y los productos son continuamente descargados como se observa en la figura 7.

- **Reactor de Horno Rotatorio:** Este tipo de reactor es uno de los más utilizados en la industria para procesos de pirólisis a gran escala. Opera de manera continua, lo que permite una producción ininterrumpida. Los materiales se introducen en un extremo del reactor y son sometidos a altas temperaturas mientras se desplazan a lo largo del horno rotatorio, permitiendo la descomposición térmica de los materiales (Campos y Arrazola, 2017).

**Figura 7**

*Reactor de horno rotatorio*

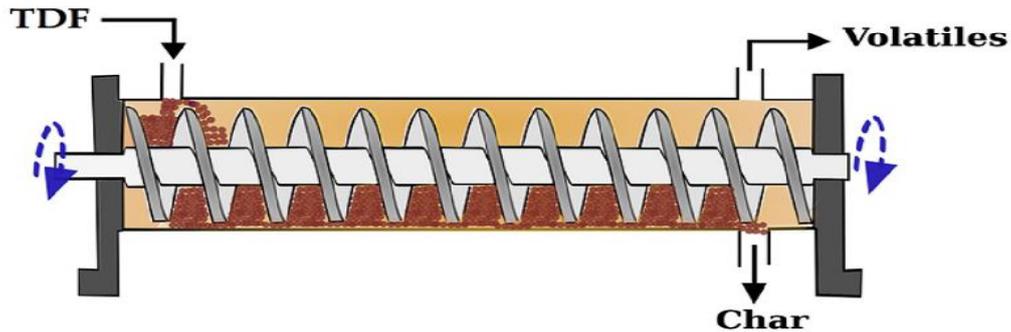


*Nota. Al reactor se le alimenta de “Tyre derived fuel” (TDF), en español “combustible derivado de neumáticos”, es un término que se refiere al proceso de utilizar neumáticos de desechos o reciclados como fuente de combustibles en aplicaciones industriales, como en la producción de energía. Adaptado de (Arabiourrutia et al., 2020).*

- **Reactor Tipo Tornillo:** También utilizado en procesos continuos, este reactor facilita el transporte de los reactivos a lo largo de un tubo mediante un mecanismo de tornillo, lo que permite una mezcla y un calentamiento uniforme. Este diseño es eficaz para el procesamiento continuo de materiales en la pirólisis.

**Figura 8**

*Reactor tubular tipo tornillo*



*Nota. Al reactor se le alimenta de “Tyre derived fuel” (TDF), en español “combustible derivado de neumáticos”, es un término que se refiere al proceso de utilizar neumáticos de desechos o reciclados como fuente de combustibles en aplicaciones industriales, como en la producción de energía. Adaptado de (Arabiourrutia et al., 2020).*

**3. Reactores Semi continuos:** Se denominan reactores semicontinuos a aquellos en los que inicialmente se carga el reactor como en el caso discontinuo, pero durante la reacción se añaden reactantes o se retiran productos de manera más o menos continua como el reactor tubular horizontal.

**Figura 9**

Reactor tubular horizontal al vacío



*Nota. Adaptado de (Villegas & Zamudio, 2022).*

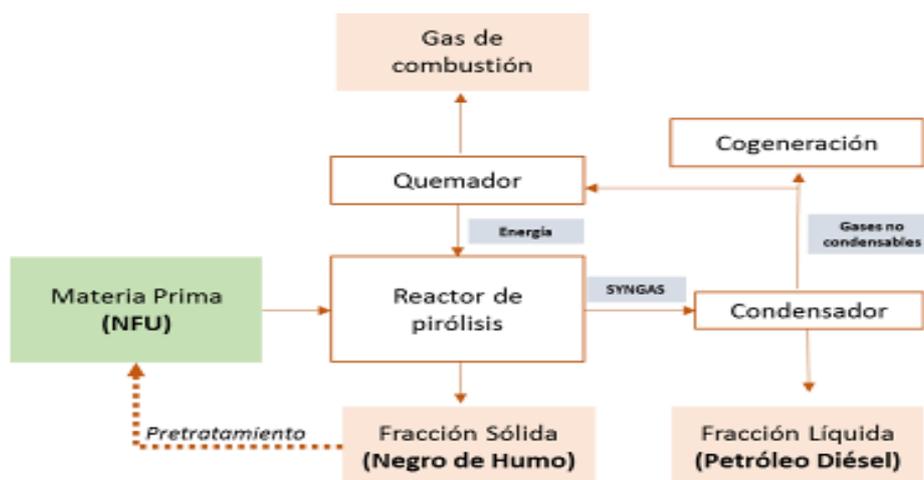
### 2.2.9. Proceso de pirólisis en neumáticos fuera de uso

Uno de los procesos idóneos para el aprovechamiento y reciclaje del caucho de neumáticos usados, es la pirólisis, la principal ventaja del proceso es que puede manejar residuos que son difíciles de reciclar y, por lo tanto, producir productos que pueden reutilizarse. Cuando una materia prima se calienta en ausencia de oxígeno, tienen lugar muchas reacciones, como deshidratación, craqueo, isomerización, deshidrogenación, aromatización y condensación (Martínez et al., 2013).

Los neumáticos fuera de uso poseen energía y productos químicos con la tecnología adecuada, se pueden recuperar. El método de pirólisis es una de las técnicas prometedoras, propuestas para convertir los neumáticos usados en un producto útil (Arya et al., 2020). Un esquema de pirólisis muy común es el que se muestra en la figura 10.

**Figura 10**

Proceso de pirolisis aplicado a neumáticos fuera de uso



*Nota. Adaptado de (Sánchez et al., 2013)*

La pirólisis consiste en la transformación térmica de materiales en este caso residuos, más precisamente NFU, en ausencia de oxígeno a una temperatura de 400 °C a 800 °C para obtener nuevos productos en estado sólido, líquido y gaseoso (Sánchez, 2017).

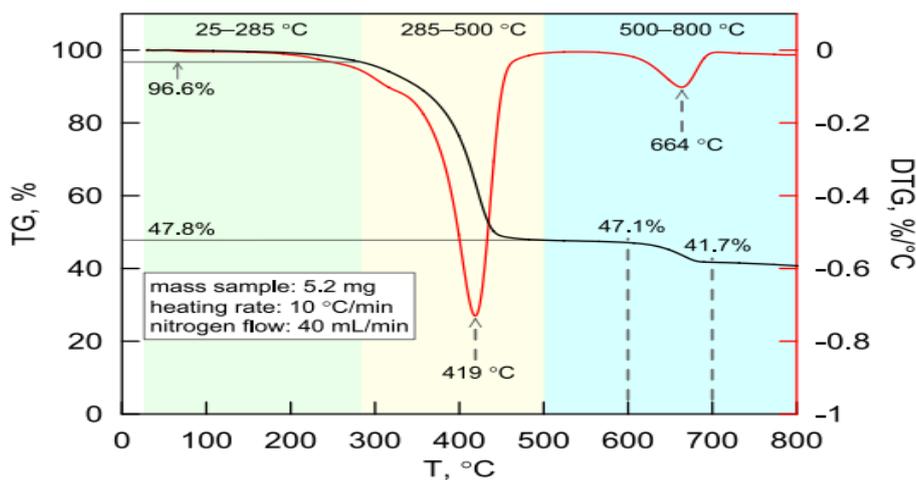
Estos productos se utilizan como combustible o materia prima para otros procesos. Las investigaciones experimentales de pirólisis generalmente se realizan en un amplio rango de temperatura de 400 °C a 900 °C. Los rendimientos típicos de este proceso son: 33 a 38% en masa de sólidos de residuo carbonoso, 38 a 55% en masa de líquidos y 10 a 30% en masa de gas (Acosta et al., 2013).

### A) Análisis termogravimétrico de los NFU

El análisis termogravimétrico (TGA) es utilizado para investigar la pirolisis de los neumáticos fuera de uso, debido a que permite evaluar la degradación de la materia prima con respecto a la temperatura (Jerzak et al., 2024).

**Figura 11**

Análisis termogravimétrico de un neumático fuera de uso



*Nota. Adaptado de (Jerzak et al., 2024).*

### - ASTM D7582: Métodos de prueba estándar para el análisis proximal de carbón y coque mediante análisis macro termogravimétrico

Se establece métodos de análisis macro-termogravimétrico para determinar el contenido de humedad, materia volátil, cenizas y calcular el carbono fijo en muestras de

carbón y coque. Este análisis se realiza con muestras de aproximadamente 1 g y no es aplicable a equipos que utilicen tamaños de microgramos (ASTM, 2015).

**- ASTM E873: Método de ensayo estándar para la densidad aparente de combustibles de biomasa de partículas densificadas**

Establece un método de ensayo para determinar la densidad a granel (o peso específico a granel) de combustibles de biomasa particulada densificada con un volumen máximo de partícula de 16.39 cm<sup>3</sup> (ASTM, 2019a).

**B) Productos de la pirólisis de neumáticos usados**

De los diferentes tipos de pirólisis se puede obtener tres productos entre gases, líquidos y sólidos donde el rendimiento de cada uno de ellos dependerá de la materia prima y las diferentes condiciones de operación. Como se explicó, en el proceso de pirólisis, este se realiza en un ambiente completamente anaeróbico donde los gases inertes como N<sub>2</sub>, CO<sub>2</sub>, He, Ar, son de uso común y bajo ciertas condiciones de temperatura, velocidad de calentamiento del material, presión y tamaño de partícula, darán lugar a productos que contienen un alto contenido energético y sujetos a otros procesos adicionales, pueden utilizarse como combustibles para la producción de energía y calor (Sebastián y Urrego, 2019).

**• Líquidos pirolíticos**

La cantidad de líquido producido a partir del proceso de pirólisis es la más alta en comparación con los productos sólidos o gaseosos. El color de este líquido es marrón oscuro y se parece al petróleo crudo. El TPO o aceite pirolítico tiene un contenido de energía en el rango de 39–44 MJ/kg dependiendo de la materia prima utilizada (Arya et al., 2020).

La fracción líquida que se puede condensar es aproximadamente el 35% de la masa inicial de la materia prima. Esta fracción se compone principalmente de bencenos alquilados,

naftalenos, fenantrenos n-alcanos, de  $C_{11}$  a  $C_{24}$  y alquenos de  $C_8$  a  $C_{15}$ , con pequeñas cantidades de nitrógeno, azufre y compuestos oxigenados (Sánchez, 2017).

El aceite de pirólisis es un producto multicomponente debido a la diversidad de la composición en los neumáticos y la complejidad en el proceso. Los aceites de pirólisis se caracterizan por tener componentes alifáticos, aromáticos, heteros aromáticos y algunos con comportamiento polar (Bonilla, 2019).

La minimización de la pirólisis secundaria que causa el craqueo de TPO a gases de pirolisis es necesaria porque el TPO es un producto preferencial al gas derivado de neumáticos; es mucho más fácil de manejar, más densa en energía, se puede almacenar rápida y económicamente (Bowles y Fowler, 2022).

Puede ser utilizado como potencial combustible al ser una mezcla de gasolina, kerosene, gasóleo, gasóleo pesado y residuo, con una fracción pirolítica más abundante (20-55%) o materia base para otros productos químicos. Las plantas especializadas se benefician del valor agregado entre la producción y la destilación de derivados de pirólisis pero tiene un alto contenido de azufre por ende debe ser desulfurizado, aumentando costos de producción esto impide la aplicación directa como combustible por el elevado contenido de azufre (Sebastián y Urrego, 2019). El rendimiento refleja la producción en peso de líquidos con respecto a los otros productos como se muestra en la tabla 5.

**Tabla 5**

Rendimiento de productos líquidos a través de varios reactores

Tipo de Reactor	Temperatura de operación de máximo rendimiento de prod. líquidos (°C)	Productos líquidos (%masa)	Residuo Carbonoso (%masa)	Productos gaseosos (%masa)
<b>Lecho fijo, lote</b>	500 °C	40.26	47.88	11.86
<b>Cama fija</b>	475 °C	55	36	9
<b>Cama fija</b>	500 °C	58	37	5
<b>Lecho fijo, lote</b>	475 °C	58.2	37.3	4.5
<b>Vacío</b>	550 °C	47.1	36.9	16
<b>Cama de tornillo móvil</b>	600 °C	48.4	39.9	11.7
<b>Cama fluidizada</b>	450 °C	55	42.5	2.5
<b>Cama giratoria</b>	550 °C	38.12	49.09	2.39

*Nota. En la presente tabla se menciona la temperatura a la cual se obtiene el máximo rendimiento de líquidos obtenidos en diferentes reactores de pirólisis de NFU. Adaptado de (Arya et al., 2020).*

**-ASTM D5002: Método de prueba estándar para la densidad, la densidad relativa y la gravedad API de los aceites crudos mediante un analizador de densidad digital**

Este método de prueba cubre la determinación de la densidad, densidad relativa y gravedad API de aceites crudos que pueden manipularse normalmente como líquidos a temperaturas entre 15 °C y 35 °C, utilizando equipos de inyección manuales o automatizados. Es aplicable a aceites crudos con altas presiones de vapor, siempre que se

tomen precauciones para evitar la pérdida de vapor durante la transferencia de la muestra al analizador de densidad (ASTM, 2022).

**- ASTM D240: Determinación del Calor de Combustión de Combustibles Líquidos de Hidrocarburos**

Establece un método de análisis calorimétrico para determinar el calor de combustión de combustibles líquidos de hidrocarburos, tales como gasolinas, querosenos, fueloil y gasóleos. Aunque está diseñado principalmente para líquidos, también puede aplicarse a combustibles sólidos que contengan carbono, hidrógeno, nitrógeno, oxígeno y azufre. Este método no es aplicable a equipos que manejen tamaños de microgramos (ASTM, 2019b).

**- ASTM D445: Viscosidad cinemática de líquidos transparentes y opacos (y cálculo de la viscosidad dinámica)**

Describe un método de prueba para determinar la viscosidad cinemática de líquidos transparentes y opacos mediante la medición del tiempo que tarda un volumen de líquido en fluir bajo gravedad a través de un viscosímetro capilar calibrado. El método es aplicable a líquidos con flujo Newtoniano (ASTM, 2024).

**-ASTM D4377: Agua en aceites crudos por valoración potenciométrica de Karl Fischer**

Se establece un método de prueba estándar para la determinación de agua en aceites crudos mediante titulación potenciométrica con Karl Fischer. Este método abarca la medición de agua en un rango de 0.02% a 2% en aceites crudos. Se emplean reactivos estándar de Karl Fischer o reactivos libres de piridina. Es importante tener en cuenta que el azufre mercaptano y el sulfuro ( $S^-$  o  $H_2S$ ) pueden interferir con los resultados de este método (ASTM, 2020).

**-ASTM D86: Destilación de productos petrolíferos y combustibles líquidos a presión atmosférica**

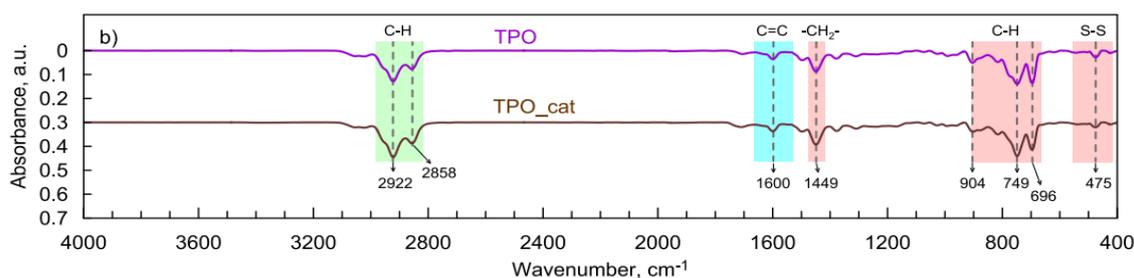
El método ASTM D86 se utiliza para la destilación atmosférica de productos petroleros y combustibles líquidos en un laboratorio, con el fin de determinar las características del rango de ebullición de destilados ligeros y medios, combustibles para motores de encendido por chispa, gasolina de aviación, combustibles para turbinas, diésel, mezclas de biodiésel hasta el 30% en volumen, y otros productos como naftas y querosenos. Este método se aplica tanto a instrumentos manuales como automáticos y no es adecuado para productos con cantidades apreciables de material residual. La destilación proporciona información crucial sobre la composición y el comportamiento de los combustibles, afectando su seguridad, rendimiento y formación de depósitos de combustión (ASTM, 2023).

### -Espectroscopía infrarroja por transformada de Fourier (FTIR)

Utilizado para identificar y analizar las vibraciones moleculares en una muestra, lo que proporciona información sobre su composición química. En el contexto de los neumáticos fuera de uso, el análisis FTIR se utiliza para examinar diferentes tipos de muestras, incluyendo los neumáticos usados y los productos de pirolisis, ver la figura 12 (Jerzak et al., 2024).

### Figura 12

Análisis FTIR de los líquidos de pirolisis



Nota. Adaptado de (Jerzak et al., 2024)

- ***Gas de pirólisis.***

Posterior a la recuperación de líquido en el proceso de pirólisis, quedan algunos gases formados que no son condensables, también llamado gas pirolítico o piro-gas. Estos gases de pirólisis de neumáticos brutos están compuestos principalmente de hidrógeno ( $H_2$ ), monóxido de carbono (CO), dióxido de carbono ( $CO_2$ ), metano ( $CH_4$ ), etano ( $C_2H_6$ ), eteno ( $C_2H_4$ ), propano ( $C_3H_8$ ), propeno ( $C_3H_6$ ), butano ( $C_4H_{10}$ ), butenos ( $C_4H_8$ ), butadieno ( $C_4H_6$ ), y algunas bajas concentraciones de azufre ( $H_2S$ ,  $CS_2$ ) y nitrógeno ( $NH_3$ ). La presencia de dichos gases se atribuye principalmente a la degradación térmica de BR y SBR (Martínez et al., 2013).

Esta fase suele utilizarse como combustible, produciendo energía útil en el mismo proceso. Sin embargo, hay un producto que está llamando la atención en esta etapa y es el hidrógeno, que tiene muy buena perspectiva de futuro, debido al desarrollo de las pilas de combustible de hidrógeno o celdas de hidrogeno, a través de las cuales generará electricidad con eficiencia de muy alta energía en el medio (Bonilla, 2019).

Otro producto pirolítico es un gas no condensable, con rendimiento del 20% aproximadamente. Se compone principalmente de hidrógeno ( $H_2$ ), sulfuro de hidrógeno ( $H_2S$ ), óxido de carbono ( $CO_x$ ) que puede utilizarse como combustible en el propio proceso de pirólisis. Este gas tiene un poder calorífico de 68 a 84 MJ/m<sup>3</sup> (Sánchez, 2017).

Sus componentes se pueden separar fácilmente y utilizar en una variedad de procesos, pero las altas temperaturas favorecen la producción de gas e hidrogeno (Sebastián y Urrego, 2019).

- ***Sólidos de pirólisis.***

En términos generales, la pirólisis ofrece la posibilidad de convertir los neumáticos usados en un sólido rico en residuo carbonoso (char). La composición del residuo carbonoso

depende de las condiciones de pirólisis y la composición del neumático, su calidad y rendimiento influyen en gran medida en la viabilidad económica del proceso además de la fracción líquida.

El carbón de pirolisis representa aproximadamente un 35–40% en masa (carbón fijo más contenido de cenizas) o incluso valores más bajos según la composición del neumático. Por lo tanto, algunos de los vapores orgánicos liberados durante la pirólisis se convierten en coque por reacciones de des-alquilación y deshidrogenación o se absorben en la superficie del carbón (Martínez et al., 2013).

El carbón negro o negro de humo tiene potencial para ser utilizado en varios productos de caucho, especialmente en la producción de neumáticos nuevos (Sánchez, 2017).

Según la cantidad de negro de humo presente en el neumático fuera de uso el rendimiento puede ser del 22 al 49% y con la ayuda de vapor o CO<sub>2</sub> produce carbón activado que se puede utilizar en procesos de filtración, también se utiliza como refuerzo de caucho, pero debe someterse a tratamiento de desmineralización, aumentando costos de producción y capital (Sebastián y Urrego, 2019).

### **2.3. Variables de operación en un proceso de pirolisis catalítica**

#### **2.3.1. Tamaño de partícula**

Para el diámetro de partícula o tamaño promedio de la materia prima, en procesos termoquímicos generalmente se acepta que, para tamaños de partícula más pequeños existe un comportamiento isotérmico y no hay limitación de transferencia de masa, es decir, no hay un gradiente de masa o temperatura en el material (Bolívar y Cuenca, 2019).

#### **2.3.2. Temperatura**

Es la variable de mayor importancia en el proceso, favorece la rotura de moléculas complejas para dar lugar a otras más sencillas (Consesa, 1996)

Debido a que la temperatura permite la degradación térmica del material a pirolizar, garantiza la estabilidad y rendimiento esperado de los productos de interés, esta degradación térmica ha sido estudiada por análisis termogravimétrico, en donde se identifica los valores o rangos de temperaturas logran pérdidas de peso apreciables en el material a pirolizar que van en el rango de temperaturas de 470 a 700 °C (Bolívar y Cuenca, 2019).

### **2.3.3. Relación catalizadora/materia prima**

Es la relación de la cantidad de catalizador en gramos sobre la cantidad en gramos de materia prima alimentada al reactor de pirólisis, la relación catalizadora/materia prima optimiza el rendimiento de productos líquidos (Ramos y Pretell, 2021).

### **2.3.4. Rendimiento de productos líquidos**

Hace referencia a la producción de aceite ( $x_i$ ) con respecto a los otros dos productos que son sólidos ( $z_i$ ) y gases de pirólisis( $y_i$ ) o con respecto a la materia prima total alimentada, el porcentaje en masa (%m/m) es obtenido mediante balance de materia (Mora et al., 2014).

$$\%R(X_i) = \frac{x_i}{(x_i+y_i+z_i)} * 100\% \dots (1)$$

Donde:

$X_i$ : gramos de sólidos.

$Y_i$ : gramos líquidos.

$Z_i$ : gramos gases.

$R(X_i)$ : adimensional.

## CAPÍTULO III: MATERIALES Y METODOS

### 3.1. Hipótesis y especificación de variables

#### 3.1.1. *Hipótesis general de investigación*

- El rendimiento de los combustibles líquidos obtenidos mediante la pirólisis catalítica al vacío utilizando E-Cat a partir de neumáticos fuera de uso es significativo y puede ser evaluado efectivamente mediante el control de las condiciones de temperatura y la relación del catalizador con la materia prima.

#### 3.1.2. *Hipótesis específica de investigación*

-La temperatura y la relación del catalizador (E-Cat) con respecto a la alimentación de la materia prima, así como la interacción entre estos factores, tienen un efecto significativo sobre el rendimiento de los productos líquidos obtenidos mediante pirólisis catalítica al vacío de neumáticos fuera de uso.

-Existen parámetros específicos de temperatura y relación del catalizador (E-Cat) con la materia prima que permiten obtener un mayor rendimiento de productos líquidos mediante pirólisis catalítica al vacío de neumáticos fuera de uso.

-Los combustibles líquidos obtenidos bajo las condiciones que resultaron en un mayor rendimiento presentan propiedades fisicoquímicas que pueden ser evaluadas para determinar su viabilidad como combustibles.

### 3.2. Identificación de variables e indicadores

#### 3.2.1. *Variables independientes*

Dentro de estas variables independientes se encuentra los siguientes:

- Relación Catalizador/Materia Prima (%m/m).
- Temperatura (°C).

### **3.2.2. Variables dependientes**

- Rendimiento de los productos líquido.

### **3.2.3. Variable interviniente**

- Temperatura Ambiente (°C).
- Presión Atmosférica (atm).
- Reactor tubular semicontinuo horizontal.

## **3.3. Tipo y diseño de investigación**

### **3.3.1. Tipo, enfoque y alcance de la investigación**

La presente investigación tiene como objetivo determinar el rendimiento en combustibles líquidos a partir de NFU de camiones cisterna, tomando muestras de la empresa Petrocentro Urubamba SAC y utilizando un enfoque cuantitativo con diseño experimental en el laboratorio de la UNI. Según Hernández et al. (2014), este tipo de investigación es explicativa, ya que analiza la relación entre variables independientes (temperatura, relación catalizador/materia prima) y dependientes (rendimiento) a su vez también indican que el corte es transversal, ya que permite analizar su incidencia e interrelación en un punto específico en el tiempo. Además, Guillen et al. (2020) destacan que el enfoque cuantitativo utiliza métodos estadísticos para probar hipótesis, permitiendo la recolección y análisis de datos cuantificables que ayudan a resolver preguntas de investigación.

### **3.3.2. Diseño Experimental**

En el libro *Análisis y diseño de experimentos* de Gutiérrez & de la Vara (2008), se abordan los diseños factoriales con dos factores, A y B, cada uno con a y b niveles de prueba, respectivamente, donde a y b son mayores o iguales a 2. Este enfoque permite construir un diseño factorial de  $a \times b$ , que consiste en un total de  $a \times b$  tratamientos. Entre los ejemplos

más comunes de estos diseños se encuentran el factorial  $2^2$ , el factorial  $3^2$  y el factorial  $3 \times 2$ . Cada ejecución completa de este arreglo se denomina réplica, y cuando los diseños factoriales involucran menos de cuatro factores, es común realizar réplicas para asegurar una potencia estadística adecuada en las pruebas de los efectos que se están investigando. Si se realizan  $n$  réplicas, el número total de corridas experimentales es  $n(a \times b)$ .

Para nuestro trabajo, los rangos de temperatura fueron seleccionados teniendo en consideración lo realizado por Pretell et al. (2021), en su investigación titulada “Producción de Combustibles Líquidos por Pirólisis al Vacío de Neumáticos Usados”, donde se seleccionó cuatro diferentes temperaturas (500, 550, 600 y 650 °C), el tamaño de partícula se mantuvo constante 25x25 mm y donde se establece 150 gramos como la cantidad necesaria para alimentar al reactor de pirólisis por experimento.

La relación catalizador/materia prima fue seleccionada, de acuerdo a la investigación realizada por (Ramos y Pretell, 2021) titulado “Optimización y Caracterización de Combustibles Líquidos Obtenidos a partir de la Pirólisis Catalítica de Residuos Plásticos”, tres porcentajes de relación catalizador/materia prima fueron elegidos (0, 10 y 20% masa), aproximadamente entre (0-30 gramos de catalizador E-cat).

Se realizaron 36 experimentos en orden aleatorio, como se ve en la siguiente tabla 6, para asegurar la repetitividad de los experimentos se realizó tres repeticiones a cada una de las condiciones ya mencionadas en el laboratorio del grupo de investigación en procesos termoquímicos y energéticos de la Universidad Nacional de Ingeniería (UNI), cada experimento tuvo un tiempo de realización promedio de 8 horas.

**Tabla 6**

Número de experimentos y repeticiones

<b>Experimento</b>	<b>Temperatura</b>	<b>Relación Catalizador /Materia prima</b>	<b>Repeticiones</b>
1	500	0	3
2	500	10	3
3	500	20	3
4	550	0	3
5	550	10	3
6	550	20	3
7	600	0	3
8	600	10	3
9	600	20	3
10	650	0	3
11	650	10	3
12	650	20	3
TOTAL			36

El presente trabajo de investigación es una investigación del tipo explicativa experimental factorial multivariable 4x3 como se muestra en la tabla 7 donde interactúan:

Factor A: Temperatura que consta de 4 niveles (500, 550, 600, 650 °C)

Factor B: Relación Catalizador /Materia prima que consta de 3 niveles (0,10,20%).

Y  $ij_n$ : variable dependiente bajo el  $i$ -ésima nivel del factor A y el  $j$ -ésima nivel del factor B en la  $n$ -ésima el número de réplica.

**Tabla 7**

Arreglo general del diseño factorial 4x3

		<b>Factor B</b>								
		b1			b2			b3		
<b>Factor A</b>	a1	Ya1b1 n1	Ya1b1 n2	Ya1b1 n3	Ya1b2 n1	Ya1b2 n2	Ya1b2 n3	Ya1b3 n1	Ya1b3 n2	Ya1b3 n3
	a2	Ya2b1 n1	Ya2b1 n2	Ya2b1 n3	Ya2b2 n1	Ya2b2 n2	Ya2b2 n3	Ya2b3 n1	Ya2b3 n2	Ya2b3 n3
	a3	Ya3b1 n1	Ya3b1 n2	Ya3b1 n3	Ya3b2 n1	Ya3b2 n2	Ya3b2 n3	Ya3b3 n1	Ya3b3 n2	Ya3b3 n3
	a4	Ya4b1 n1	Ya4b1 n2	Ya4b1 n3	Ya4b2 n1	Ya4b2 n2	Ya4b2 n3	Ya4b3 n1	Ya4b3 n2	Ya4b3 n3

El número de experimentos serán igual al número de combinaciones o posibles tratamientos de los factores A y B (4x3) por la cantidad de réplicas (n=3). Haciendo un total de 36 experimentos. Como se muestra en la siguiente ecuación:

$$\text{N}^{\circ} \text{ de experimentos} = (4 \times 3) \times 3 = 36 \dots (2)$$

Para el análisis estadístico se ha propuesto el método de regresión (lineal y múltiple) que utilizan una o más variables independientes para describir matemáticamente el comportamiento de la variable de respuesta, pero, si el valor de la Raíz cuadrada media ajustada es menor al 70% no se recomienda la aplicación de los modelos matemáticos obtenidos (Gutiérrez & de la Vara, 2008). La regresión múltiple permite estimar el efecto de dos o más variables independientes sobre la variable dependiente y predecir el valor de la variable dependiente utilizando una o más variables independientes y estimar qué variable

independiente predice mejor la puntuación de la variable dependiente (Hernández et al., 2014).

La prueba de hipótesis de regresión se aplica para determinar si existe una relación entre una variable dependiente y un subconjunto de sus variables independientes. Rechazar la hipótesis nula significa que al menos una de las variables independientes contribuye significativamente al modelo (Hines y Montgomery, 1996).

De acuerdo a Velázquez et al. (2016) el cual utilizó el método de regresión lineal múltiple para encontrar un modelo matemático que relaciona los rendimientos de sus productos líquidos con sus variables independientes que son temperatura, tasa de calentamiento y tamaño de partícula además de analizar el efecto de las variables independientes con respecto a su variable de respuesta. Para estimar el máximo rendimiento de productos líquidos como Ramos & Pretell (2021) establecieron, generando un modelo matemático de optimización en base a datos experimentales de la obtención de combustibles líquidos a partir de la pirólisis catalítica de residuos plásticos. Para lo cual se utilizó la versión de prueba del software “Minitab 17” realizando una regresión múltiple de los datos, siendo el valor objetivo, el rendimiento de productos líquidos, y como variables, la temperatura de operación de pirólisis y la relación catalizador / materia prima”.

Se utilizó el software “Minitab 18” para hacer el análisis estadístico de los resultados; además, de generar un modelo matemático que relaciona el rendimiento de productos líquidos en función de la temperatura y la relación catalizador/materia prima, además de obtener el mayor rendimiento de productos líquidos

Las características fisicoquímicas de materia prima y productos se realizaron en el laboratorio de normalización de petróleo y derivados (LNPD) en cumplimiento con las normas ASTM respectivas y necesarias para caracterizar el rendimiento de productos líquidos y sub productos de pirólisis.

Los resultados y datos obtenidos para la presente investigación se representaron mediante gráficas y tablas, para darle mayor validez a la interpretación y discusión de resultados, se compararon los parámetros establecidos con los obtenidos en “Producción de Combustibles Líquidos por Pirólisis al Vacío de Neumáticos Usados”, siendo la investigación más cercana a la que se propone realizar junto a otros documentos de investigación que se consideren relevantes para la elaboración de la presente tesis.

### 3.4. **Ámbito de estudio**

La investigación se desarrolló en el ámbito de los neumáticos fuera de uso (NFU) correspondientes a la categoría de carga y transporte. Este enfoque abarcó específicamente neumáticos diseñados para camiones y vehículos pesados, los cuales se caracterizan por su composición robusta, mayor tamaño y el uso de materiales altamente resistentes al desgaste, como caucho natural y sintético, refuerzos metálicos, textiles y aditivos especializados.

**Tabla 8**

Clasificación de neumáticos según el tipo de vehículo

Clasificación del Vehículo	Código/Modelo del Neumático	Descripción del Neumático
Ligeros	LGT-101	Neumáticos compactos para autos urbanos. Ofrecen eficiencia de combustible y maniobrabilidad.
Intermedios (SUV y Pickups)	INT-202	Neumáticos todoterreno, ideales para SUVs y camionetas. Proporcionan estabilidad en carreteras y terrenos mixtos.
Pesados (Carga y Transporte)	TB 906 Fullrun	Neumático para camiones de carga. Diseño robusto para largas distancias y excelente capacidad de carga.
Pesados (Carga y Transporte)	Michelin 295/80 R22.5	Neumático de alta calidad para camiones y buses. Optimizado para durabilidad, rendimiento y seguridad.
Agrícolas	AGR-404	Neumáticos diseñados para tractores y maquinaria agrícola. Profundas ranuras para tracción en terrenos blandos.
Industriales	IND-505	Neumáticos sólidos o semi-sólidos para maquinaria pesada como grúas y excavadoras.

### **3.5. Población de estudio**

La población de estudio se define como el conjunto completo de individuos u objetos relevantes para la investigación. Una vez que se ha identificado la unidad de muestreo o análisis, se procede a delimitar específicamente la población objeto de estudio, con el propósito de generalizar los resultados. Por lo tanto, la población se constituye por todos los casos que cumplen con ciertas especificaciones establecidas (Hernández et al., 2014).

La población de estudio para el presente trabajo fueron los neumáticos fuera de uso.

### **3.6. Unidad de análisis**

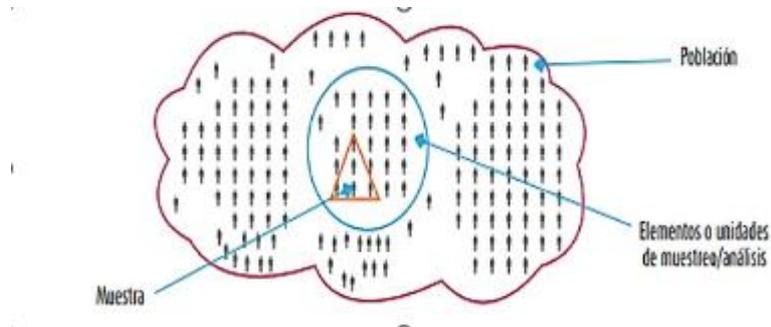
Para el presente trabajo se tomaron como unidades de muestreo los neumáticos que se encontraban fuera de uso dentro de la empresa ya mencionada y catalizador E-cat de FCC procedente de una refinería cercana almacenada en el laboratorio de procesos.

### **3.7. Tamaño de muestra**

Para entender sobre el tamaño de muestra se menciona que “la muestra es, en esencia, un subgrupo de la población digamos que es un subconjunto de elementos que pertenecen a ese conjunto definido en sus características al que se denomina población” (Hernández et al., 2014, p. 175). Se decidió utilizar como muestra probabilística 25 kilogramos de los neumáticos fuera de uso que sean de camiones cisterna pertenecientes a la empresa antes mencionada. Esto se representa en la figura 13.

**Figura 13**

Representación de una muestra como subgrupo



*Nota:* Adaptado de (Hernández et al., 2014).

### 3.8. Técnicas de selección de muestra

Se eligieron al azar los neumáticos fuera de uso que sean de camiones cisterna, pertenecientes a la empresa antes mencionada de los cuales en el anexo 2 y 3 están sus especificaciones técnicas, posterior a esto se procedió a realizar cortes a los NFU con el fin de separar la malla metálica que se encuentra al interior de los neumáticos de donde se obtuvieron tiras largas de los NFU, para luego darles forma de cubos ya que se necesita un tamaño de partícula de 25x25 mm, como se muestra en la figura 14.

**Figura 14**

*Neumáticos fuera de uso*

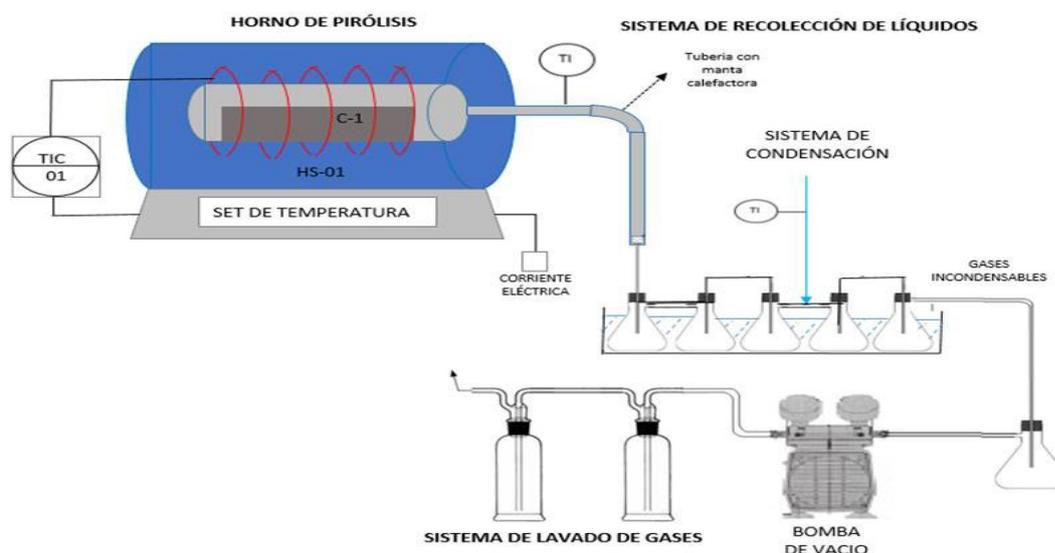


### 3.9. Método experimental

El sistema de pirólisis usado en la presente investigación, fue utilizado en otros trabajos de investigación experimental como los realizados por Ramos & Pretell (2021) titulado “Optimización y Caracterización de Combustibles Líquidos Obtenidos a partir de la Pirólisis Catalítica de Residuos Plásticos”, también los realizados por Pretell et al. (2021) titulado “Producción de Combustibles Líquidos por Pirólisis al Vacío de Neumáticos Usados” y los realizados por Villegas & Zamudio (2022) titulado “Influencia de la Temperatura y el Tamaño de Partícula Durante el Proceso de Pirólisis en el Rendimiento del Combustible Líquido Obtenido a partir de Residuos del Poliestireno Expandido (EPS)”, en donde se encuentra descrito el sistema que está conformado por varios equipos e instrumentos necesarios para realizar los experimentos y de los cuales fueron tomados como referencia para esta investigación. El esquema experimental se muestra en la figura 15 y la figura 16 representa el diagrama de bloques, como también la figura 17 el diagrama de flujo del proceso.

Figura 15

Esquema experimental de la pirolisis para los NFU



Nota: Adaptado de Pretell et al. (2021).

Figura 16

Diagrama de bloques de la pirolisis para los NFU

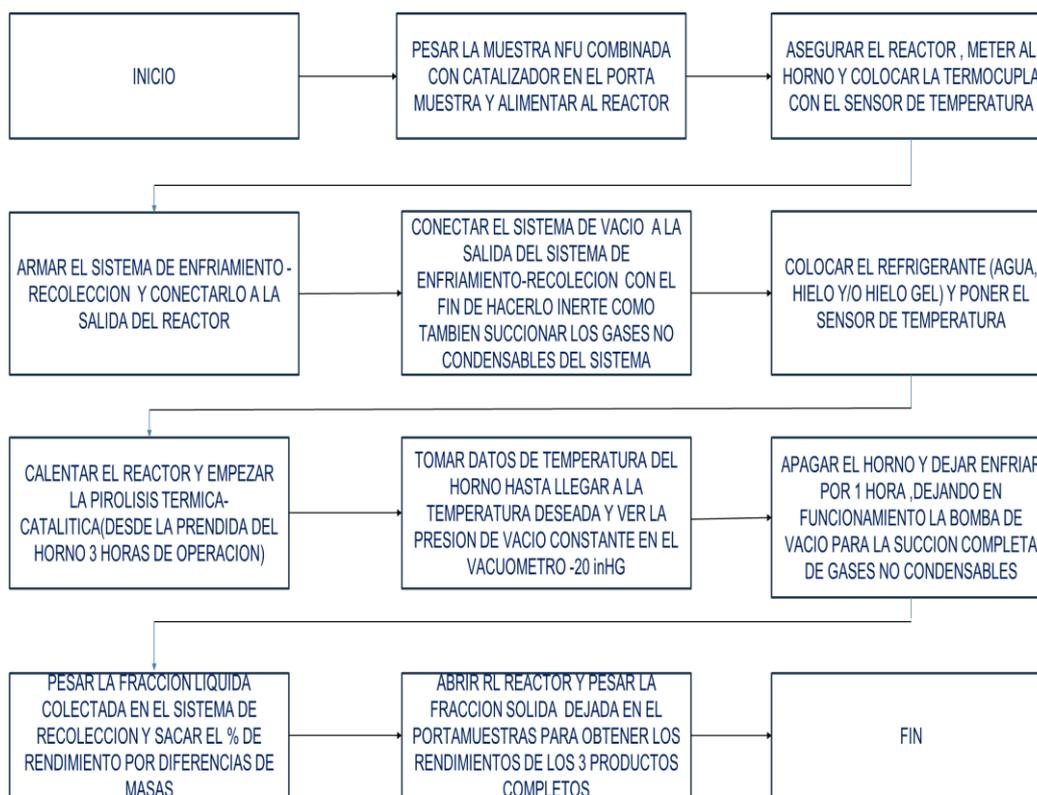
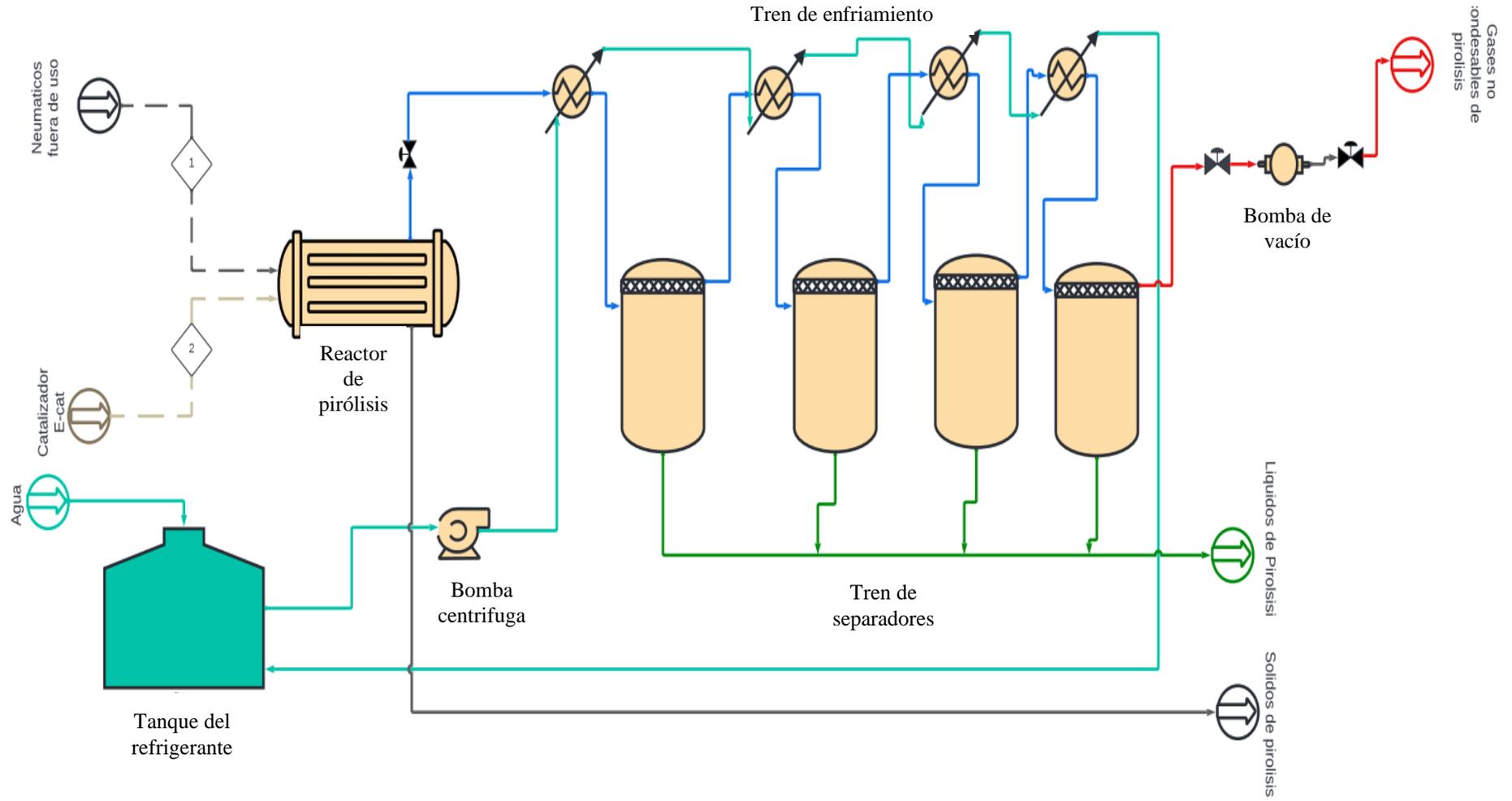


Figura 17

Diagrama de flujo de la pirólisis para los NFU



### 3.10. Materiales, equipos e instrumentos

#### a) Materiales

- Balón de destilación (500 ml)
- Vaso de precipitados (100 ml)
- Embudos (50 ml)
- Probeta (100 ml)
- Jeringas (5ml)
- Pipeta (10 ml)
- Botellas de vidrio ámbar
- Cucharillas
- Guantes de Nitrilo
- Batas de laboratorio
- Mascarilla de protección
- Lentes de seguridad
- Catalizador (E-cat)

#### b) Equipos

- Horno de inducción magnética
- Reactor
- Sistema de enfriamiento y recolección
- Sistema de vacío
- Sistema de venteo de gases
- Sistema de recolección de datos

#### c) Instrumentos

- Balanza

- Software Logger Pro
- Sensores de temperatura para el reactor
- Sensores de temperatura para el sistema de enfriamiento

### 3.11 Equipos

#### a) Horno de inducción magnética

En el sistema de calentamiento diseñado para proporcionar energía requerida en el proceso se utilizó un horno horizontal y cilíndrico con tapas desmontables en los extremos para facilitar la instalación del reactor por lotes, como se muestra en la figura 18.

El horno de inducción magnética a 220 V y 2.2 kW, para la lectura y control de temperatura cuenta con una termocupla (tipo K) y un sistema de automatización PID (Autonics TZN4S) (Villegas y Zamudio, 2022, p. 61).

#### Figura 18

*Horno de pirolisis*



#### b) Reactor

Se utilizó un reactor de tubos horizontales de acero inoxidable de 5 cm de diámetro interior y 60 cm de longitud, como se muestra en la figura 19. En un extremo hay una tapa lateral removible que tiene un tubo de salida para la extracción de los productos de reacción.

Al otro extremo el reactor cuenta con un orificio de 1 cm para la termocupla (Villegas y Zamudio, 2022, p. 61).

### **Figura 19**

*Reactor de pirolisis*



### **c) Sistema de enfriamiento y recolección**

El sistema de enfriamiento y recolección, consta de un tren de enfriamiento de 5 matraces kitasatos con tapones de caucho y conectados en serie con tubos de acero inoxidable, sumergidos en hielo y manteniendo la temperatura a 0 °C, como se muestra en la figura 20 (Villegas y Zamudio, 2022, p. 61).

### **Figura 20**

*Sistema de enfriamiento*



#### **d) Sistema de vacío**

Se requiere una atmósfera con bajo contenido de oxígeno para la pirólisis. Los gases de proceso se eliminan rápidamente mediante un sistema de vacío.

A través de una bomba de vacío (Gast Modelo DOA-P504-BN) que soporta hasta 29 inHg de vacío, conectada a una válvula de presión que permitió controlar la presión de vacío del sistema, como se muestra en la figura 21 (Villegas y Zamudio, 2022, p. 62).

#### **Figura 21**

*Bomba de vacío*

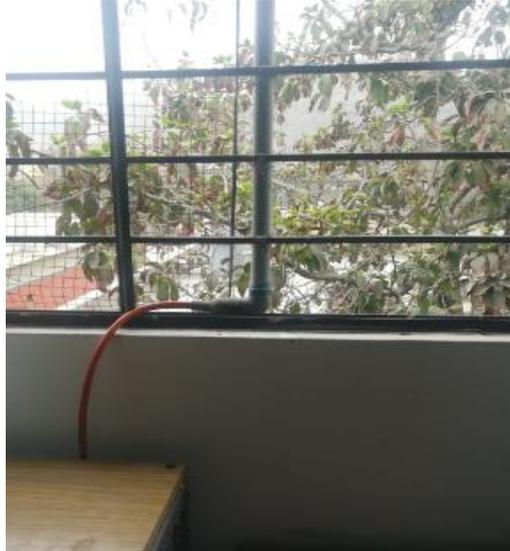


#### **e) Sistema de venteo de gases**

Los gases son venteados a la atmósfera a través de un sistema de escape que está hecho con tubos PVC, cuya salida está a tres metros de la zona de operación, como se muestra en la figura 22 (Villegas y Zamudio, 2022, p. 63).

**Figura 22**

*Sistema de venteo de gases*

**f) Sistema de recolección de datos**

Para el control de la temperatura del reactor se tiene una unidad de adquisición de datos “LabQuest Mini” (Vernier), dispositivo que envía señales a través de una interfaz USB y una computadora portátil que tenga el software “Logger Pro 3”, de donde se monitorean los datos, como se muestra en la figura 23 (Villegas y Zamudio, 2022, p.63).

**Figura 23**

Sistema de recolección de datos LabQuest Mini



### 3.12. Instrumentos

#### a) Balanza

Para la pesada de la muestra y los productos de la pirólisis (líquido y carbón) se utilizó una balanza “Digital Precision” (ES-500HA) que puede leer hasta 500 g con una precisión de 0.01 g, como se muestra en la figura 24 (Villegas y Zamudio, 2022, p. 64).

**Figura 24**

*Balanza digital*

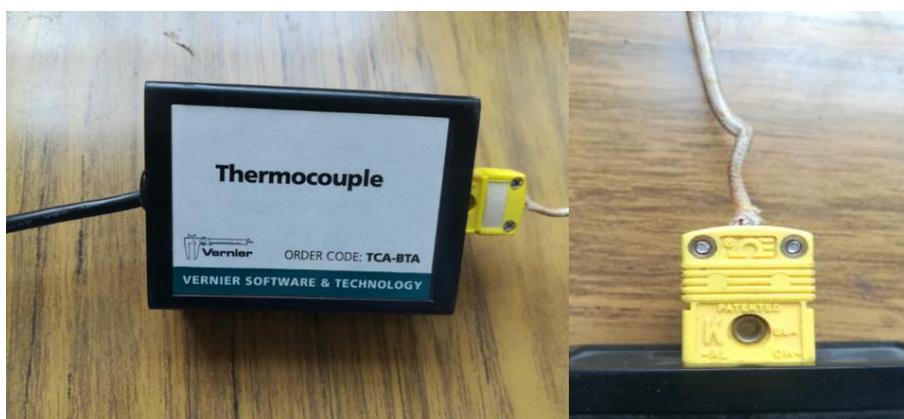


### b) Sensores de temperatura para el reactor

Para el monitoreo de la temperatura del reactor se utilizó una termocupla tipo K (-100 a 1000 °C), con protección cerámica, la cual estará conectada a una unidad de adquisición de datos termocupla Vernier TCA-BTA, el cual tiene un rango de temperatura de uso de -200 °C a 1400 °C con una precisión de 0 °C a 900 °C:  $\pm 2.2^\circ$ . De -200 °C a 0 °C:  $\pm 5^\circ$  C. De 900 °C a 1400 °C:  $\pm 15^\circ$  C, como se muestra en la figura 25 (Villegas y Zamudio, 2022, p. 64).

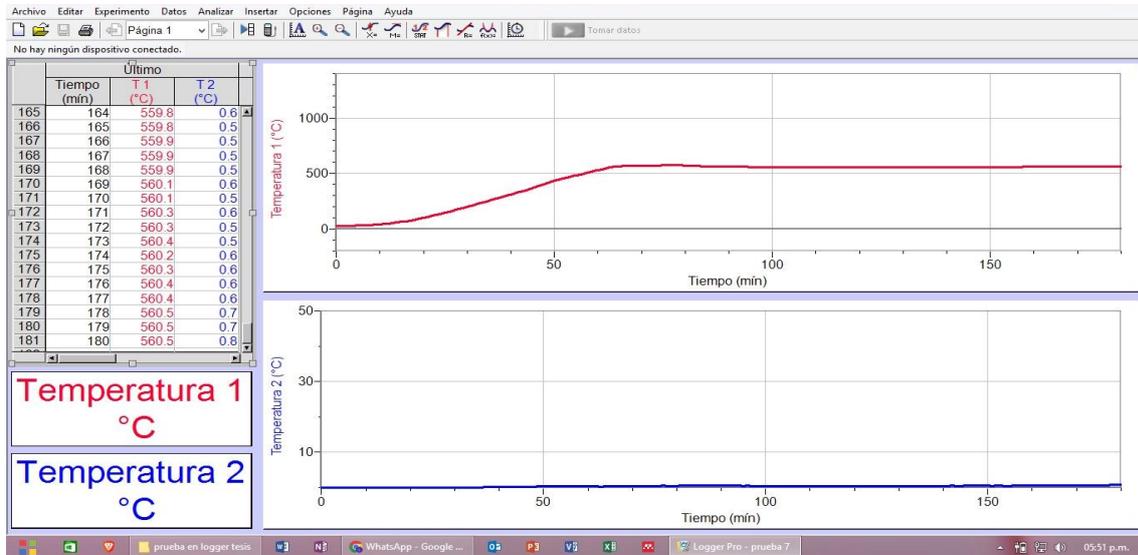
#### Figura 25

*Termocupla y sensor tipo K*



### c) Software Logger Pro

Es un programa de Windows que le permite recopilar y analizar datos “LabQuest Mini” en tiempo real. También puede realizar tareas estadísticas simples, exportar datos y tiene la capacidad de crear documentos de varias páginas. Usando este programa se monitoreo los datos de la termocupla tipo K del reactor, como se muestra en la figura 26 (Villegas y Zamudio, 2022, p. 64).

**Figura 26***Software Logger pro***d) Sensores de temperatura para el sistema de enfriamiento**

Instrumentos para el monitoreo continuo de la temperatura del baño de enfriamiento utilizando sensor de temperatura Vernier TMP-BT con rango de  $-40\text{ }^{\circ}\text{C}$  a  $135\text{ }^{\circ}\text{C}$  con precisión:  $\pm 0.2\text{ }^{\circ}\text{C}$  a  $0\text{ }^{\circ}\text{C}$ ,  $\pm 0.5\text{ }^{\circ}\text{C}$  a  $100\text{ }^{\circ}\text{C}$ , conectados al sistema de recolección de datos en tiempo real “LabQuest Mini”, como se muestra en la figura 27 (Villegas y Zamudio, 2022, p. 64).

**Figura 27***Vernier TMB-BT*

### 3.13. Procedimiento experimental

#### A. Puesta en Marcha del Sistema

- Para operar la unidad, se debe lavar el reactor, junto con el sistema de enfriamiento y recolección, con alcohol isopropílico para eliminar las ceras y/o residuos que se hayan podido formar en el experimento anterior, para repetir el lavado con detergente. y/o jabón líquido) y agua.

- Luego, los instrumentos mencionados se secan en una estufa durante aproximadamente 30 minutos, Se peso aproximadamente 150 gramos de muestra y se colocan en un porta muestras, que también se pesa antes de transferirlo al reactor. A continuación, el reactor se cierra y continúa el pesaje inicial del reactor y el tren de enfriamiento luego se comprueba que esté completamente hermético conectándolo a una bomba de vacío, como se muestra en la figura 28.

#### Figura 28

*Pesaje del reactor*



- Se ajustaron ambas tapas laterales, luego se introdujo el reactor al horno, y se colocó la termocupla. Luego, se probó nuevamente el sistema para verificar que se encuentre sellado completamente.

- El sistema de enfriamiento y recolección se armó en un recipiente de plástico, en el cual se introdujo agua y hielo o hielo gel como material refrigerante. Se comprobó si había fugas utilizando la bomba de vacío. Posteriormente, esta se conectó en la tubería de salida del reactor, tal como se mostró en la figura 29 y 30.

### **Figura 29**

*Sistema de enfriamiento*



### **Figura 30**

*Introducción del reactor al horno*



- El sistema de vacío se conectó en la salida del sistema de enfriamiento y recolección. Luego, el sistema de tratamiento de gases y el sistema de venteo fueron conectados, como se ve en la figura 31.

**Figura 31**

*Conexión del sistema de enfriamiento con el sistema de vacío*



• Los controladores de temperatura del horno fueron activados y se estableció la temperatura para el experimento. Una vez alcanzada la temperatura deseada, se procedió a mantenerla constante durante el tiempo de la prueba preliminar. La puesta en marcha del sistema se ilustró en la figura 32.

**Figura 32**

Sistema experimental para la pirolisis de NFU



## B. Proceso de pirolisis a diferentes temperaturas y la relación catalizador materia prima

- El horno se encendió con la muestra de neumáticos fuera de uso obtenidos a partir de camiones cisterna, con tamaño de partícula 25 mm x 25 mm, junto al catalizador E-cat, como se muestra en la figura 33, para fijar la relación catalizadora/materia prima, además se fijó la temperatura según el diseño experimental; durante este instante se tiene que registrar los datos de la temperatura del reactor, la temperatura en el sistema de enfriamiento - recolección y la presión de vacío. El experimento dura aproximadamente 3 horas a partir del encendido del reactor.

### Figura 33

Muestra de catalizador, neumáticos fuera de uso e introducción al reactor



La bomba de vacío fue activada con el objetivo de crear una atmósfera inerte. Se logró estabilizar el sistema manteniendo la presión constante, la cual se debía mantener invariable luego de transcurridos 15 minutos; en caso contrario, se procedió a ajustar la presión de vacío utilizando la válvula ubicada en la salida del sistema de enfriamiento hasta alcanzar el nivel deseado.

Posteriormente, se estableció la temperatura adecuada para el proceso de pirólisis, la cual fue fijada en el controlador de temperatura del horno, como se muestra en la figura 34.

### **Figura 34**

#### *Control del sistema de vacío*



- Cuando el horno se apagó, se permitió que el sistema se enfriara durante una hora, manteniendo en funcionamiento la bomba de vacío. Posteriormente, se apagó la bomba y se desconectó el sistema de enfriamiento y recolección con el fin de llevar a cabo el pesaje final y determinar la cantidad de producto líquido obtenido ver la figura 35. Asimismo, se retiró el reactor del horno y se dejó enfriar durante una hora en un ambiente inerte, seguido del correspondiente pesaje para determinar la cantidad de sólido remanente.

**Figura 35***Pesado de productos líquidos*

- Primero se realizaron corridas experimentales de prueba que sirvieron para identificar y determinar la velocidad de calentamiento.

**C. Tratamiento de productos**

- Después de que el producto líquido sea pesado, se tomó la muestra líquida, la cual fue almacenada en una botella ámbar como se muestra en la figura 36, en un ambiente fresco dentro del laboratorio para su posterior análisis.

**Figura 36**

Almacenamiento de productos líquidos



- Los residuos sólidos del proceso fueron pesados y luego desechados, siempre y cuando se obtenga muy poco residuo carbonoso (ver figura 37). En caso este residuo fuera mayor, estos serán almacenados.

**Figura 37**

*Residuos solidos*



#### **D. Caracterización de la materia prima y de los productos de pirolisis**

Para la caracterización de los neumáticos fuera de uso cortados, se realizaron los ensayos de poder calorífico, contenido de humedad, contenido de cenizas y densidad aparente.

Se realizó la caracterización del líquido obtenido a través de las variables de temperatura y relación catalizador materia/prima con el que se obtuvo el mayor rendimiento del producto líquido. Para realizar la caracterización del producto líquido obtenido se determinó el poder calorífico ASTM D240, densidad ASTM D5002, destilación ASTM D86, gravedad API ASTM D287, viscosidad ASTM D445, porcentaje de humedad ASTM D4377 y azufre ASTM D4292 y por último para obtener un aproximado de las propiedades fisicoquímicas antes mencionadas, se utilizó el DWSIM con las curvas obtenidas de la destilación ASTM D86. Estas pruebas se realizaron considerando que el líquido sea un combustible o petróleo. Para poder determinar la composición química del producto líquido se realizó la técnica analítica de Espectroscopia Infrarroja por Transformada de Fourier (FTIR).

#### **-Preparación previa de la muestra NFU (Reactor -TGA) y E-cat.**

- Se recolecto los neumáticos, luego se separó de su malla metálica y se cortó en cuadrados, todos de una sola medida de 2.5x2.5 cm con espesor despreciable para alimentar al reactor de pirolisis, como se muestra en las figuras 38, 39, 40, 41 y 42.

#### **Figura 38**

Neumático Fuera Uso de la Compañía Petrocentro



**Figura 39**

Cortes de neumático fuera de uso para muestra

**Figura 40**

Tamaño de neumático cortado

**Figura 41**

Muestra de 150 g. para reactor de pirolisis 2.5cm x 2.5cm



- Se trituraron mecánicamente muestras de NFU hasta obtener partículas más pequeñas (polvo de neumático), para alimentarla posteriormente al análisis

termogravimétrico (TGA), como se muestra en la figura 42.

**Figura 42**

NFU triturado para el análisis TGA



**Figura 43**

E-cat pesado para alimentación al reactor



### **-Imágenes de la medición de las propiedades fisicoquímicas de las muestras de NFU**

Para su análisis se realizó en el laboratorio de Normalización de la Facultad de Petróleo, Gas Natural y Petroquímica de la Universidad Nacional de Ingeniería.

#### **➤ Análisis de poder calorífico “ASTM D-240” (solido)**

Para medir el poder calorífico, primeramente, se realizó el pesaje de aproximadamente 0.95-0.99 gramos de la muestra y se quemó en un calorímetro adiabático (Parr, Modelo 1341) bajo condiciones controladas en presencia de oxígeno a alta presión. El

poder calorífico superior se calcula al observar las temperaturas antes, durante y después de la combustión, como se muestra en la figura 44, 45, 46 y 47.

#### Figura 44

Pesado para determinación para determinación del poder calorífico



#### Figura 45

Bomba calorimétrica armada



**Figura 46**

Instalación de equipo para determinación de poder calorífico

**Figura 47**

Sistema de calorimétrico



**-Análisis termogravimétrico TGA y análisis próximo de la muestra de NFU**

➤ **Análisis próximo (TGA-GIPTE) “ASTM D7582”**

Para el análisis proximal se trabajó con 15.142 mg de muestra (NFU) cargados en la TGA-4000 aplicando la ASTM D7582 que describe los procedimientos para determinar los siguientes parámetros proximales: humedad (mide el contenido de agua presente en la muestra, desde la temperatura ambiente a los 120 °C en atmosfera de aire, equivale a la humedad adsorbida de la muestra), materia volátil (determina la cantidad de sustancias orgánicas volátiles liberadas durante el calentamiento, desde los 120 °C hasta los 900 °C en atmosfera inerte de nitrógeno, equivale a la cantidad de masa liberada por la descomposición

térmica debido al calentamiento), cenizas (determina la cantidad de residuos inorgánicos que quedan después de la combustión, a 700 °C y en atmosfera oxidante de aire, equivale a la masa de residuo inorgánico y no combustible que permanece tras la combustión) y carbono fijo (indica la cantidad de carbono que permanece en la muestra después de la eliminación de la materia volátil, se determina por la diferencia entre el peso inicial y los tres otros parámetros medidos) como se muestra en las figuras 48 , 49 y 50 de los resultados.

#### 1. **Humedad:**

- **Descripción:** Mide el contenido de agua presente en la muestra.
- **Procedimiento:** Calentamiento de temperatura ambiente a 120°C en atmósfera de aire.

#### 2. **Materia Volátil:**

- **Descripción:** Determina la cantidad de sustancias orgánicas volátiles liberadas durante el calentamiento.
- **Procedimiento:** Calentamiento de 120°C a 900°C en atmósfera inerte de nitrógeno.

#### 3. **Cenizas:**

- **Descripción:** Determina la cantidad de residuos inorgánicos que quedan después de la combustión.
- **Procedimiento:** Calentamiento a 700°C en atmósfera oxidante de aire.

#### 4. **Carbono Fijo:**

- **Descripción:** Indica la cantidad de carbono que permanece en la muestra después de la eliminación de la materia volátil.
- **Cálculo:** Se determina por la diferencia entre el peso inicial y la suma de los pesos de humedad, materia volátil y cenizas.

**Figura 48**

NFU rallado en crisol de TGA para análisis termogravimétrico



➤ **Análisis termogravimétrico**

**-Configuración inicial del aire acondicionado:**

- Ajustar el aire acondicionado a **16°C** utilizando el control remoto.
- Si el control remoto no funciona, verificar y cambiar las pilas, además de actualizar la hora.

**-Apertura de la llave de gas:**

- Abrir la llave principal del gas a utilizar (**nitrógeno u oxígeno**) según lo requiera el procedimiento.
- Asegurarse de que la presión esté configurada en **40 PSI**.

**-Encendido del sistema de enfriamiento (chiller):**

- Encender el chiller siguiendo este orden:
  - Presionar el botón trasero.
  - Esperar **10 segundos** y presionar el botón delantero.
- Esperar a que la temperatura del chiller alcance **15°C**.

**-Encendido del analizador TGA:**

- Encender el **analizador termogravimétrico (TGA)** presionando el botón trasero.

**-Configuración del software Pyris Manager:**

- Abrir el programa **Pyris Manager** y hacer doble clic en **Start Pyris**.
- Seleccionar **Programa** y configurar los siguientes parámetros:
  - **Temperatura inicial:** Por lo general, 30°C.
  - **Pasos del programa:**
    - Elegir entre calentamiento, enfriamiento o una etapa isotérmica según el protocolo.
    - Si se elige una isoterma, fijar el tiempo de duración.
    - Para calentamiento o enfriamiento, definir la **velocidad de cambio de temperatura**.
    - Establecer la **temperatura final** para cada paso.
  - Añadir una descripción detallada del paso configurado.
  - Configurar la **frecuencia de registro de datos**.

**-Guardado del método y ejecución:**

- Guardar el método configurado.
- Iniciar las corridas experimentales.

**-Ingreso de información de la muestra:**

- Completar los datos informativos que identifiquen cada corrida experimental.

**-Carga de la muestra:**

- Colocar el crisol en la balanza y realizar la **tarado**.
- Cargar la muestra según lo requerido, esperar la estabilización y fijar la masa.
- **Precaución:** Evitar que caiga cualquier tipo de material en la microbalanza para prevenir daños.

**-Limpieza de los crisoles:**

- Lavar los crisoles utilizados con solvente.
- Someterlos a **900°C en una mufla durante 2 horas** para su limpieza y reuso.

**Figura 49**

Equipo TGA - 4000 para para análisis termogravimétrico



**Figura 50**

Instalación para análisis en la TGA



➤ **Análisis de densidad aparente “Adap. ASTM E873”**

Es la relación entre la masa y el volumen de un material. Se pesó una cantidad de muestra y luego se llevó a un recipiente graduado donde se golpeó para la que la muestra se acomode en el recipiente. Se divide la masa entre el volumen hallado para determinar la densidad, como se muestra en la figura 51.

**Figura 51**

Determinación de la densidad aparente



**-Realización de las corridas experimentales, pesado de la muestra con componentes del reactor y E-cat.**

Se peso la muestra de NFU con el catalizador, el soporte de materia prima con materia prima, el reactor cargado en su totalidad, donde se le resta los 150 g de materia prima para

saber su peso al inicio, cuando se pesa al final de la pirolisis se puede restar ambos pesos y obtener el sólido en gramos, de la misma forma del tren de enfriamiento vacío y al final para saber el peso en gramos de líquido, de esta forma obtener por diferencia la cantidad de gases en gramos y dividir entre la alimentación total de 150 g de NFU para ver los rendimientos, como se muestra en las figuras 52 , 53, 54 y 55.

### **Figura 52**

Porta muestra de materia prima y catalizador listo para pesar y cargar



### **Figura 53**

Adición de catalizador a la porta muestra de materia prima



**Figura 54**

Armado y carga del reactor de Pirolysis

**Figura 55**

Peso del reactor armado con porta muestra de materia prima y catalizador



**-Acondicionamiento de los sensores de temperatura y del programa**

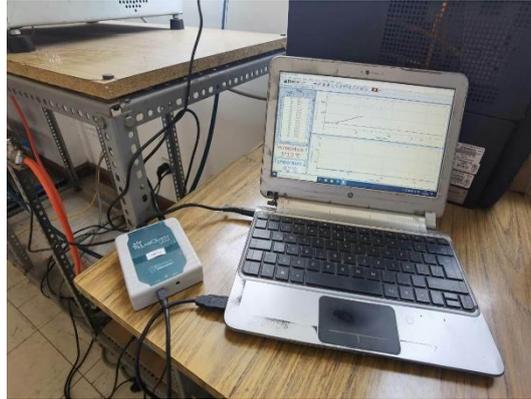
**Figura 56**

Acondicionamiento de la termo cupla en el reactor



**Figura 57**

Lectura de la temperatura en el reactor el software Logger Pro

**-Programación de la temperatura**

- Programación de la temperatura de operación en el reactor, como se muestra en la figura 58.

**Figura 58**

Programación de la temperatura de operación en el reactor

**-Puesta en marcha del reactor y condensación del producto**

- Recolector pesado antes del armado de sistema de recolección.

**Figura 59**

Recolector pesado antes de Reactor

**Figura 60**

Reactor, sistema de vacío y sistema de enfriamiento en funcionamiento



- Recolección y condensación del producto obtenido, pesado del recolector después de la pirolisis para obtener la cantidad en gramos de producto líquido, como se muestra en la figura 61.

**Figura 61**

Producto líquido pesado después de la pirolisis



**Figura 62**

Recolección de producto líquido del recolector



- Medida y rotulado de los productos colectados

**Figura 63**

Rotulado de los productos líquidos

**Figura 64**

Recolección y almacenamiento de productos sólidos



**Figura 65**

Recolección y almacenamiento de productos líquidos

**Figura 66**

Medición del volumen del producto líquido para la destilación D-86



#### **-Caracterización del Catalizador E-cat.**

- El catalizador fue suministrado por una refinera de petróleo local y corresponde al catalizador en circulación dentro de la unidad de FCC como se muestra en la tabla 9.

**Tabla 9**

Caracterización típica de catalizador de equilibrio de FCC

<b>Propiedad</b>	<b>Valor</b>
<b>Densidad aparente promedio (<math>g/cm^3</math>)</b>	<b>0.934</b>
<b>Tamaño promedio de partícula (<math>\mu m</math>)</b>	87.26
<b>Área Superficial Total (<math>m^2/g</math>)</b>	128
<b>Área Superficial Matriz (<math>m^2/g</math>)</b>	45
<b>MAT %</b>	65
<b>Volumen de poros (<math>cm^3/g</math>)</b>	0.32
<b>Composición</b>	
<b>Ni (ppm)</b>	2120
<b>V (ppm)</b>	2804
<b>Na (p/p)</b>	0.12
<b>Re2O3 (p/p)</b>	1.29
<b>Al2O3 (p/p)</b>	44.0
<b>Ratio Ni/V</b>	0.76

*Nota.* Adaptado de (Uriarte, 2018)

### **-E-cat recuperado**

Los catalizadores de zeolitas son utilizados en los experimentos de pirolisis, tanto fresco como regenerado, el catalizador al terminar el proceso de pirolisis se contamina por el coque, generando una pérdida de actividad en el catalizador, por lo cual se propone la regeneración de catalizador para futuras aplicaciones en procesos de pirolisis como lo estudiado por López et al. (2011) y (Ramos et al., 2020) quienes analizaron el efecto del catalizador fresco y regenerado en procesos de pirolisis el primero para neumáticos y el segundo en plásticos, la siguiente tabla con las condiciones operativas para la regeneración del catalizador fue tomada del segundo autor, debido a que fue el mismo catalizador empleada en la presente investigación como se ve en la tabla 10.

**Tabla 10**

Condiciones operativas para la regeneración del catalizador.

<b>Condiciones operativas para el tratamiento del catalizador</b>	
<b>Primera etapa: Deshidratación</b>	
<b>Temperatura (°C)</b>	120
<b>Velocidad de calentamiento (°C/min)</b>	60
<b>Tiempo(min)</b>	120
<b>Atmósfera</b>	Aire
<b>Segunda etapa: Calcinación</b>	
<b>Temperatura (°C)</b>	520
<b>Velocidad de calentamiento (°C/min)</b>	120
<b>Tiempo(min)</b>	300
<b>Atmósfera</b>	Aire

*Nota.* Adaptado de (Ramos et al., 2020)

- E-cat de base de bandeja para recuperado en mufla

**Figura 67**

E-cat de base de bandeja



- E-cat usado, recuperado y tratado

**Figura 68**

E-cat usado, recuperado y tratado



#### **-Análisis de los productos de pirolisis**

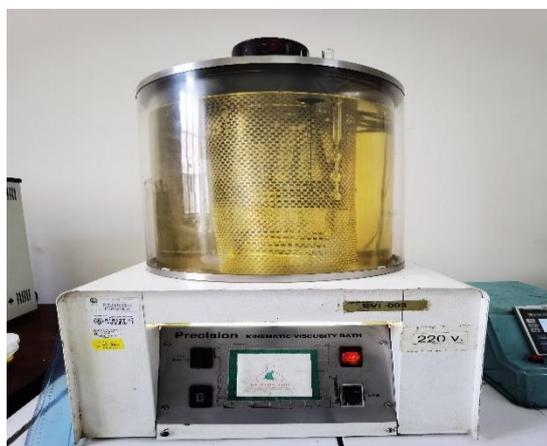
- **Viscosidad “ASTM D445”**

Se midió el tiempo en el cual la muestra fluye por gravedad a través de un capilar del viscosímetro a una temperatura controlada. La viscosidad se calculó multiplicando el tiempo

y la constante de calibración del viscosímetro. Usando el Baño de viscosidad cinemática BVI-003 y Aparato de viscosidad cinemática HK-265.

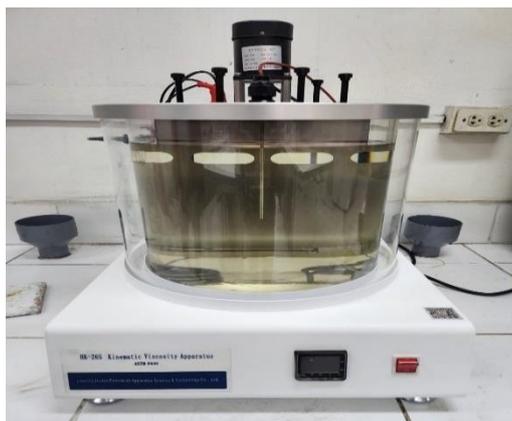
### Figura 69

Baño de viscosidad cinemática BVI-003



### Figura 70

Equipo de viscosidad cinemática HK-265



#### ➤ Porcentaje de humedad “ASTM D4377”

Después de homogeneizar la muestra de líquido con un homogeneizador, se extrajo una alícuota de la misma, se pesó la jeringa vacía y con muestra, por diferencia se obtuvo en mg la masa de la alícuota, se procedió a realizar la titulación potenciométrica utilizando el reactivo Karl Fischer (reacciona químicamente con el agua de la muestra) en un solvente mezclado. La titulación se lleva a cabo hasta alcanzar un punto final electrométrico.

**Figura 71**

Peso de jeringa para análisis Equipo de análisis de humedad de humedad

**Figura 72**

Equipo de análisis de humedad “ASTM D4377” Karl Fischer



➤ **Destilación “ASTM D86”**

Debido a que gracias al análisis anterior de % de humedad en el producto líquido, era perjudicial poner a destilar, se usó la norma ASTM D4007 que establece un método estándar para la determinación de agua y sedimentos en petróleo crudo y productos de petróleo mediante el uso de centrifugación. Este método implica llenar un recipiente específico con una muestra del producto y centrifugarlo para separar el agua y los sedimentos del petróleo.

**Figura 73**

Centrifuga para tratamiento de líquido pirolítico



Para la destilación “ASTM D86”, se utilizó 100 ml del producto obtenido en un equipo de destilación semiautomático con balón de muestra de líquido, termómetro para el control de temperatura y probeta para el % V. Durante este proceso se señalará la temperatura del punto final y las temperaturas para el 5 %, 10 %, 50 % y 90 % de destilado. Este análisis permite determinar los cortes característicos del producto obtenido y estos meterlo a un software como el DWSIM para comprobar sus propiedades en calidad.

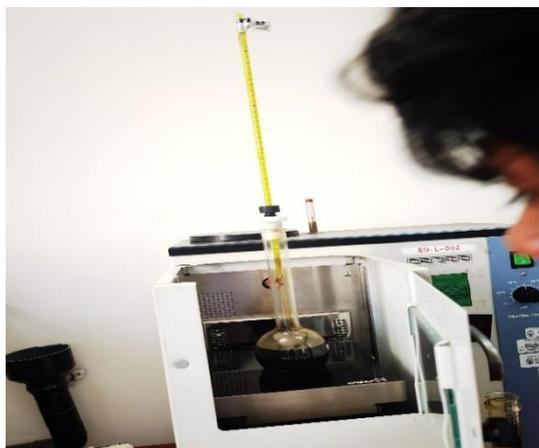
**Figura 74**

Destilación ASTM D86



**Figura 75**

Control de temperatura y %V de Destilación ASTM D86

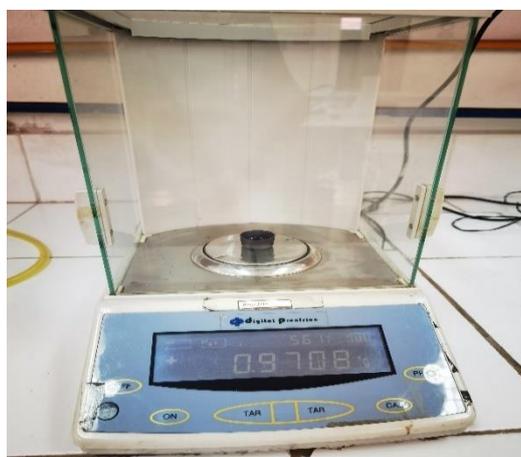


➤ **Análisis de poder calorífico “ASTM D-240” (liquido)**

Es la cantidad de calor producido al quemarse un combustible. Se colocó una muestra de aproximadamente 0.95-0.99 gramos en un calorímetro adiabático, donde se quemó en una atmósfera con oxígeno a presión bajo condiciones controladas. Esta propiedad fisicoquímica es determinada al observar la temperatura antes, durante y después de la combustión de la muestra.

**Figura 76**

Peso de líquido pirolítico análisis de poder calorífico



**Figura 77**

Análisis de poder calorífico “ASTM D240”



➤ **Densidad “ASTM D5002”**

Se uso un densímetro (Anton Parr DMA 35N) con 1 ml aproximadamente de la muestra, la cual se introdujo en un tubo de muestra por oscilación, para determinar la densidad se utiliza el cambio en la frecuencia de oscilación causada por el cambio de masa del tubo.

**Figura 78**

Densímetro DMA 35N



**Figura 79**

Análisis de densidad “ASTM D5002”

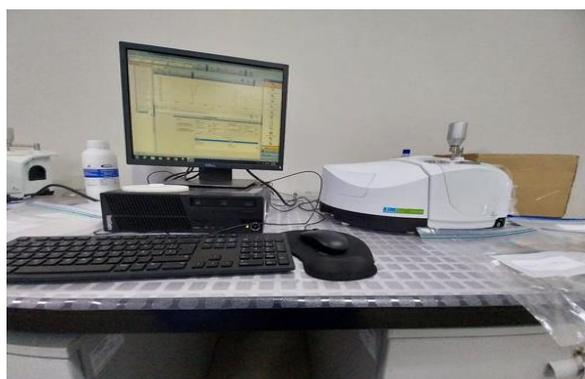


➤ **Análisis FTIR**

Se identificó la presencia de grupos funcionales en el producto líquido utilizando un espectrofotómetro de radiación infrarroja con transformada de Fourier (FTIR) IRAffinity-1 (Shimadzu Corp.) y el Software IRsolution versión 1.5. Para determinarlo se toma una muestra del producto líquido y se diluye en 20 ml de n-pentano, luego una alícuota de esta solución se colocó en una celda de cuarzo previamente escaneada. Se midió el espectro FTIR en el rango de 400 a 4600  $cm^{-1}$  y con una resolución de 4  $cm^{-1}$ . Se tomo 4 muestras que pertenecían a 500 °C (0, 10, 17.7 y 20 % E-cat).

**Figura 80**

Equipo para el análisis FTIR



## CAPÍTULO IV: RESULTADOS Y DISCUSIONES

### 4.1. Resultados

#### 4.1.1. Caracterización de la materia prima NFU y E-cat FCC

##### 4.1.1.1. Análisis Próximo y termogravimétrico a la materia prima

**Tabla 11**

Características de la materia prima

ENSAYO	METODO	RESULTADO
PODER CALORIFICO (MJ/kg)	ASTM D240	32.61
CONTENIDO DE HUMEDAD (%)	ASTM D7582	0.38
CONTENIDO DE CENIZA (%)	ASTM D7582	3.38
CONTENIDO DE VOLATILES (%)	ASTM D7582	66.3
CONTENIDO DE CARBÓN (%)	ASTM D7582	29.94
DENSIDAD APARENTE (g/cm <sup>3</sup> )	ASTM E873	0.44

El análisis próximo nos permite estimar la cantidad de humedad %, cenizas, carbón y de compuestos volátiles que son posibles de obtener, como se ve en la tabla 11, la gran variedad de neumáticos que existen y sus diferentes composiciones nos muestran que el contenido de volátiles dependerá del tamaño y tipo de neumático pero que el contenido de carbón es casi similar en los diversos casos como se observa en las discusiones de la caracterización de la materia prima NFU.

#### Parámetros Proxiales Evaluados

##### ➤ Pérdida de Humedad (36°C a 120°C):

- La ligera disminución de peso indica la evaporación de la humedad adsorbida.
- La gráfica muestra una pequeña pérdida de peso inicial que se estabiliza cuando la temperatura alcanza 120 °C.

➤ **Pérdida de Materia Volátil (120°C a 900°C):**

- La pérdida de peso significativa entre 120 °C y 900 °C corresponde a la liberación de materias volátiles.
- La gráfica muestra una notable disminución de peso en esta etapa, indicando la descomposición de componentes orgánicos volátiles.

➤ **Formación de Cenizas (a 700°C):**

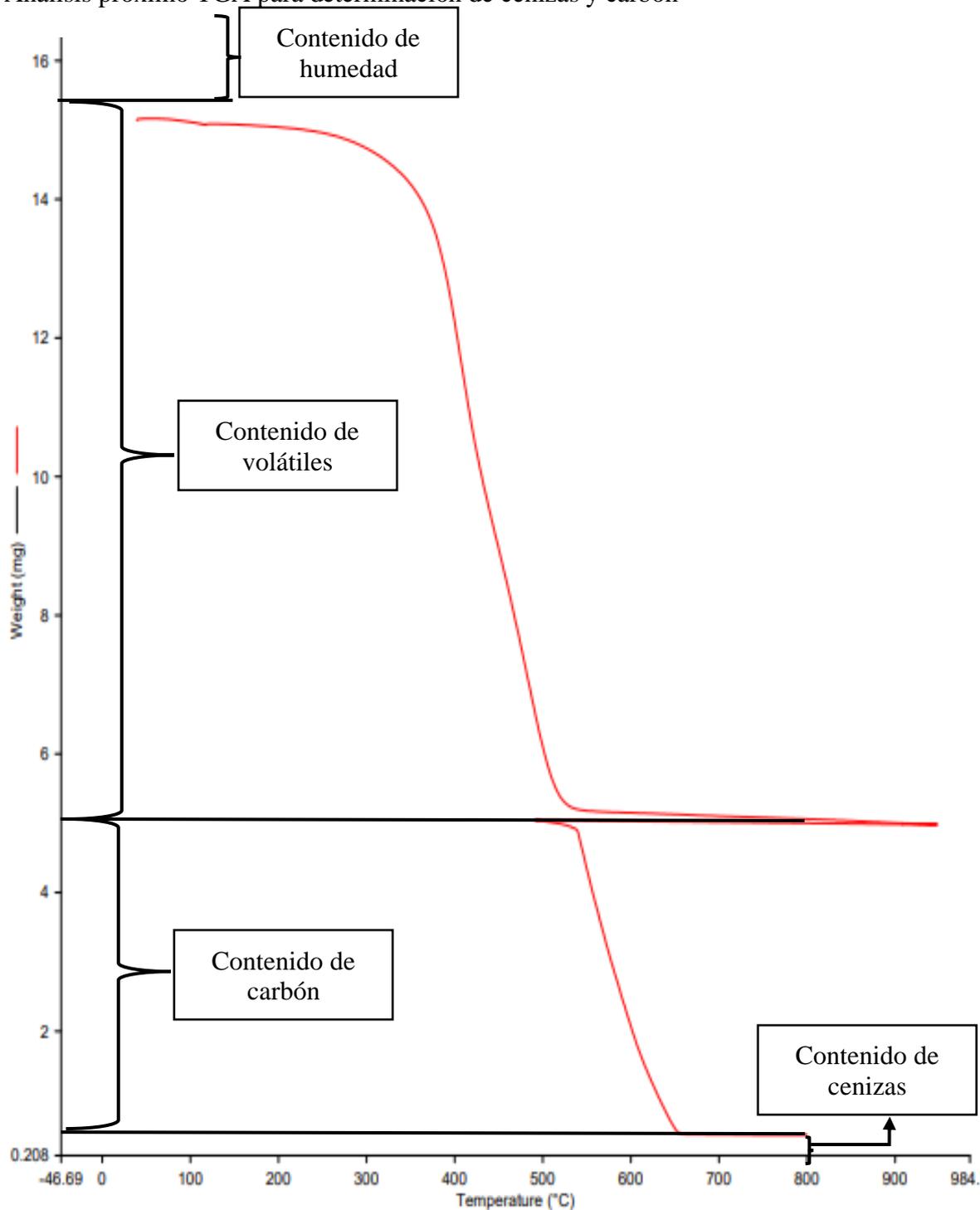
- La estabilización del peso alrededor de 700°C en atmósfera oxidante indica la cantidad de cenizas.
- La gráfica muestra una segunda estabilización en peso, representando la masa residual inorgánica tras la combustión completa.

➤ **Carbono Fijo:**

- Calculado indirectamente como el peso restante después de restar la humedad, materia volátil y cenizas del peso inicial.
- No se muestra directamente en la gráfica, pero es inferido de las pérdidas de peso registradas en cada etapa.

Figura 81

Análisis próximo TGA para determinación de cenizas y carbón

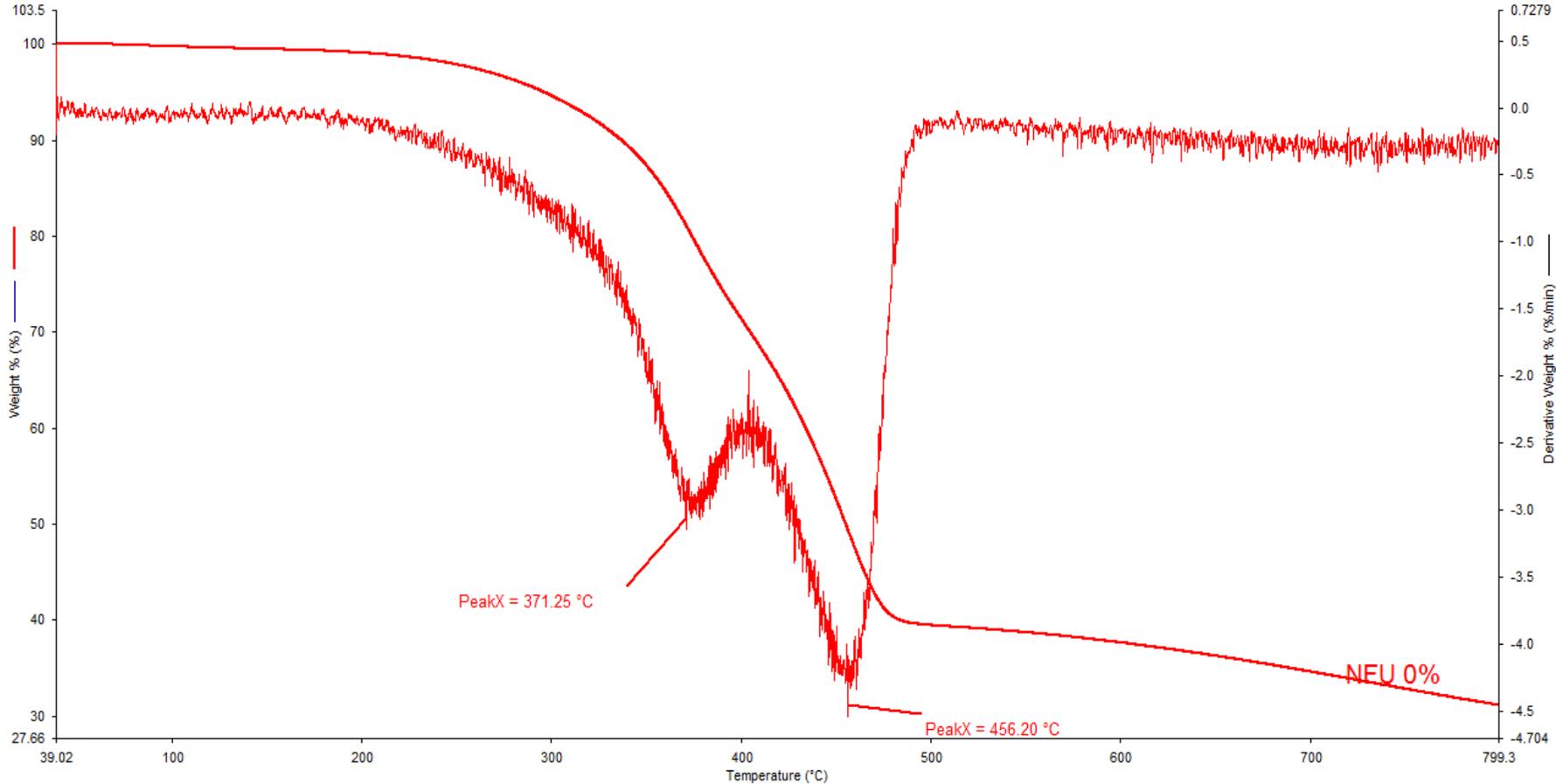


29/03/2023 17:38:41

- |   |   |
|---|---|
| 1) Heat from 36.00°C to 120.00°C at 50.00°C/min   | 4) Cool from 950.00°C to 450.00°C at 100.00°C/min |
| 2) Hold for 3.0 min at 120.00°C                   | 5) Heat from 450.00°C to 800.00°C at 100.00°C/min |
| 3) Heat from 120.00°C to 950.00°C at 100.00°C/min | 6) Hold for 3.0 min at 800.00°C                   |

Figura 82

Análisis termogravimétrico del NFU



El análisis termogravimétrico (TGA) como se muestra en la figura 84 de resultados , realizado a la materia prima con velocidad de calentamiento de 8 °C/min muestra el cambio de masa con respecto a la temperatura, se tiene dos “picos”, el primer “pico” a 371.25 °C y el segundo “pico” a 456.20 °C, donde se tiene 4 zonas de degradación, la primera zona se da antes de llegar los 300 °C , la segunda zona se da entre los 300-400 °C, la tercera zona a partir de los 400-500 °C y la 4 zona de los 500 °C en adelante, resultados similares a los expuestos por Menare (2019) donde obtienen la mayor pérdida de masa entre los 300 a 400 °C atribuido principalmente a la mezcla de caucho natural y al caucho sintético , como se muestra en la figura 82.

#### **4.1.1.2. Características del Catalizador**

Las propiedades del catalizador de equilibrio de FCC (E-Cat) fue detallado en la metodología. En la investigación realizada por Ramos et al. (2020), describe las características más importantes del catalizador las cuales son el tamaño de poro y el análisis BET, el cual determina la superficie específica de un material poroso y posterior a eso, se realizó la regeneración del catalizador con los cuales se elaboró la tabla 12.

La presente investigación tomo como base dichos resultados para caracterizar e intentar regenerar al catalizador para su posible reutilización.

**Tabla 12**

Propiedades del catalizador

<b>BET (<math>m^2/g</math>)</b>	<b>112</b>
<b>Tamaño de poro promedio (<math>\mu m</math>)</b>	4.6

*Nota.* Adaptado de (Ramos et al., 2020)**4.1.2. Determinación de rendimientos de los productos líquidos**

En la tabla 13 se presenta el rendimiento de productos líquidos, sólidos y gaseosos obtenidos mediante la realización de ensayos experimentales a las diferentes condiciones propuestas como son: la temperatura y la relación catalizador/materia prima. Se realizaron tres repeticiones por ensayo, en total 36 ensayos.

**Tabla 13**

Rendimiento de los productos de pirolisis en (%m/m)

N°	TEMPERATURA °C	%C/M.P.	%LIQUIDO	%GAS	%SOLIDO
C1	500	0	46.93	13.54	39.53
C2	500	0	46.93	9.27	43.80
C3	500	0	47.47	11.73	40.80
C4	500	10	51.07	8.46	40.47
C5	500	10	50.40	8.60	41.00
C6	500	10	49.73	10.87	39.40
C7	500	20	51.13	8.34	40.53
C8	500	20	53.67	8.73	37.60
C9	500	20	52.13	8.27	39.60
C10	550	0	46.87	12.06	41.07
C11	550	0	47.87	13.33	38.80
C12	550	0	50.40	10.73	38.87
C13	550	10	51.40	9.47	39.13
C14	550	10	49.87	11.13	39.00
C15	550	10	52.93	8.60	38.47
C16	550	20	52.40	9.87	37.73
C17	550	20	51.47	10.26	38.27
C18	550	20	49.47	12.13	38.40
C19	600	0	46.27	10.66	43.07
C20	600	0	50.33	12.27	37.40
C21	600	0	50.00	12.20	37.80
C22	600	10	51.87	10.46	37.67
C23	600	10	50.33	11.47	38.20
C24	600	10	52.40	9.53	38.07
C25	600	20	51.80	10.53	37.67
C26	600	20	50.53	11.14	38.33
C27	600	20	50.53	11.14	38.33
C28	650	0	48.53	13.27	38.20
C29	650	0	52.00	10.33	37.67
C30	650	0	50.00	11.80	38.20
C31	650	10	52.13	9.27	38.60
C32	650	10	51.60	9.87	38.53
C33	650	10	53.00	9.00	38.00
C34	650	20	48.80	13.33	37.87
C35	650	20	48.80	13.33	37.87
C36	650	20	48.80	13.33	37.87

## 4.2. Análisis estadístico

### 4.2.1. Análisis estadístico para el rendimiento de productos líquidos

En la tabla 14 se muestra 36 resultados de pruebas experimentales realizadas a 4 niveles de temperatura (500, 550, 600, 650 °C), 3 niveles de catalizador (0.10 y 20%) y 3 réplicas por nivel.

**Tabla 14**

Diseño Experimental Factorial 4x3x3 utilizado para el tratamiento estadístico de productos líquidos

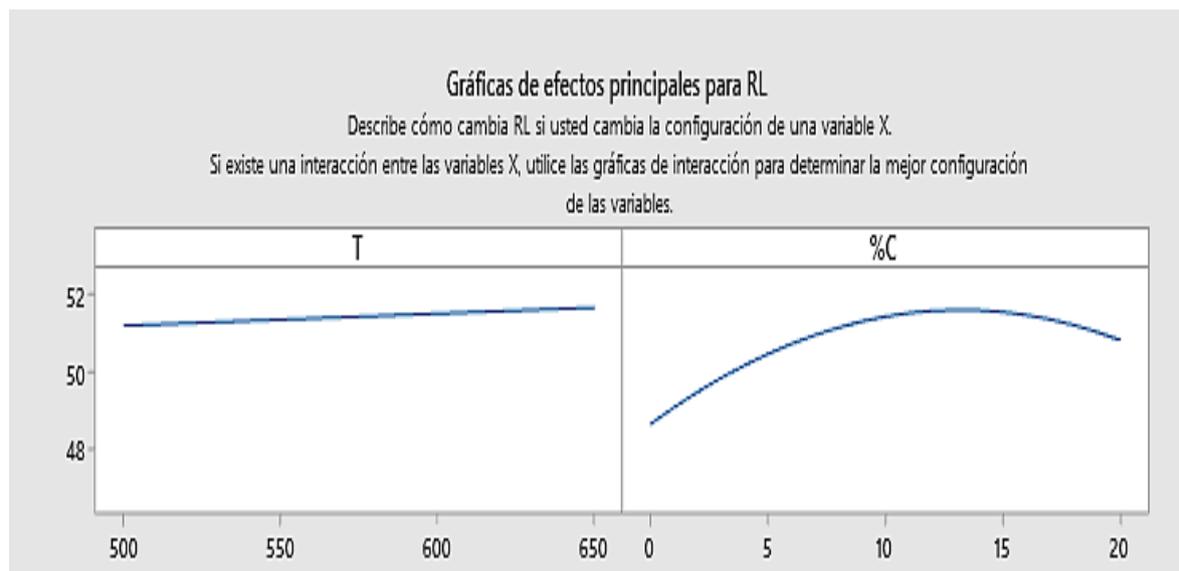
<b>RENDIMIENTO DE LIQUIDOS (%)</b>					
<b>FACTORES</b>			<b>FACTOR: Relación catalizador /Materia prima (%)</b>		
			Nivel 1	Nivel 2	Nivel 3
			<b>0</b>	<b>10</b>	<b>20</b>
<b>FACTOR: Temperatura (°C)</b>	Nivel 1	<b>500</b>	46.93	51.07	51.13
			46.93	50.4	53.67
			47.47	49.73	52.13
	Nivel 2	<b>550</b>	46.87	51.4	52.4
			47.87	49.87	51.47
			50.4	52.93	49.47
	Nivel 3	<b>600</b>	50.33	51.87	51.8
			50	50.33	50.53
			46.27	52.4	50.53
	Nivel 4	<b>650</b>	52	52.13	48.8
			50	51.6	48.8
			48.53	53	48.8

Existe cambios en los rendimientos de productos líquidos a medida que se cambia las condiciones operativas como se muestra en la figura 83, con el fin de examinar el efecto de las variables independientes con respecto de la variable dependiente, se llevó a cabo el análisis de regresión lineal múltiple utilizando los datos proporcionados.

Las variables consideradas como independientes en este análisis fueron la temperatura ( $^{\circ}\text{C}$ ) y catalizador/materia prima (%), mientras que la variable dependiente fue el rendimiento del producto líquido expresado en porcentaje. Para llevar a cabo el análisis estadístico, se empleó el software llamado "Minitab18".

### Figura 83

Efectos principales de la temperatura y % de Catalizador /MP para el rendimiento



En la tabla 15, se ilustran las medias y desviaciones estándares para el rendimiento de productos líquidos obtenidos por la interacción de las variables independientes mencionadas. De las medias, se deriva que el mayor rendimiento de producto líquido 52.31%, se produce a  $500^{\circ}\text{C}$  y a 20% de catalizador/materia prima.

**Tabla 15**

Descriptivos estadísticos para el rendimiento de productos líquidos

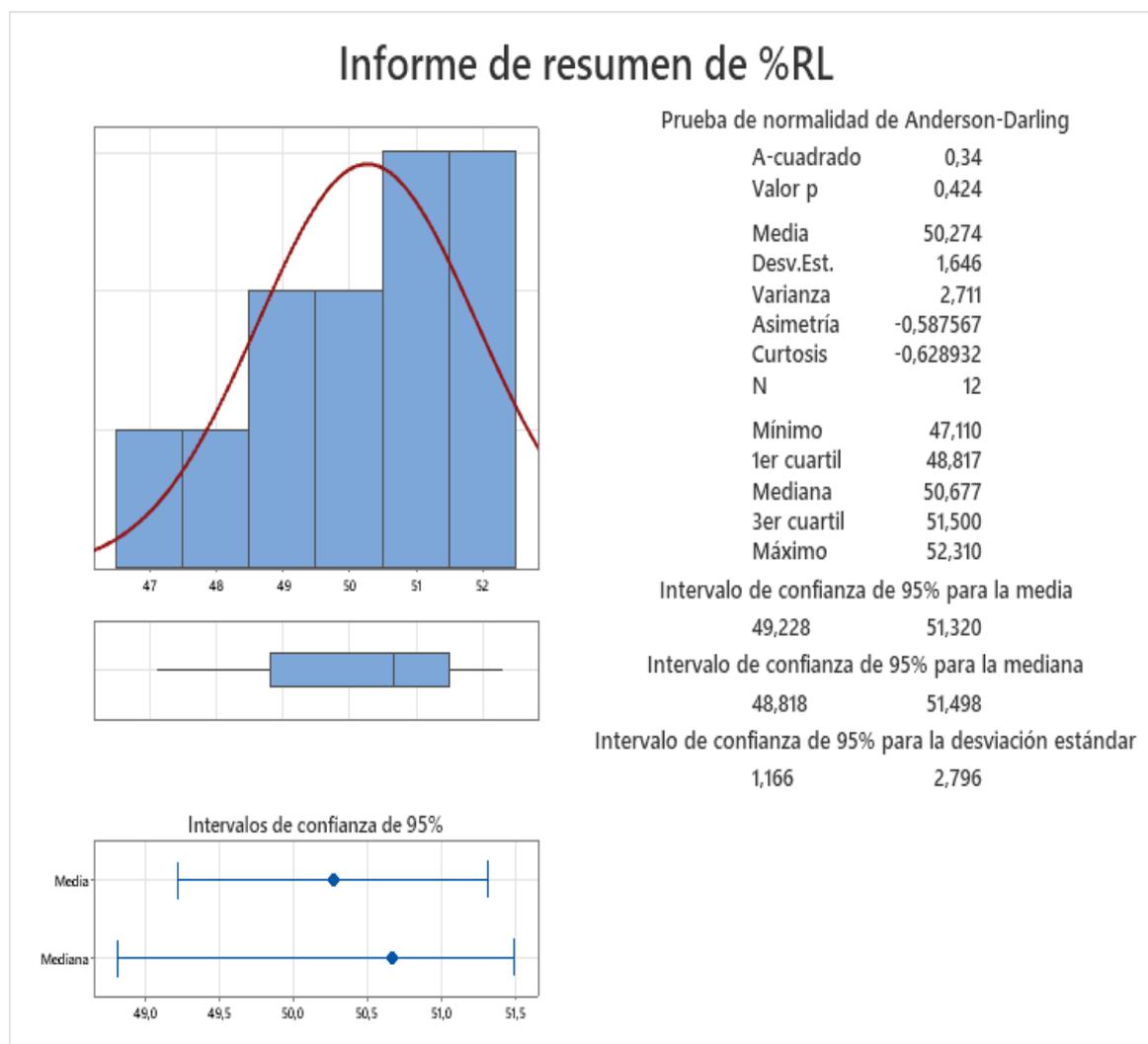
Temperatura(°C)	Relación catalizadora/MP (%)	<i>MEDIA (%)</i>	<i>DES. ESTANDAR (%)</i>	<i>VARIANZA (%)</i>	<i>MÍNIMO (%)</i>	<i>MEDIANA (%)</i>	<i>MAXIMO (%)</i>
500	0	47.11	0.312	0.097	46.93	46.93	47.47
	10	50.4	0.67	0.449	49.73	50.4	51.07
	20	52.31	1.28	1.637	51.13	52.13	53.67
550	0	48.38	1.82	3.31	46.87	47.87	50.4
	10	51.4	1.53	2.341	49.87	51.4	52.93
	20	51.11	1.497	2.242	49.47	51.47	52.4
600	0	48.87	2.25	5.08	46.27	50	50.33
	10	51.53	1.075	1.156	50.33	51.87	52.4
	20	50.95	0.733	0.538	50.53	50.53	51.8
650	0	50.18	1.74	3.03	48.53	50	52
	10	52.24	0.707	0.5	51.6	52.13	53
	20	48.8	0	0	48.8	48.8	48.8

**4.2.2. Prueba de normalidad para el rendimiento de productos líquidos**

El análisis del rendimiento de productos líquidos (%RL) mostró una distribución aproximadamente normal, como lo indica la prueba de normalidad de Anderson-Darling (A-cuadrado = 0.34,  $p = 0.424$ ). Los datos presentaron una media de 50.274 con una desviación estándar de 1.646, una asimetría de -0.587567 y una curtosis de -0.628932, con un rango de valores entre 47.110 y 52.310. Los intervalos de confianza al 95% para la media y la mediana fueron [49.228, 51.320] y [48.818, 51.498] respectivamente, y para la desviación estándar [1.166, 2.796]. Estos resultados sugieren una distribución ligeramente sesgada hacia la izquierda, pero dentro de los rangos esperados para una distribución normal.

**Figura 84**

Prueba de normalidad para el rendimiento de productos líquidos



### ***4.2.3. Análisis de la Influencia de la Temperatura y % Catalizador/ MP en el rendimiento de productos líquidos***

#### **-Hipótesis General.**

H0= La temperatura y la relación catalizador/materia prima no influyen en el rendimiento de los productos líquidos obtenidos por pirólisis catalítica al vacío de neumáticos fuera de uso de camiones cisternas.

H1= La temperatura y la relación catalizador/materia prima influyen en el rendimiento de los productos líquidos obtenidos por pirólisis catalítica al vacío de neumáticos fuera de uso de camiones cisternas.

La información de los factores de la investigación se muestra en la tabla 16.

**Tabla 16**

Información de los factores

<b>Factor</b>	<b>Tipo</b>	<b>Niveles</b>	<b>Valores</b>
<b>Temperatura</b>	<b>fijo</b>	<b>4</b>	<b>500, 550, 600, 650</b>
<b>%Catalizador /MP</b>	<b>fijo</b>	<b>3</b>	<b>0, 10, 20</b>

Variable dependiente: Rendimiento de productos líquidos.

Variables independientes: % de Catalizador /MP – Temperatura

-Análisis de varianza: El análisis de Varianza se utiliza para evaluar el efecto de dos o más variables independientes sobre una variable dependiente.

El análisis de varianza de rendimiento respecto a la temperatura y el % E-cat/MP se muestra en la tabla 17.

**Tabla 17**

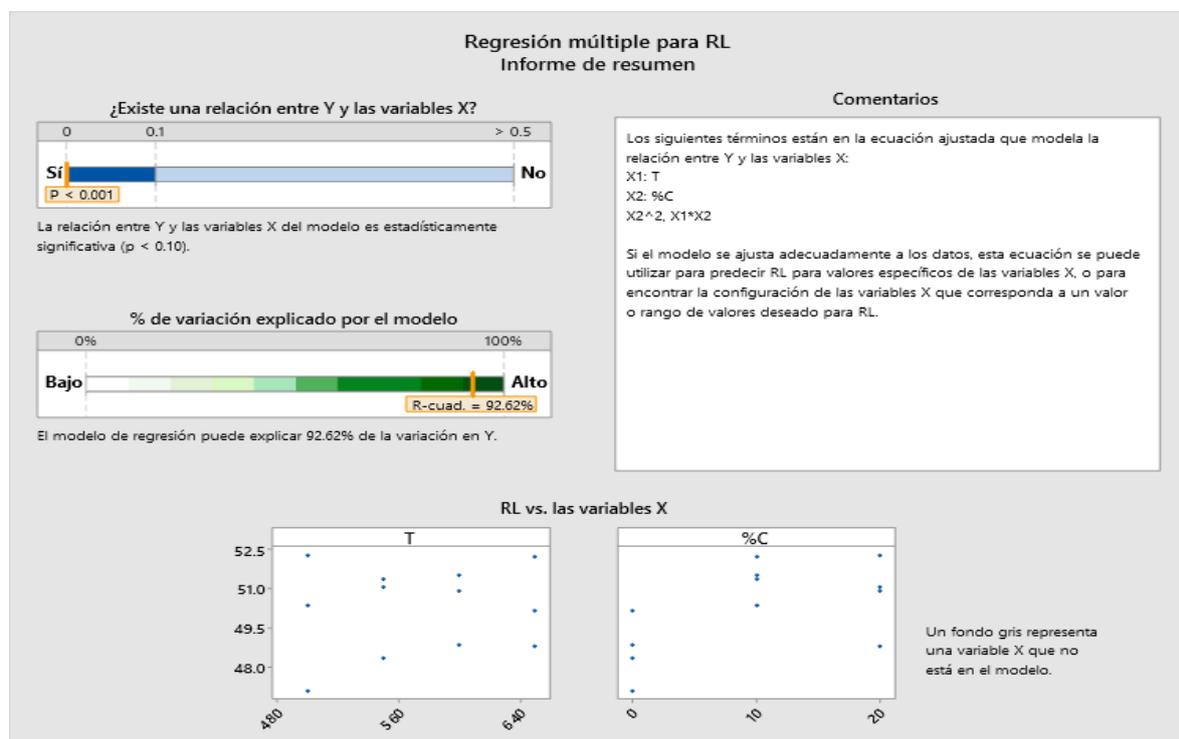
Análisis de varianza de rendimiento de productos líquidos respecto a la temperatura y % de Catalizador/MP

<b>Fuente</b>	<b>GL</b>	<b>SC Sec.</b>	<b>MC sec.</b>	<b>Valor F</b>	<b>Valor p</b>
<b>Regresión</b>	4	27.5805	6.8951	21.96	0.000
<b>T</b>	1	0.3619	0.3619	1.15	0.319
<b>%C</b>	1	9.3096	9.3096	29.65	0.001
<b>T*%C</b>	1	10.3938	10.3938	33.1	0.001
<b>%C*%C</b>	1	7.5152	7.5152	23.93	0.002
<b>Error</b>	7	2.1979	0.314		
<b>Total</b>	11	29.7785			

El análisis de varianza reveló que el valor F de Fisher obtenido, 21.96, es significativamente alto en comparación con el valor crítico de F. Esto indica una variabilidad notable en las medias del rendimiento de líquido debido a la interacción entre la temperatura y la relación catalizador/materia prima. Además, se observó que el valor p es menor a 0.001, lo cual es menor que el nivel de significancia establecido en  $\alpha=0.05$ , lo que implica que el resultado es estadísticamente significativo.

### Figura 85

Informe resumido de la Regresión Múltiple para el Rendimiento



Dado que el p valor es pequeño, se puede rechazar la hipótesis nula ( $H_0$ ), lo que sugiere que los resultados no son probablemente debido al azar. En otras palabras, se acepta la hipótesis alternativa ( $H_1$ ) que respalda la existencia de una relación significativa entre las variables analizadas.

El análisis de la figura 85 muestra cómo la temperatura ( $X_1$ ) y la relación catalizador/MP ( $X_2$ ) influyen en el rendimiento del producto líquido ( $Y$ ). Los resultados

obtenidos demuestran de manera concluyente que existe una relación estadísticamente significativa entre Y y X (X1 y X2), ya que el valor  $p < 0.001$ , lo cual es menor que el nivel de significancia establecido en  $\alpha = 0.05$ .

Por lo tanto, se rechaza la hipótesis nula (H0) que sugiere que la temperatura y la relación catalizador/ materia prima no influyen en el rendimiento de los productos líquidos obtenidos por pirólisis catalítica al vacío de neumáticos fuera de uso de camiones cisternas. En cambio, se acepta la hipótesis alternativa (H1), que indica la temperatura y la relación catalizador/ materia prima influyen en el rendimiento de los productos líquidos obtenidos por pirólisis catalítica al vacío de neumáticos fuera de uso de camiones cisternas.

Estos resultados son de gran relevancia, ya que proporcionan una base sólida para comprender cómo los factores específicos de temperatura y la relación catalizador/MP impactan en la producción líquidos obtenidos a partir de la pirólisis catalítica al vacío de neumáticos fuera de uso. Estos conocimientos podrían tener implicaciones importantes en la optimización de los procesos de pirólisis catalítica y en la mejora de la eficiencia y rendimiento de los productos obtenidos.

### **Tabla 18**

Resumen del modelo para la regresión lineal múltiple

<b>S</b>	<b>R-cuadrado</b>	<b>R-cuadrado(ajustado)</b>
0.560347	92.62%	88.40%

Adicionalmente, en la tabla 18 se muestra el valor de R (Raíz cuadrada media ajustada), el cual indica que el modelo de regresión es capaz de explicar el 88.40% de la variabilidad del modelo con respecto de la variabilidad total, se recomienda su aplicación debido a que el valor R- cuadrado ajustado es mayor al 70 %.

El análisis de regresión múltiple nos permite realizar las pruebas sobre coeficientes individuales del modelo la cual se resume en la tabla 19 y de la cual se obtiene la ecuación que permite relacionar el rendimiento de líquidos con la temperatura y la relación catalizador/MP.

**Tabla 19**

Análisis para el modelo de regresión múltiple

<b>Término</b>	<b>Coef</b>	<b>EE del coef.</b>	<b>Valor T</b>	<b>Valor p</b>	<b>FIV</b>
<b>Constante</b>	35.13	2.65	13.24	0.000	
<b>%C</b>	1,616	0.216	7.46	0.000	118.8
<b>T</b>	0.02348	0.00459	5.12	0.001	2.5
<b>%C*%C</b>	-0.0168	0.00344	-4.88	0.002	13
<b>%C*T</b>	-0.002038	0.000355	-5.73	0.001	108.3

$$RL=35.12 + 1.616 \%C + 0.02350 T - 0.01679 \%C*\%C - 0.002039 \%C*T \dots\dots(3)$$

Donde:

RL: Rendimiento de productos líquidos (%)

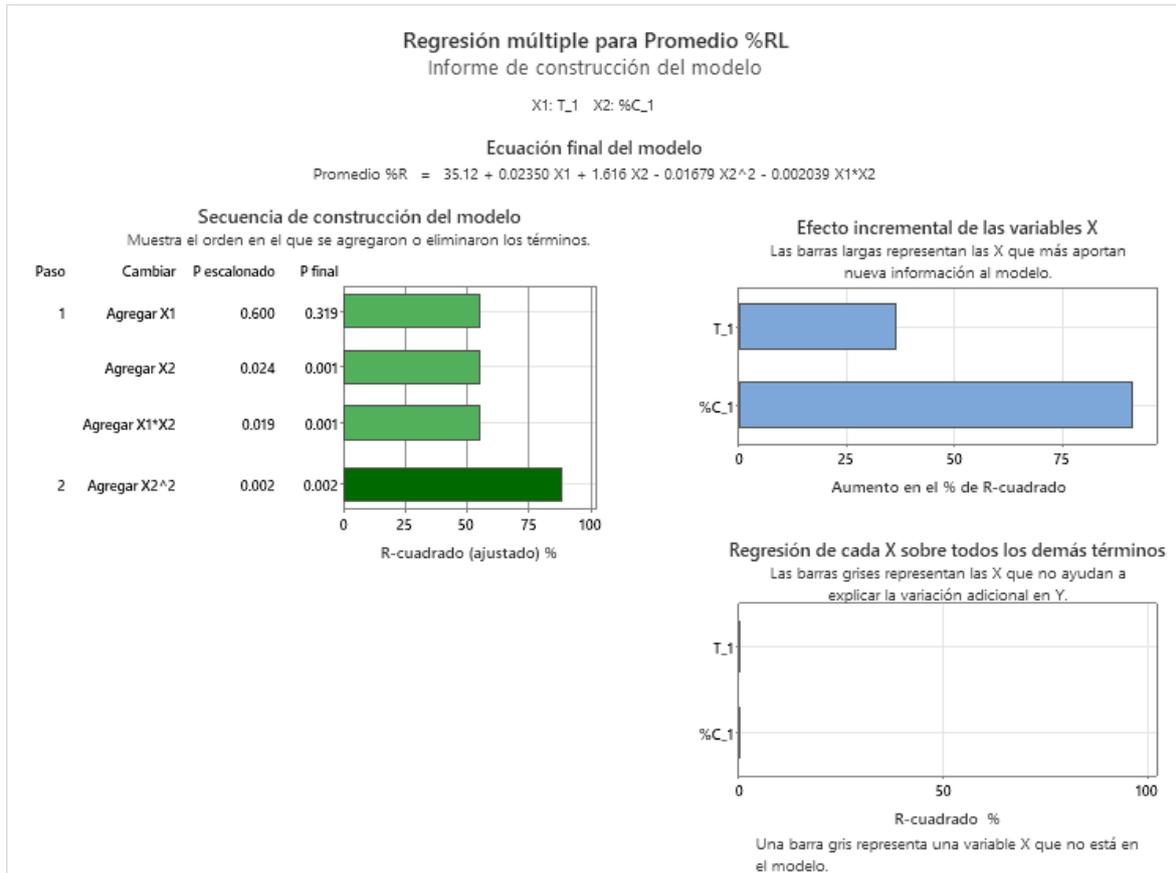
T= Temperatura (°C)

%C= Relación catalizador/materia prima

En la figura 86, se observa la influencia de cada variable sobre el rendimiento de líquidos. Se atribuye un 36.52% del efecto de la temperatura en el modelo. Mientras, que un 91.40% del efecto en el modelo se atribuye a la relación de Catalizador /MP (%), también nos presta la ecuación lineal del modelo que es la misma a la ecuación (3).

**Figura 86**

Informe resumido de la regresión múltiple para el rendimiento



#### 4.2.3.1. Análisis de la influencia de la temperatura en el rendimiento de productos líquidos

Con el fin de analizar el efecto individual que tiene la temperatura sobre el rendimiento de los productos líquidos obtenidos se realizó la regresión lineal simple.

H0= El efecto de la temperatura no influye en el rendimiento de los productos líquidos obtenidos por pirólisis catalítica al vacío de neumáticos fuera de uso de camiones cisternas.

H1= El efecto de la temperatura influye en el rendimiento de los productos líquidos obtenidos por pirólisis catalítica al vacío de neumáticos fuera de uso de camiones cisternas.

El análisis de varianza del rendimiento respecto a la temperatura se muestra en la tabla 16 con los datos llenados de Minitab 18.

**Tabla 20**

Análisis de varianza del rendimiento respecto a la temperatura

<b>Nota</b>	<b>GL</b>	<b>SC sec.</b>	<b>MC sec.</b>	<b>Valor F</b>	<b>Valor p</b>
<b>Regresión</b>	1	0.3619	0.3619	0.12	0.733
<b>Error</b>	10	29.4165	2.9417		
<b>Total</b>	11	29.7785			

Se detecta que el valor F de Fisher es 0.12 que es menor al valor F crítico por esto se acepta la hipótesis nula, a su vez el nivel de significancia 0.733 (mayor que 0.05), revelando que no existe una relación significativa entre las medias de la temperatura que es la variable independiente (X1) y las medias obtenidas para los rendimientos de productos líquidos como variable dependiente (Y1), esto refuerza el hecho de rechazar la hipótesis alternativa (H1).

**Tabla 21**

Resumen del modelo para la regresión lineal

<b>S</b>	<b>R-cuadrado</b>	<b>R-cuadrado(ajustado)</b>
1.71513	1.22%	0.00%

Además, en la tabla 21, se observa el valor de R (Raíz cuadrática media ajustado) indica que el modelo de regresión lineal puede explicar 0.00% de la variación en el rendimiento de líquidos. Este modelo brinda una ecuación que relaciona la temperatura del reactor con el rendimiento de los productos líquidos, pero no se recomienda su aplicación debido a que el valor R- cuadrado ajustado es menor al 70 % y su correlación es de 0.11.

$$RL = 48.49 + 0.00311 T \dots (4)$$

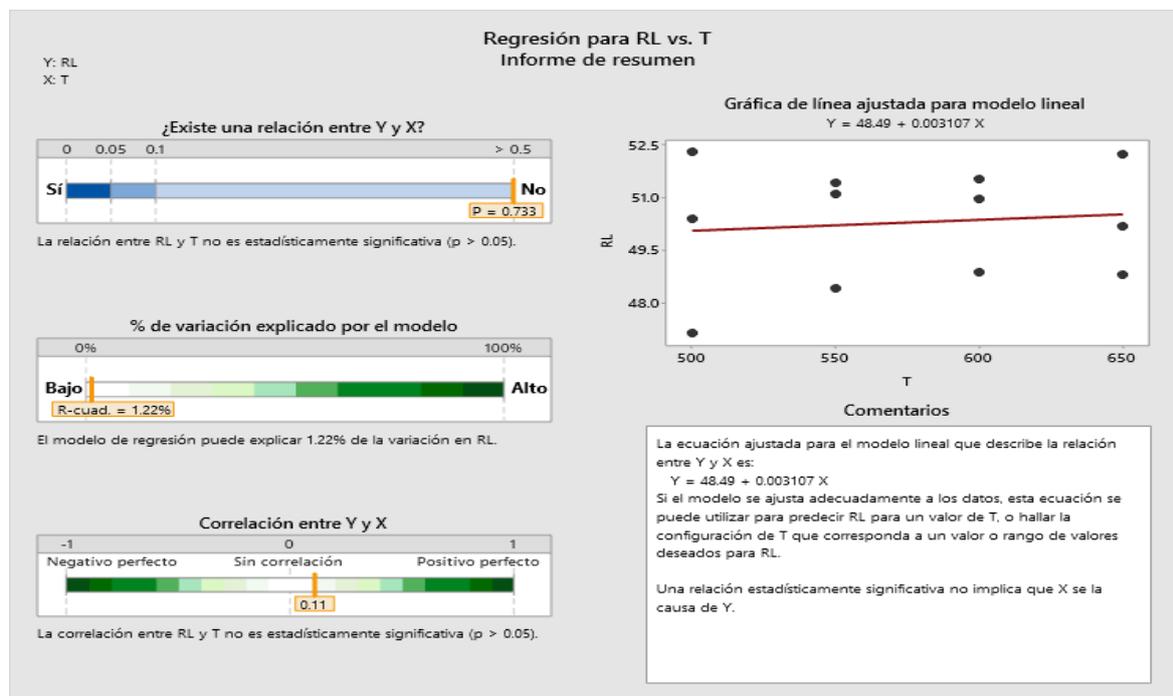
Donde:

RL: Rendimiento de productos líquidos (%)

T= Temperatura (°C)

### Figura 87

Informe resumido de la regresión simple para el rendimiento de productos líquidos vs temperatura



#### 4.2.3.2. Análisis de la influencia del % de catalizador /MP en el rendimiento de productos líquidos

Con el fin de analizar el efecto individual que tiene la relación catalizador/materia prima sobre el rendimiento de los productos líquidos obtenidos se realizó la regresión lineal simple.

H0= La relación catalizadora/materia prima no influye en el rendimiento de los productos líquidos por pirólisis catalítica al vacío de neumáticos fuera de uso de camiones cisternas.

HI= La relación catalizadora/materia prima influye en el rendimiento de los productos líquidos por pirólisis catalítica al vacío de neumáticos fuera de uso de camiones cisternas.

El análisis de varianza del rendimiento respecto a la relación catalizador/materia prima se muestra en la tabla 19 con los datos llenados de Minitab 18.

**Tabla 22**

Análisis de varianza de rendimiento respecto a la relación catalizador/materia prima

<b>Nota</b>	<b>GL</b>	<b>SC sec.</b>	<b>MC sec.</b>	<b>Valor F</b>	<b>Valor p</b>
<b>Regresión</b>	2	16.82	8.412	5.84	0.024
<b>Error</b>	9	12.95	1.439		
<b>Total</b>	11	29.78			

Se detecta que el valor F de Fisher es 5.84 que mayor al valor F crítico por esto se acepta la hipótesis alternativa, con un nivel de significancia de 0.024 (menor que 0.05), revelando existe una relación significativa entre las medias de la relación catalizador/MP que es la variable independiente (X1) y las medias obtenidas para los rendimientos de productos líquidos como variable dependiente (Y1), esto refuerza el hecho de rechazar la hipótesis nula (H0).

**Tabla 23**

Resumen del modelo para la regresión lineal

<b>S</b>	<b>R-cuadrado</b>	<b>R-cuadrado(ajustado)</b>
1.19971	56.50%	46.83%

Además, en la tabla 23, se observa el valor de R (Raíz cuadrática media ajustada) indica que el modelo de regresión lineal puede explicar 46.83% de la variabilidad del modelo con respecto de la variabilidad total. Este modelo brinda la ecuación que relaciona la relación

catalizador/materia prima con el rendimiento de los productos líquidos, pero no se recomienda su aplicación debido a que el valor R- cuadrado ajustado es menor al 70 %.

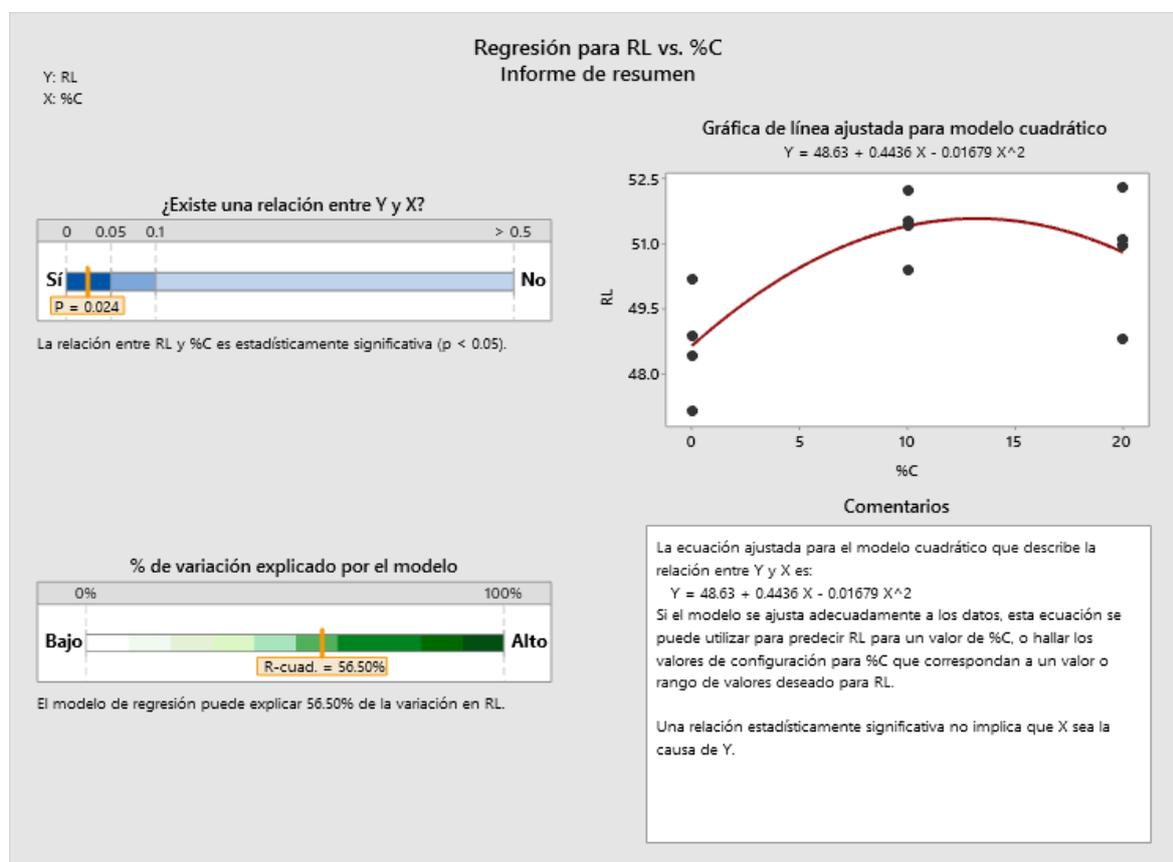
$$RL=48.635 + 0.444 \%C - 0.01679 \%C*\%C.....(5)$$

Donde:

RL: Rendimiento de productos líquidos (%); %C= Relación catalizador/materia.

### Figura 88

Informe resumido de la regresión simple para el rendimiento de productos líquidos vs la relación catalizador/ materia prima

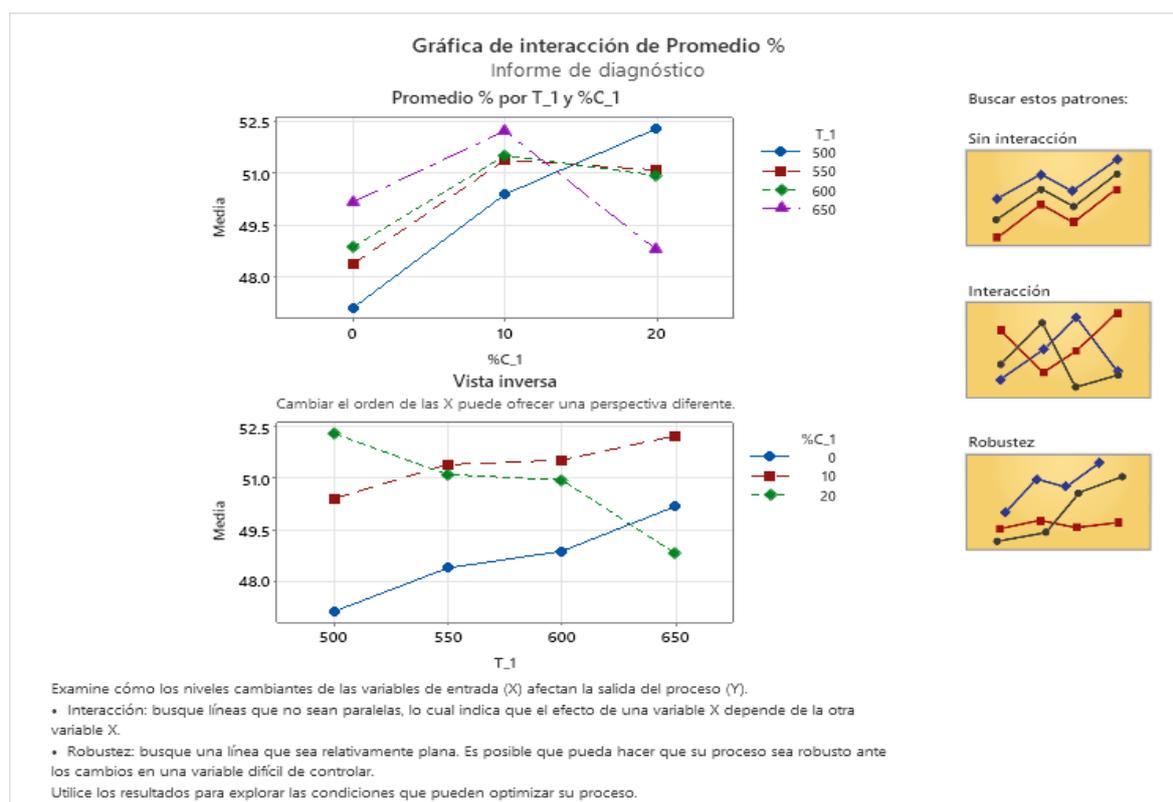


### 4.2.3.3. Interacción productos líquidos con respecto a la temperatura y la relación catalizador/materia prima

En la figura 89 se muestra la gráfica de interacción realizada con los promedios para los rendimientos de los productos líquidos obtenidos.

**Figura 89**

Interacción del rendimiento de los productos líquidos de la pirolisis



La interacción sugiere varias inferencias en términos de interacción significativa, tendencias y robustez del proceso de pirolisis, en función de la temperatura y el porcentaje de catalizador.

#### **Interacción significativa:**

La interacción entre las dos variables (temperatura y porcentaje de catalizador) es evidente debido a que las líneas no son paralelas. Esto indica que el efecto de una variable depende de la otra. Por ejemplo, a temperaturas más bajas (500-550 °C), el aumento del

porcentaje de catalizador tiende a mejorar el rendimiento, especialmente en el caso del 10%, lo que sugiere que el catalizador es más efectivo en ese rango de temperatura. Sin embargo, a temperaturas más altas (600-650 °C), el efecto del catalizador se invierte, particularmente al 20%, donde se observa una disminución del rendimiento con el incremento de la temperatura. Esta interacción refleja la necesidad de un balance adecuado entre temperatura y contenido de catalizador para maximizar el rendimiento.

### **Tendencias:**

En cuanto a las tendencias observadas, se aprecia que a 0% de catalizador (pirolisis térmica), el rendimiento crece progresivamente con el aumento de la temperatura, alcanzando su punto máximo de 50.18% a 650 °C. Para un 10% de catalizador, el comportamiento es similar, con una tendencia creciente a medida que aumenta la temperatura, pero con un rendimiento superior al de la pirolisis térmica, alcanzando 52.24% a 650 °C. Sin embargo, con un 20% de catalizador, la tendencia se revierte: el rendimiento es máximo a 500 °C (52.31%) y disminuye a medida que la temperatura aumenta. Esta tendencia decreciente con mayor contenido de catalizador a temperaturas más altas subraya la importancia de controlar ambos factores para obtener un rendimiento óptimo.

### **Robustez:**

La robustez del proceso puede observarse en la estabilidad del rendimiento ante cambios en las variables. A temperaturas más bajas (500-550 °C), el proceso parece ser más robusto, ya que el rendimiento es menos sensible a variaciones en el porcentaje de catalizador, particularmente entre el 0% y el 10%. Sin embargo, a temperaturas más altas (600-650 °C), la variabilidad en el rendimiento aumenta considerablemente, especialmente con un contenido de catalizador del 20%. Esto implica que, a mayores temperaturas, el proceso es más sensible a fluctuaciones en las condiciones operativas, lo que reduce la robustez y aumenta la necesidad de un control más preciso.

#### 4.2.3.4. Obtención del mayor rendimiento de productos líquidos.

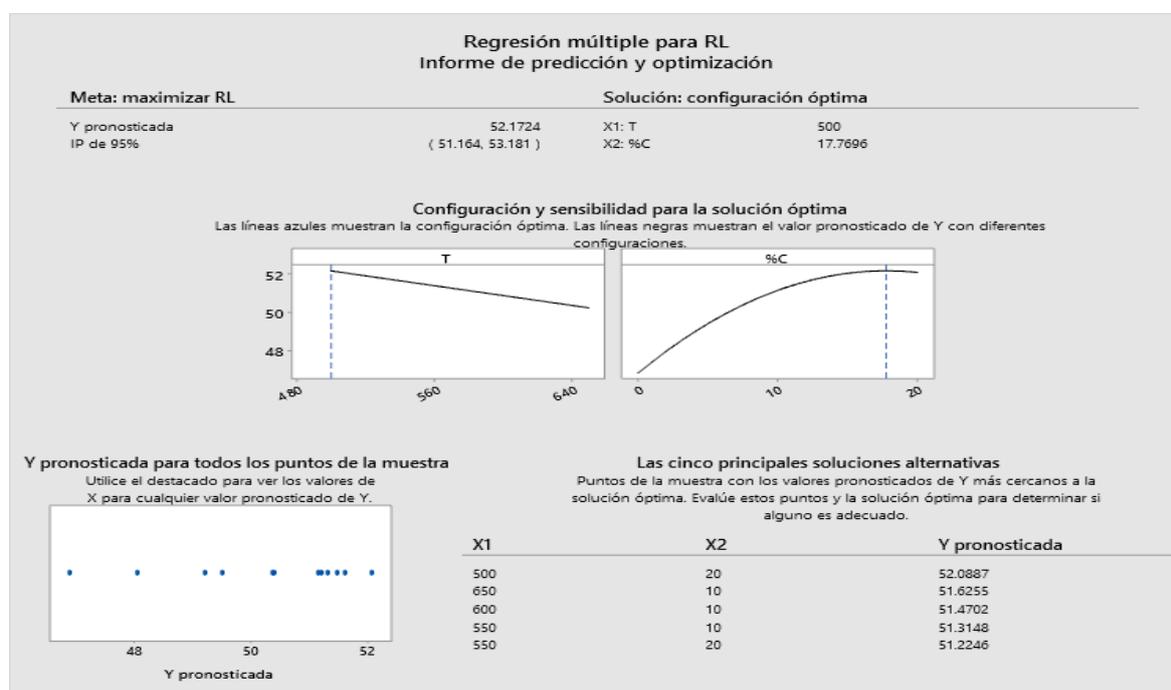
Los modelos de regresión también se pueden utilizar para maximizar procesos. Por ejemplo, se puede hacer encontrando el valor adecuado que minimice o maximice el valor de una variable para mejorar o controlar el proceso (Zurita, 2010).

Con el análisis de regresión, es posible obtener la temperatura y la relación catalizador/ materia prima que maximizan el rendimiento de líquidos. En la figura 90, se observa que la temperatura es 500 °C y la relación de Catalizador /MP(%) es 17.76%, para un rendimiento de líquido máximo de 52.17% con un nivel de confianza de 95%.

Al realizar la corroboración experimental para las variables que maximizan el rendimiento de productos líquidos se obtuvo para la temperatura de 500 °C y la relación de Catalizador /MP (%) de 17.76%, fue de 52,40 % para los productos líquidos, 7.93 % para los gases y 39.67 % para los sólidos.

#### Figura 90

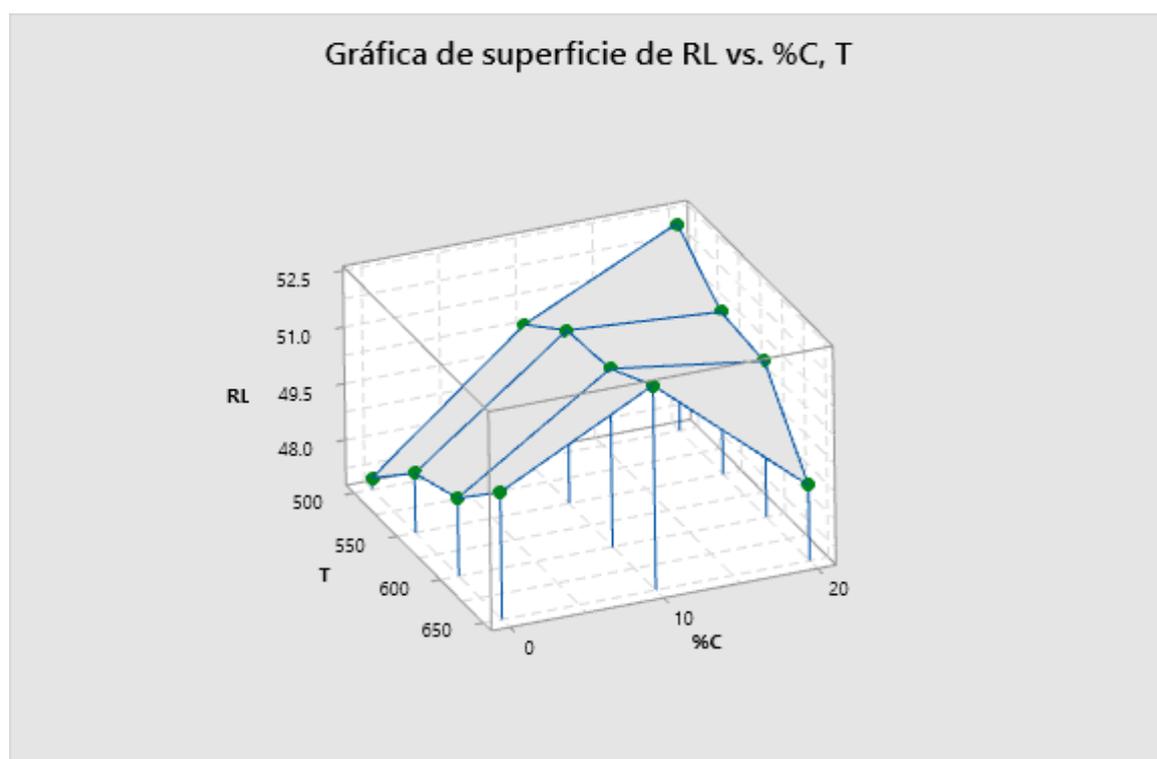
Informe de predicción para la obtención del mayor rendimiento de productos líquidos



La grafica de superficie elaborada con los datos presentados en la tabla 15, nos permiten evaluar de manera visual el comportamiento térmico y catalítico en función del rendimiento de productos líquidos obtenidos por pirolisis para la presente investigación, pero con la cantidad de datos presentes la gráfica de superficie solo nos presenta tendencias lineales, como se muestra en la figura 91.

### Figura 91

Grafica de malla para la pirolisis térmica y catalítica



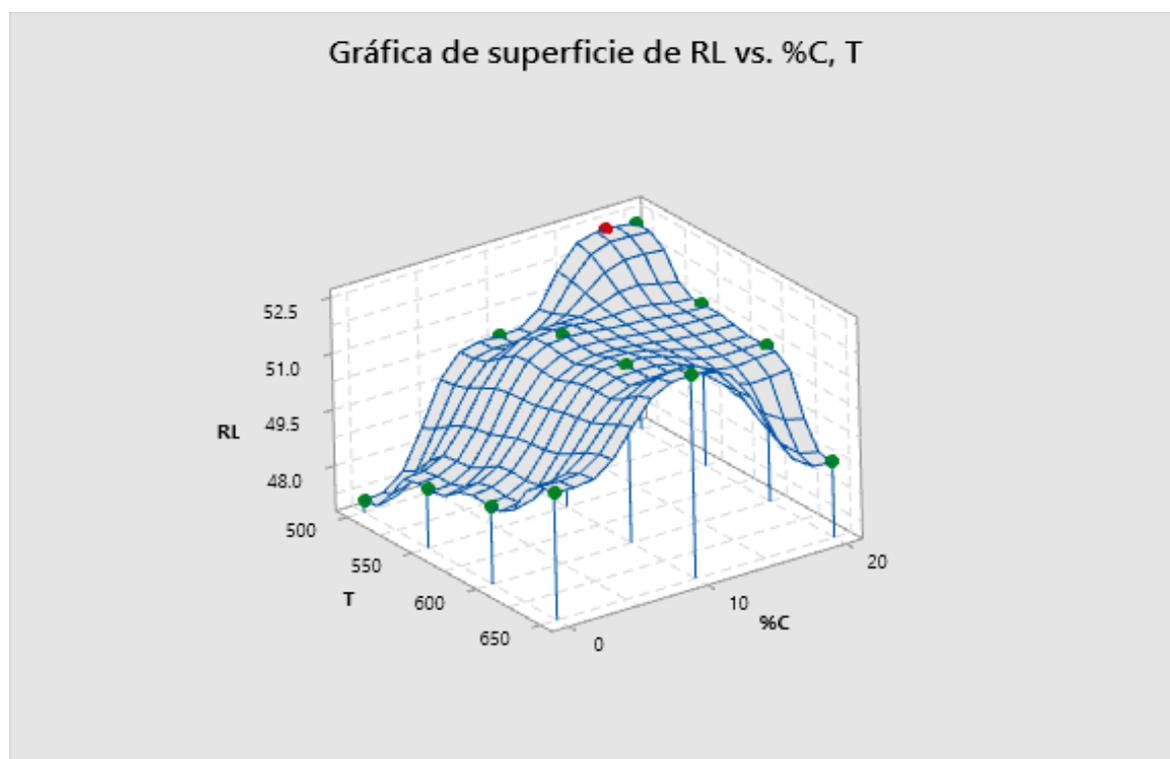
Las figuras 92, grafica de superficie que fue realizada con el punto máximo propuesto obtenido experimentalmente, la cual nos muestra que las tendencias no son lineales, son curvas con máximos y mínimos, estas gráficas son especialmente útiles cuando se quiere analizar la relación compleja entre las dos variables independientes y la variable dependiente, para comprender cómo interactúan entre sí. Permiten identificar patrones, tendencias y áreas de mayor o menor valor en la superficie. Además, pueden ser rotadas y

visualizadas desde diferentes ángulos para obtener una perspectiva más completa de la relación tridimensional.

La gráfica de superficie y los datos experimentales confirman que una temperatura de 500 °C y una relación catalizador/materia prima del 17.76% maximizan el rendimiento de líquidos al 52.17%, validado experimentalmente con un 52.40% de rendimiento de líquidos, 7.93% de gases y 39.67% de sólidos. Estos resultados permiten mejorar el proceso industrial, asegurando la mayor eficiencia y rentabilidad, y establecen un marco confiable para el control de calidad y la planificación del escalamiento del proceso.

### Figura 92

Grafica de malla considerando el punto máximo para la pirolisis térmica y catalítica



#### *4.2.4. Análisis estadístico para el rendimiento de productos gaseosos*

En la tabla 24 se muestra 36 resultados de pruebas experimentales realizadas a 4 niveles de temperatura (500, 550, 600, 650 °C), 3 niveles de catalizador (0.10 y 20%) y 3 réplicas por nivel.

**Tabla 24**

Diseño Experimental Factorial 4x3x3 utilizado para el tratamiento estadístico de productos gaseosos

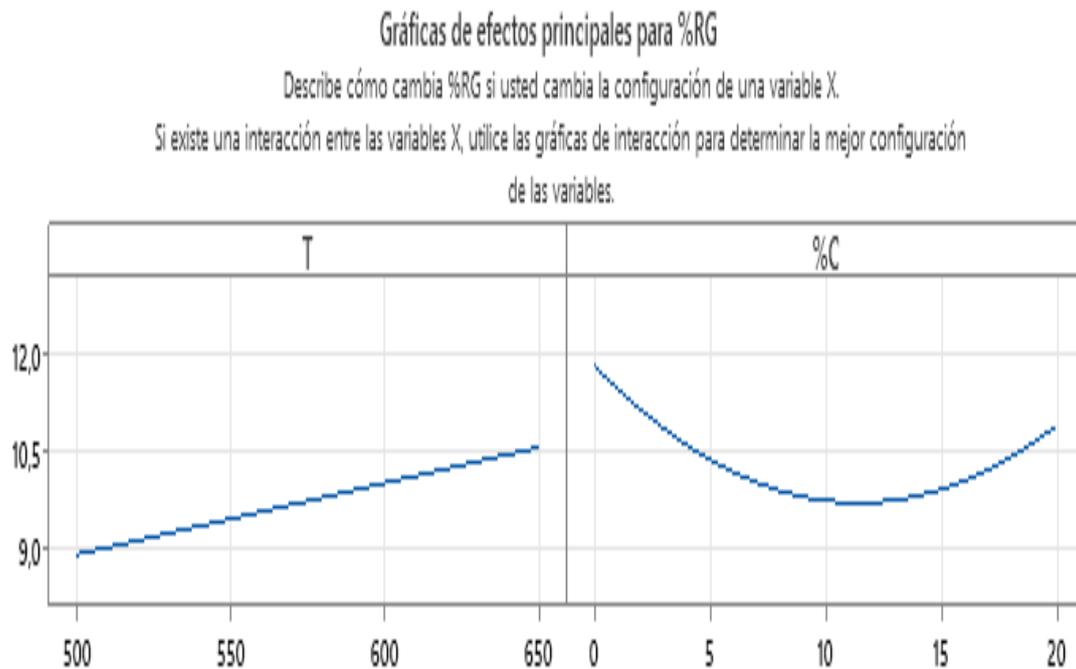
<b>RENDIMIENTO DE GASEOSOS (%)</b>					
<b>FACTORES</b>			<b>FACTOR: Relación catalizador /Materia prima (%)</b>		
			Nivel 1	Nivel 2	Nivel 3
			<b>0</b>	<b>10</b>	<b>20</b>
<b>FACTOR: Temperatura (°C)</b>	Nivel 1	<b>500</b>	13.54	8.46	8.34
			9.27	8.6	8.73
			11.73	10.87	8.27
	Nivel 2	<b>550</b>	12.06	9.47	9.87
			13.33	11.13	10.26
			10.73	8.6	12.13
	Nivel 3	<b>600</b>	10.66	10.46	10.53
			12.27	11.47	11.14
			12.2	9.53	11.14
	Nivel 4	<b>650</b>	13.27	9.27	13.33
			10.33	9.87	13.33
			11.8	9	13.33

Existe cambios en los rendimientos de productos gaseosos a medida que se cambia las condiciones operativas como se muestra en la figura 93, con el fin de examinar el efecto de las variables independientes con respecto de la variable dependiente, se llevó a cabo el análisis de regresión lineal múltiple utilizando los datos proporcionados.

Las variables consideradas como independientes en este análisis fueron la temperatura (°C) y catalizador/materia prima (%), mientras que la variable dependiente fue el rendimiento del producto gaseoso expresado en porcentaje.

**Figura 93**

Efectos principales de la temperatura y % de Catalizador /MP para el rendimiento de productos gaseosos



En la tabla 25, se ilustran las medias y desviaciones estándares para el rendimiento de productos gaseosos obtenidos por la interacción de las variables independientes mencionadas. De las medias, se deriva que el mayor rendimiento de producto gaseoso 13.33%, se produce a 600 °C y a 20% de catalizador/materia prima.

**Tabla 25**

Descriptivos estadísticos para el rendimiento de productos gaseosos

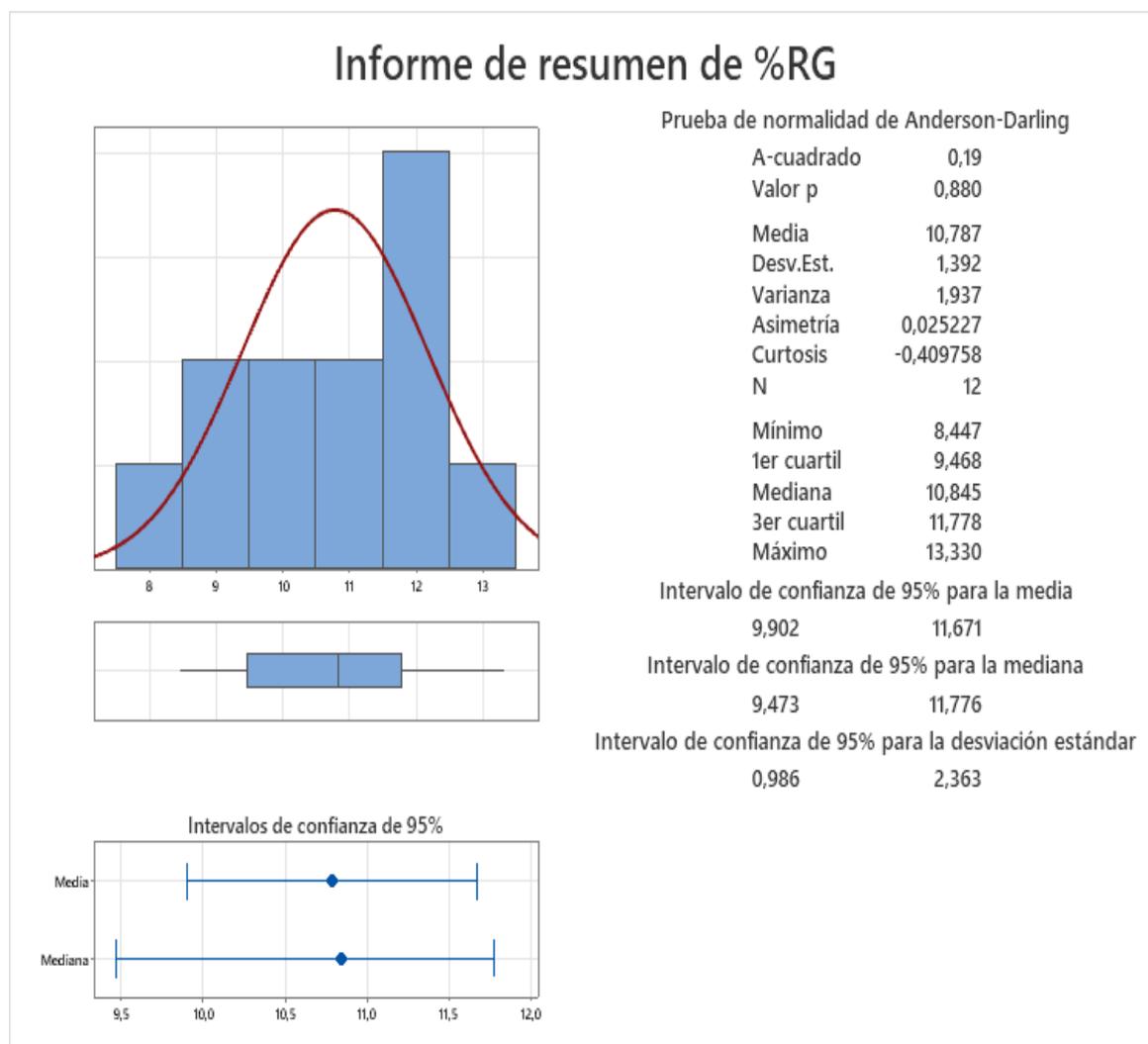
Temperatura(°C)	Relación catalizadora/MP (%)	<i>MEDIA</i> (%)	<i>DES. ESTANDAR</i> (%)	<i>VARIANZA</i> (%)	<i>MÍNIMO</i> (%)	<i>MEDIANA</i> (%)	<i>MAXIMO</i> (%)
500	0	11.510	2.140	4.590	9.270	11.730	13.540
	10	9.310	1.353	1.830	8.460	8.600	10.870
	20	8.447	0.248	0.061	8.270	8.340	8.730
550	0	12.040	1.300	1.690	10.730	12.060	13.330
	10	9.733	1.285	1.652	8.600	9.470	11.130
	20	10.753	1.208	1.459	9.870	10.260	12.130
600	0	11.710	0.910	0.828	10.660	12.200	12.270
	10	10.487	0.970	0.941	9.530	10.460	11.470
	20	10.937	0.352	0.124	10.530	11.140	11.140
650	0	11.800	1.470	2.161	10.330	11.800	13.270
	10	9.380	0.445	0.198	9.000	9.270	9.870
	20	13.330	0.000	0.000	13.330	13.330	13.330

#### ***4.2.5. Prueba de normalidad para el rendimiento de productos gaseosos***

El análisis del rendimiento de productos gaseosos (%RG) mostró una distribución aproximadamente normal, como lo indica la prueba de normalidad de Anderson-Darling (A-cuadrado = 0.19,  $p = 0.880$ ). Los datos presentaron una media de 10.787 con una desviación estándar de 1.392, una asimetría de 0.025227 y una curtosis de -0.409758, con un rango de valores entre 8.447 y 13.330. Los intervalos de confianza al 95% para la media y la mediana fueron [9.902, 11.671] y [9.473, 11.776] respectivamente, y para la desviación estándar [0.986, 2.363]. Estos resultados sugieren una distribución casi simétrica, dentro de los rangos esperados para una distribución normal.

**Figura 94**

Prueba de normalidad para el rendimiento de productos gaseosos



#### ***4.2.6. Análisis de la Influencia de la Temperatura y % Catalizador/ MP en el rendimiento de productos gaseosos***

##### **-Hipótesis General.**

H0= La temperatura y la relación catalizador/materia prima no influyen en el rendimiento de los productos gaseosos obtenidos por pirólisis catalítica al vacío de neumáticos fuera de uso de camiones cisternas.

H1= La temperatura y la relación catalizador/materia prima influyen en el rendimiento de los productos gaseosos obtenidos por pirólisis catalítica al vacío de neumáticos fuera de uso de camiones cisternas.

La información de los factores de la investigación se muestra en la tabla 26.

**Tabla 26**

Información de los factores

<b>Factor</b>	<b>Tipo</b>	<b>Niveles</b>	<b>Valores</b>
<b>Temperatura</b>	<b>fijo</b>	<b>4</b>	<b>500, 550, 600, 650</b>
<b>%Catalizador /MP</b>	<b>Fijo</b>	<b>3</b>	<b>0, 10, 20</b>

Variable dependiente: Rendimiento de productos gaseosos.

Variables independientes: % de Catalizador /MP – Temperatura

-Análisis de varianza: El análisis de Varianza se utiliza para evaluar el efecto de dos o más variables independientes sobre una variable dependiente.

El análisis de varianza de rendimiento respecto a la temperatura y el % E-cat/MP se muestra en la tabla 27.

**Tabla 27**

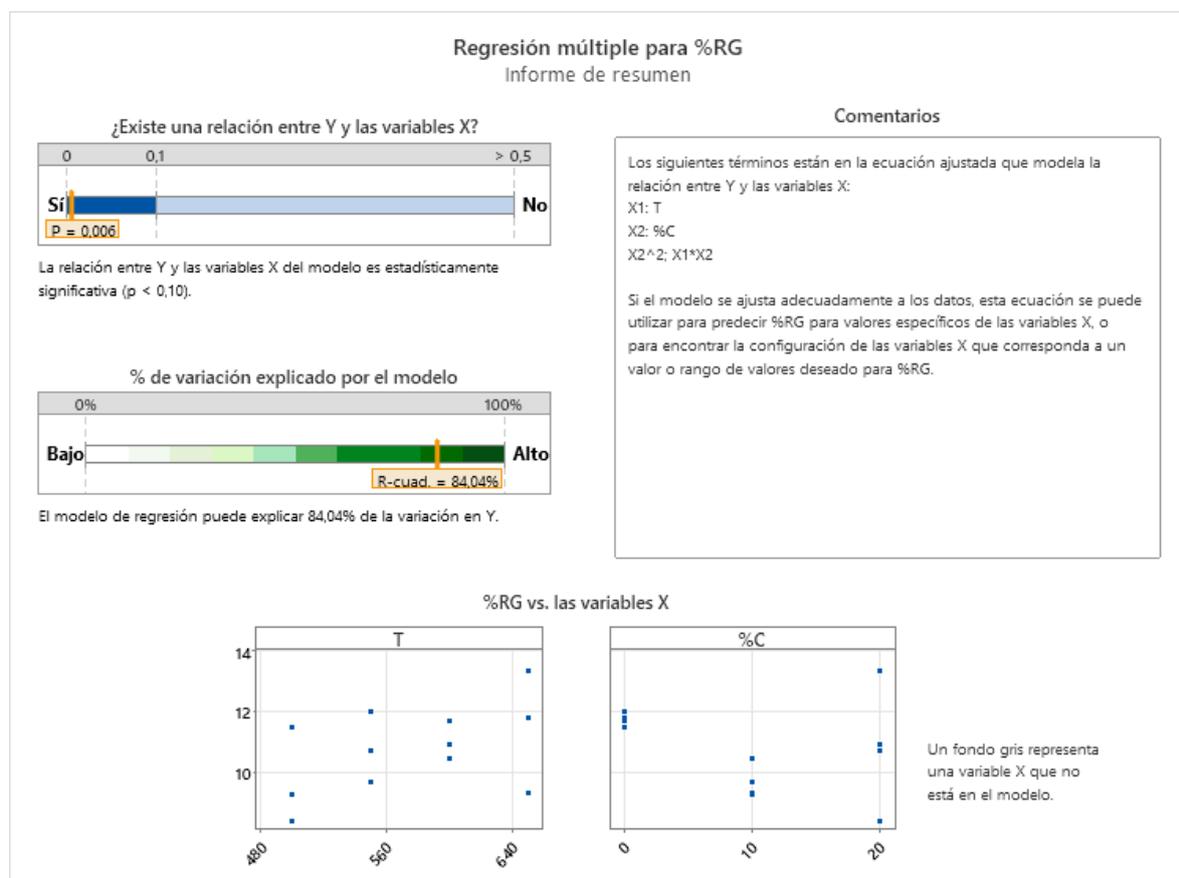
Análisis de varianza de rendimiento de productos gaseosos respecto a la temperatura y % de Catalizador/MP

<b>Fuente</b>	<b>GL</b>	<b>SC Sec.</b>	<b>MC sec.</b>	<b>Valor F</b>	<b>Valor p</b>
<b>Regresión</b>	4	17.905	44.763	9.22	0.006
<b>%C</b>	1	1.617	16.170	3.33	0.111
<b>T</b>	1	4.443	44.427	9.15	0.019
<b>T*%C</b>	1	5.115	51.146	10.53	0.014
<b>%C*%C</b>	1	6.731	67.310	13.86	0.007
<b>Error</b>	7	3.399	0.4856		
<b>Total</b>	11	21.305			

El análisis de varianza reveló que el valor F de Fisher obtenido, 9.22, es significativamente alto en comparación con el valor crítico de F. Esto indica una variabilidad notable en las medias del rendimiento de gases debido a la interacción entre la temperatura y la relación catalizador/materia prima. Además, se observó que el valor p es menor a 0.006, lo cual es menor que el nivel de significancia establecido en  $\alpha=0.05$ , lo que implica que el resultado es estadísticamente significativo.

### Figura 95

Informe resumido de la regresión múltiple para el rendimiento de productos gaseosos



Dado que el p valor es pequeño, se puede rechazar la hipótesis nula ( $H_0$ ), lo que sugiere que los resultados no son probablemente debido al azar. En otras palabras, se acepta la hipótesis alternativa ( $H_1$ ) que respalda la existencia de una relación significativa entre las variables analizadas.

El análisis de la figura 95 muestra cómo la temperatura (X1) y la relación catalizador/MP (X2) influyen en el rendimiento del producto gaseoso (Y). Los resultados obtenidos demuestran de manera concluyente que existe una relación estadísticamente significativa entre Y y X (X1 y X2), ya que el valor  $p < 0.001$ , lo cual es menor que el nivel de significancia establecido en  $\alpha = 0.05$ .

Por lo tanto, se rechaza la hipótesis nula (H0) que sugiere que la temperatura y la relación catalizador/ materia prima no influyen en el rendimiento de los productos gaseosos obtenidos por pirólisis catalítica al vacío de neumáticos fuera de uso de camiones cisternas. En cambio, se acepta la hipótesis alternativa (H1), que indica la temperatura y la relación catalizador/ materia prima influyen en el rendimiento de los productos gaseosos obtenidos por pirólisis catalítica al vacío de neumáticos fuera de uso de camiones cisternas.

Estos resultados son de gran relevancia, ya que proporcionan una base sólida para comprender cómo los factores específicos de temperatura y la relación catalizador/MP impactan en la producción gaseosos obtenidos a partir de la pirólisis catalítica al vacío de neumáticos fuera de uso. Estos conocimientos podrían tener implicaciones importantes en la optimización de los procesos de pirólisis catalítica y en la mejora de la eficiencia.

### **Tabla 28**

Resumen del modelo para la regresión lineal múltiple

<b>S</b>	<b>R-cuadrado</b>	<b>R-cuadrado(ajustado)</b>
<b>0.696880</b>	84.04%	74.93%

Adicionalmente, en la tabla 28 se muestra el valor de R (Raíz cuadrada media ajustada), el cual indica que el modelo de regresión es capaz de explicar el 74.93% de la variabilidad del modelo con respecto de la variabilidad total, se recomienda su aplicación debido a que el valor R- cuadrado ajustado es mayor al 70 %.

El análisis de regresión múltiple nos permite realizar las pruebas sobre coeficientes individuales del modelo la cual se resume en la tabla 29 y de la cual se obtiene la ecuación que permite relacionar el rendimiento de gases con la temperatura y la relación catalizador/MP.

**Tabla 29**

Análisis para el modelo de regresión múltiple

Término	Coef	EE del coef.	Valor T	Valor p	FIV
Constante	13.73	3.29	4.17	0.004	
%C	-1,185	0.269	-4.41	0.003	118.8
T	-0.00342	0.00569	-0.6	0.567	2.5
T*%C	0.00143	0.000441	3.25	0.014	108.3
%C*%C	0.01589	0.00427	3.72	0.007	13

$$RG=13,73 - 1,185 \%C - 0,00342 T + 0,001430 T*\%C + 0,01589 \%C*\%C.....(6)$$

Donde:

RG: Rendimiento de productos gaseosos (%)

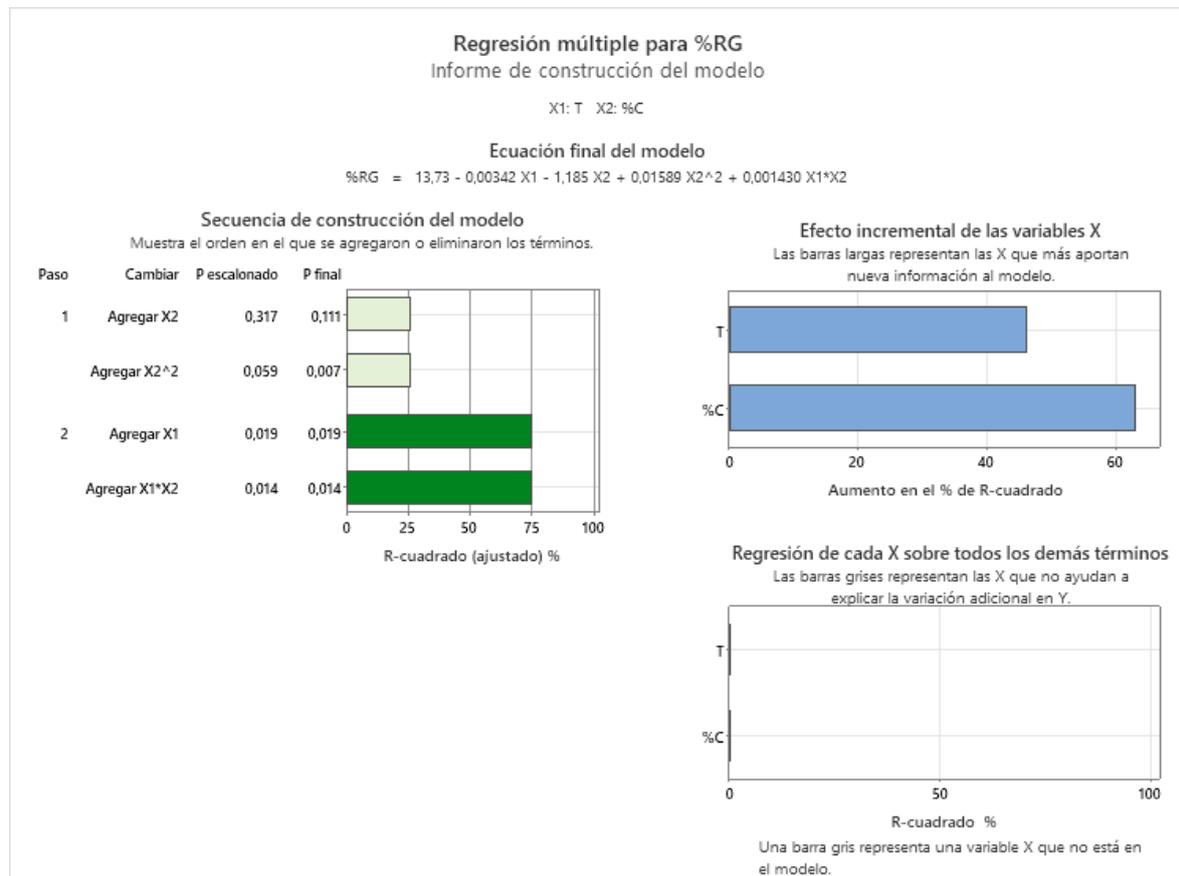
T= Temperatura (°C)

%C= Relación catalizador/materia prima

En la figura 96, se observa la influencia de cada variable sobre el rendimiento de gases. Se atribuye un 46.24% del efecto de la temperatura en el modelo. Mientras, que un 63.19% del efecto en el modelo se atribuye a la relación de Catalizador /MP (%), también nos presta la ecuación lineal del modelo que es la misma a la ecuación (6).

Figura 96

Informe resumido de la regresión múltiple para el rendimiento de productos gaseosos



#### 4.2.6.1. Análisis de la influencia de la Temperatura en el Rendimiento

Con el fin de analizar el efecto individual que tiene la temperatura sobre el rendimiento de los productos gaseosos obtenidos se realizó la regresión lineal simple.

H0= El efecto de la temperatura no influye en el rendimiento de los productos gaseosos obtenidos por pirólisis catalítica al vacío de neumáticos fuera de uso de camiones cisternas.

H1= El efecto de la temperatura influye en el rendimiento de los productos gaseosos obtenidos por pirólisis catalítica al vacío de neumáticos fuera de uso de camiones cisternas.

El análisis de varianza del rendimiento respecto a la temperatura se muestra en la tabla 16 con los datos llenados de Minitab 18.

**Tabla 30**

Análisis de varianza del rendimiento respecto a la temperatura

<b>Fuente</b>	<b>GL</b>	<b>SC Sec.</b>	<b>MC sec.</b>	<b>Valor F</b>	<b>Valor p</b>
<b>Regresión</b>	1	4.4427	4.4427	2.6300	0.1360
<b>Error</b>	10	16.8621	1.6862		
<b>Total</b>	11	21.3048			

Se detecta que el valor F de Fisher es 2.63 que es menor al valor F crítico por esto se acepta la hipótesis nula, a su vez el nivel de significancia 0.136 (mayor que 0.05), revelando que no existe una relación significativa entre las medias de la temperatura que es la variable independiente (X1) y las medias obtenidas para los rendimientos de productos gaseosos como variable dependiente (Y1), esto refuerza el hecho de rechazar la hipótesis alternativa (H1).

**Tabla 31**

Resumen del modelo para la regresión lineal

<b>S</b>	<b>R-cuadrado</b>	<b>R-cuadrado(ajustado)</b>
<b>1.298540</b>	20.85%	12.94%

Además, en la tabla 31, se observa el valor de R (Raíz cuadrática media ajustado) indica que el modelo de regresión lineal puede explicar 12.94% de la variación en el rendimiento de líquidos. Este modelo brinda una ecuación que relaciona la temperatura del reactor con el rendimiento de los productos líquidos, pero no se recomienda su aplicación debido a que el valor R- cuadrado ajustado es menor al 70 % y su correlación es de 0.46.

$$RG = 4.528 + 0.01088 T \dots\dots(7)$$

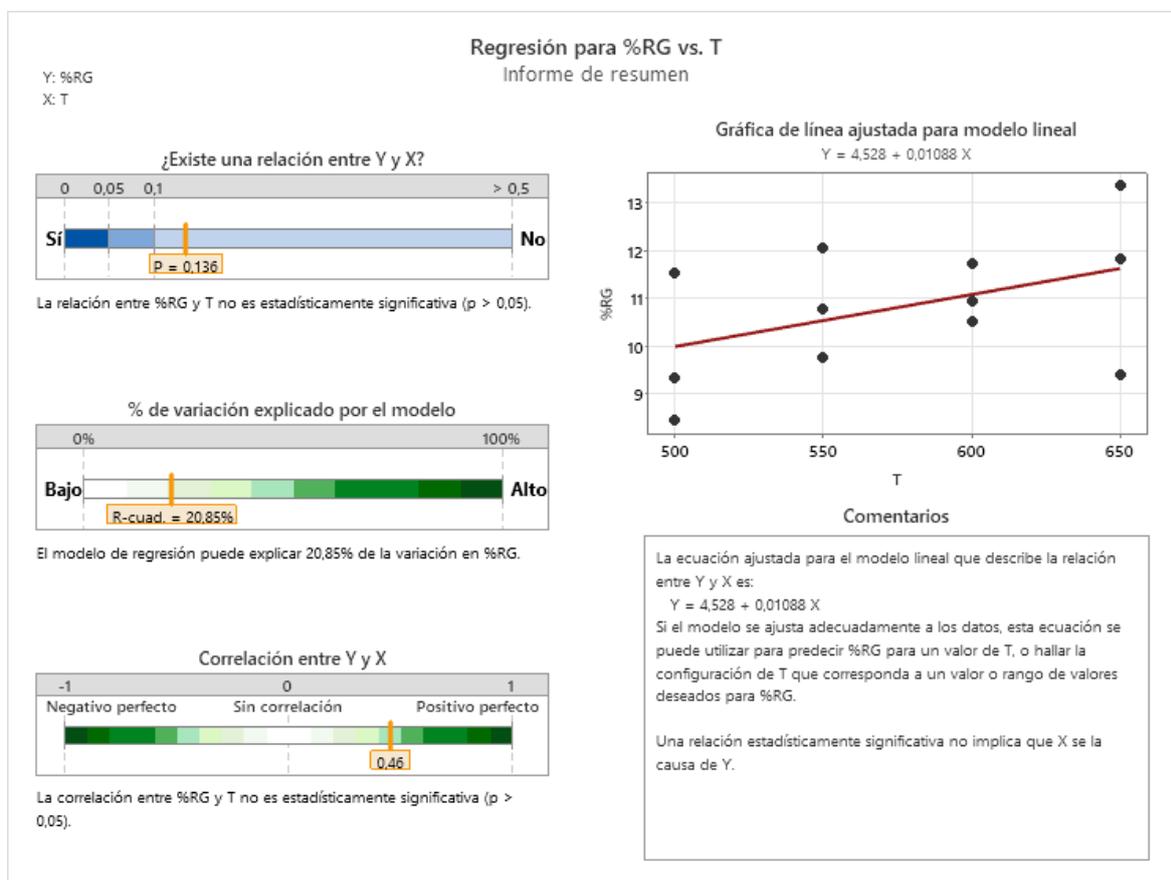
Donde:

RG: Rendimiento de productos gaseosos (%)

T= Temperatura (°C)

### Figura 97

Informe resumido de la regresión simple para el rendimiento de productos gaseosos vs temperatura



#### 4.2.6.2. Análisis de la influencia del % de catalizador /MP en el rendimiento de productos gaseosos

Con el fin de analizar el efecto individual que tiene la relación catalizador/materia prima sobre el rendimiento de los productos gaseosos obtenidos se realizó la regresión lineal simple.

H0= La relación catalizadora/materia prima no influye en el rendimiento de los productos gaseosos por pirólisis catalítica al vacío de neumáticos fuera de uso de camiones cisternas.

HI= La relación catalizadora/materia prima influye en el rendimiento de los productos gaseosos por pirólisis catalítica al vacío de neumáticos fuera de uso de camiones cisternas.

El análisis de varianza del rendimiento respecto a la relación catalizador/materia prima se muestra en la tabla 19 con los datos llenados de Minitab 18.

**Tabla 32**

Análisis de varianza de rendimiento respecto a la relación catalizador/materia prima

<b>Fuente</b>	<b>GL</b>	<b>SC Sec.</b>	<b>MC sec.</b>	<b>Valor F</b>	<b>Valor p</b>
<b>Regresión</b>	2	8.348	4.174	2.90	0.107
<b>Error</b>	9	12.957	1.440		
<b>Total</b>	11	21.305			

Se detecta que el valor F de Fisher es 2.90 que es menor al valor F crítico por esto se rechaza la hipótesis alternativa, con un nivel de significancia de 0.107 (mayor que 0.05), revelando no existe una relación significativa entre las medias de la relación catalizador/MP que es la variable independiente (X1) y las medias obtenidas para los rendimientos de productos gaseosos como variable dependiente (Y1), esto refuerza el hecho de aceptar la hipótesis nula (H0).

**Tabla 33**

Resumen del modelo para la regresión lineal

<b>S</b>	<b>R-cuadrado</b>	<b>R-cuadrado(ajustado)</b>
<b>1.19985</b>	39.18%	25.67%

Además, en la tabla 33, se observa el valor de R (Raíz cuadrática media ajustada) indica que el modelo de regresión lineal puede explicar 25.67% de la variabilidad del modelo con respecto de la variabilidad total. Este modelo brinda la ecuación que relaciona la relación

catalizador/materia prima con el rendimiento de los productos líquidos, pero no se recomienda su aplicación debido a que el valor R- cuadrado ajustado es menor al 70 %.

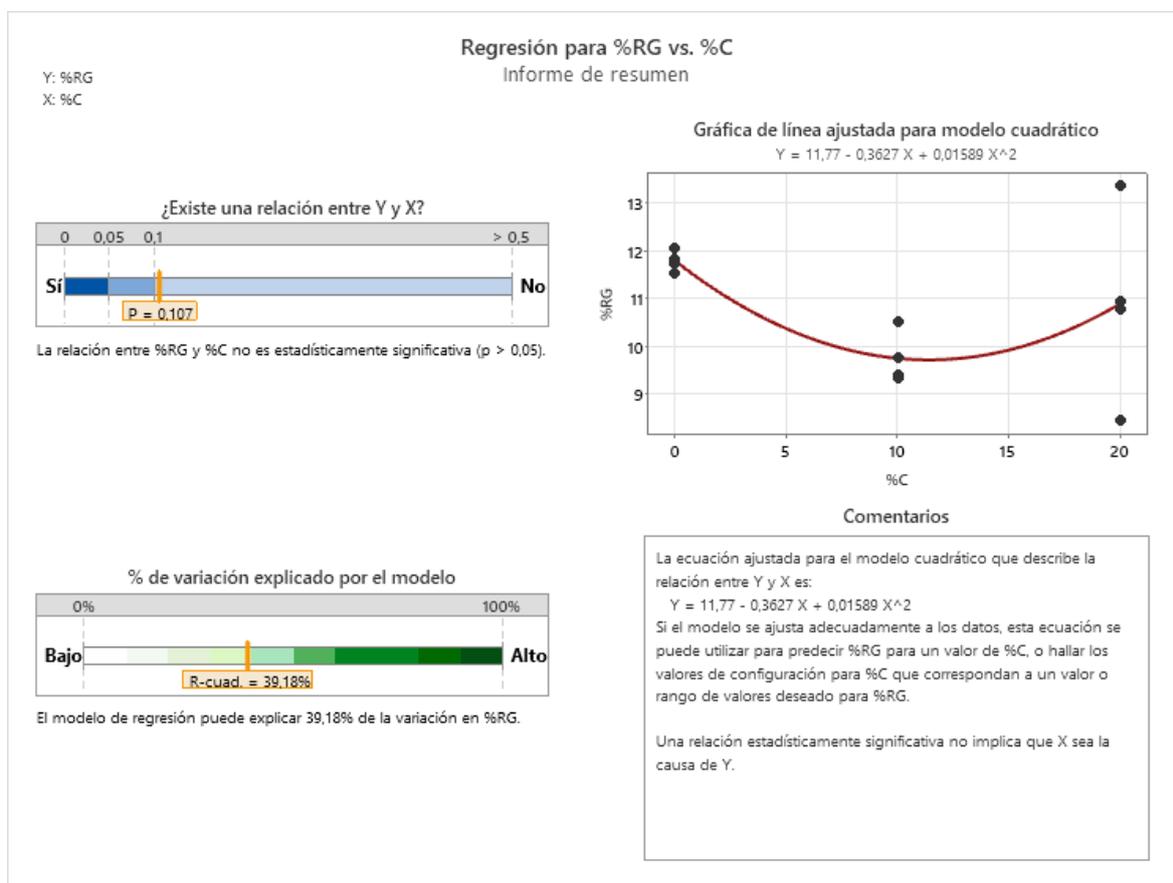
$$RG=11.77 - 0.3627 \%C + 0.01589 \%C*\%C.....(8)$$

Donde:

RG: Rendimiento de productos gaseosos (%); %C= Relación catalizador/materia.

**Figura 98**

Informe resumido de la regresión simple para el rendimiento de productos gaseosos vs la relación catalizador/ materia prima

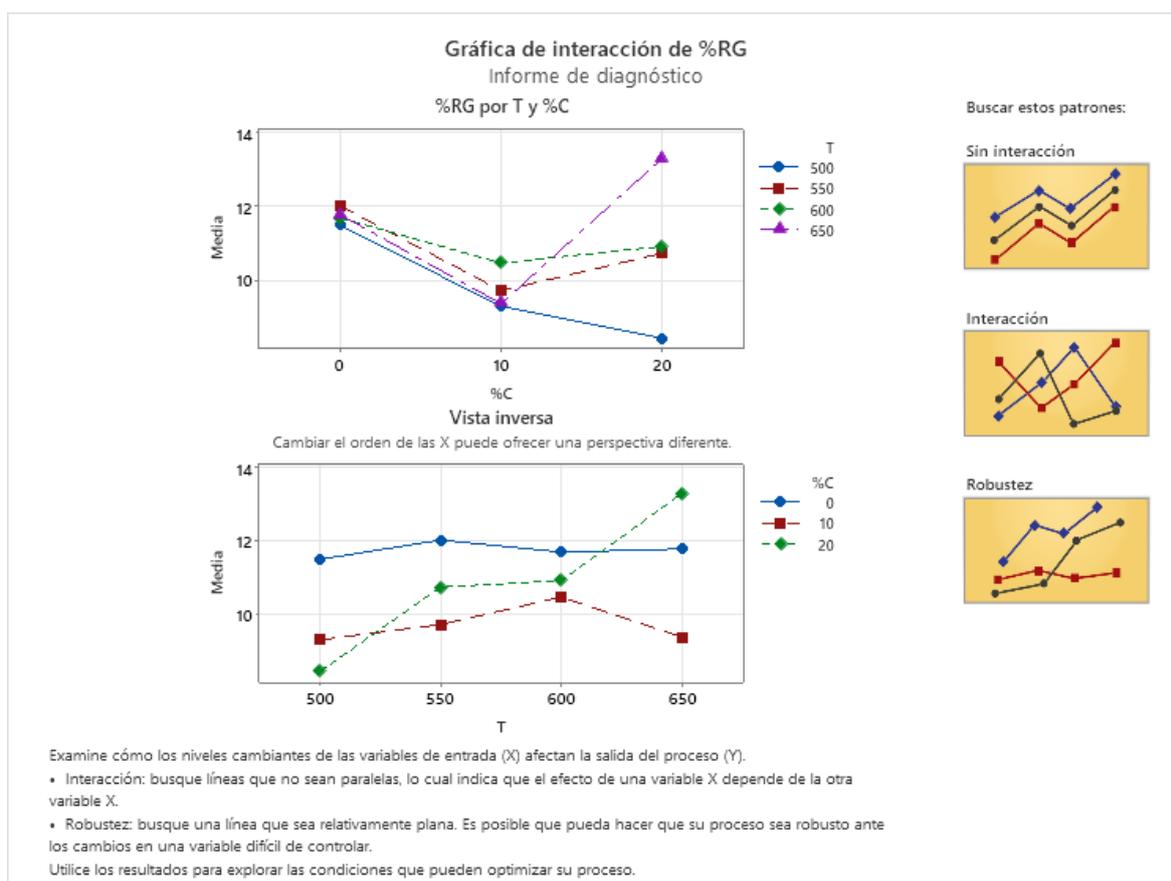


### 4.2.6.3. Interacción productos gaseosos con respecto a la temperatura y la relación catalizador/materia prima

En la figura 99 se muestra la gráfica de interacción realizada con los promedios para los rendimientos de los productos líquidos obtenidos

**Figura 99**

Interacción del rendimiento de los productos gaseosos de la pirolisis



La interacción sugiere varias inferencias en términos de interacción significativa, tendencias y robustez del proceso de pirolisis, en función de la temperatura y el porcentaje de catalizador.

#### **Interacción significativa:**

La interacción entre las variables temperatura y porcentaje de catalizador se evidencia por la falta de paralelismo en las líneas de la gráfica. Esto implica que el efecto de

la temperatura sobre el rendimiento de gases depende del porcentaje de catalizador. Por ejemplo, a una temperatura baja de 500 °C, el aumento del porcentaje de catalizador tiende a reducir el rendimiento de gases, pasando de 11.51% con 0% de catalizador a 8.45% con 20% de catalizador. Sin embargo, a 650 °C, el rendimiento de gases muestra una tendencia diferente, aumentando con el incremento del catalizador, alcanzando 13.33% con 20% de catalizador. Esta interacción subraya la importancia de ajustar cuidadosamente tanto la temperatura como el porcentaje de catalizador para optimizar el rendimiento.

### **Tendencias:**

Las tendencias observadas indican que, sin catalizador, el rendimiento de gases aumenta con la temperatura, alcanzando su valor máximo de 12.04% a 550 °C. Al añadir un 10% de catalizador, el rendimiento disminuye inicialmente a 500 °C (9.31%) pero mejora con temperaturas más altas, llegando a 10.49% a 600 °C. Con un 20% de catalizador, el comportamiento es más variado: el rendimiento baja inicialmente a 500 °C (8.45%) y muestra un ligero incremento a 550 °C (10.75%) y 600 °C (10.94%), alcanzando su máximo a 650 °C (13.33%). Estas tendencias indican que la efectividad del catalizador varía significativamente con la temperatura, siendo más beneficioso a temperaturas más altas con un mayor porcentaje de catalizador.

### **Robustez:**

La robustez del proceso se refleja en la estabilidad del rendimiento de gases frente a variaciones en las condiciones operativas. A 500 °C y 550 °C, el rendimiento de gases presenta una menor variabilidad frente a cambios en el porcentaje de catalizador, indicando una mayor robustez en estos rangos de temperatura. En contraste, a 600 °C y 650 °C, el rendimiento se vuelve más sensible a las variaciones del catalizador, especialmente a 650 °C, donde se observa una mayor dispersión en los datos. Esto sugiere que a temperaturas

más altas, el proceso es menos robusto y requiere un control más preciso del catalizador para mantener un rendimiento óptimo.

#### 4.2.7. Análisis estadístico para el rendimiento de productos sólidos

En la tabla 34 se muestra 36 resultados de pruebas experimentales realizadas a 4 niveles de temperatura (500, 550, 600, 650 °C), 3 niveles de catalizador (0.10 y 20%) y 3 réplicas por nivel.

**Tabla 34**

Diseño Experimental Factorial 4x3x3 utilizado para el tratamiento estadístico de productos sólidos

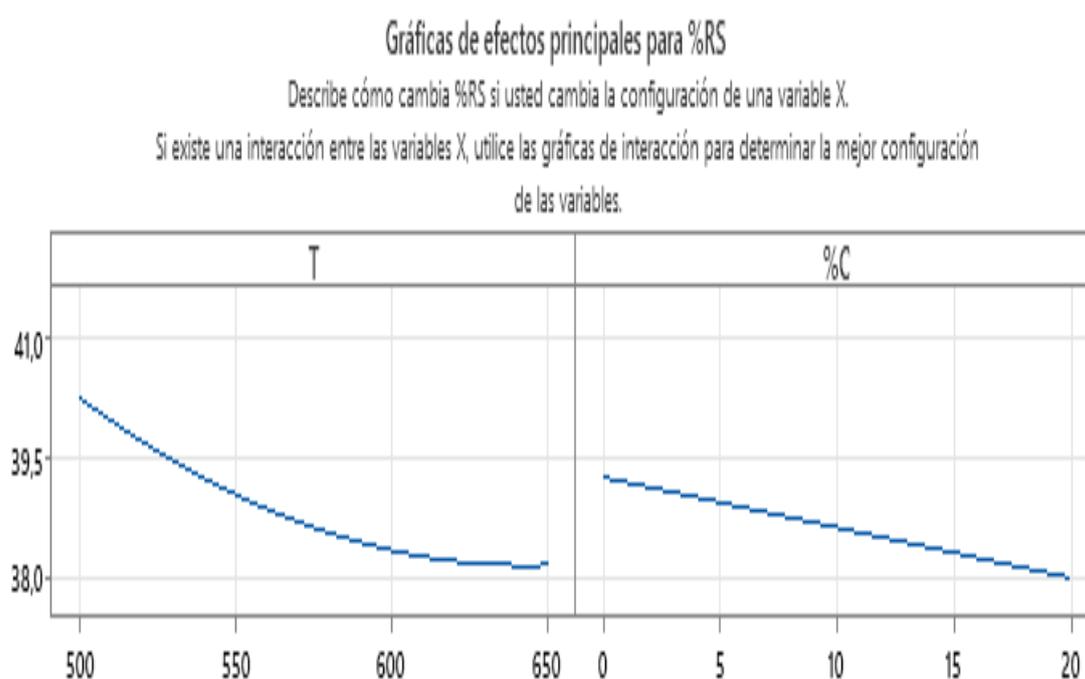
<b>RENDIMIENTO DE SOLIDOS (%)</b>					
<b>FACTORES</b>			<b>FACTOR: Relación catalizador /Materia prima (%)</b>		
			<b>Nivel 1</b>	<b>Nivel 2</b>	<b>Nivel 3</b>
			<b>0</b>	<b>10</b>	<b>20</b>
<b>FACTOR: Temperatura (°C)</b>	<b>Nivel 1</b>	<b>500</b>	39.53	40.47	40.53
			43.8	41	37.6
			40.8	39.4	39.6
	<b>Nivel 2</b>	<b>550</b>	41.07	39.13	37.73
			38.8	39	38.27
			38.87	38.47	38.4
	<b>Nivel 3</b>	<b>600</b>	43.07	37.67	37.67
			37.4	38.2	38.33
			37.8	38.07	38.33
	<b>Nivel 4</b>	<b>650</b>	38.2	38.6	37.87
			37.67	38.53	37.87
			38.2	38	37.87

Existe cambios en los rendimientos de productos solidos a medida que se cambia las condiciones operativas como se muestra en la figura 100, con el fin de examinar el efecto de las variables independientes con respecto de la variable dependiente, se llevó a cabo el análisis de regresión lineal múltiple utilizando los datos proporcionados.

Las variables consideradas como independientes en este análisis fueron la temperatura ( $^{\circ}\text{C}$ ) y catalizador/materia prima (%), mientras que la variable dependiente fue el rendimiento del producto sólido expresado en porcentaje.

### Figura 100

Efectos principales de la temperatura y % de Catalizador /MP para el rendimiento de productos sólidos



En la tabla 35, se ilustran las medias y desviaciones estándares para el rendimiento de productos líquidos obtenidos por la interacción de las variables independientes mencionadas. De las medias, se deriva que el mayor rendimiento de producto sólido 41.38%, se produce a  $500^{\circ}\text{C}$  y a 0% de catalizador/materia prima.

**Tabla 35**

Descriptivos estadísticos para el rendimiento de productos sólidos

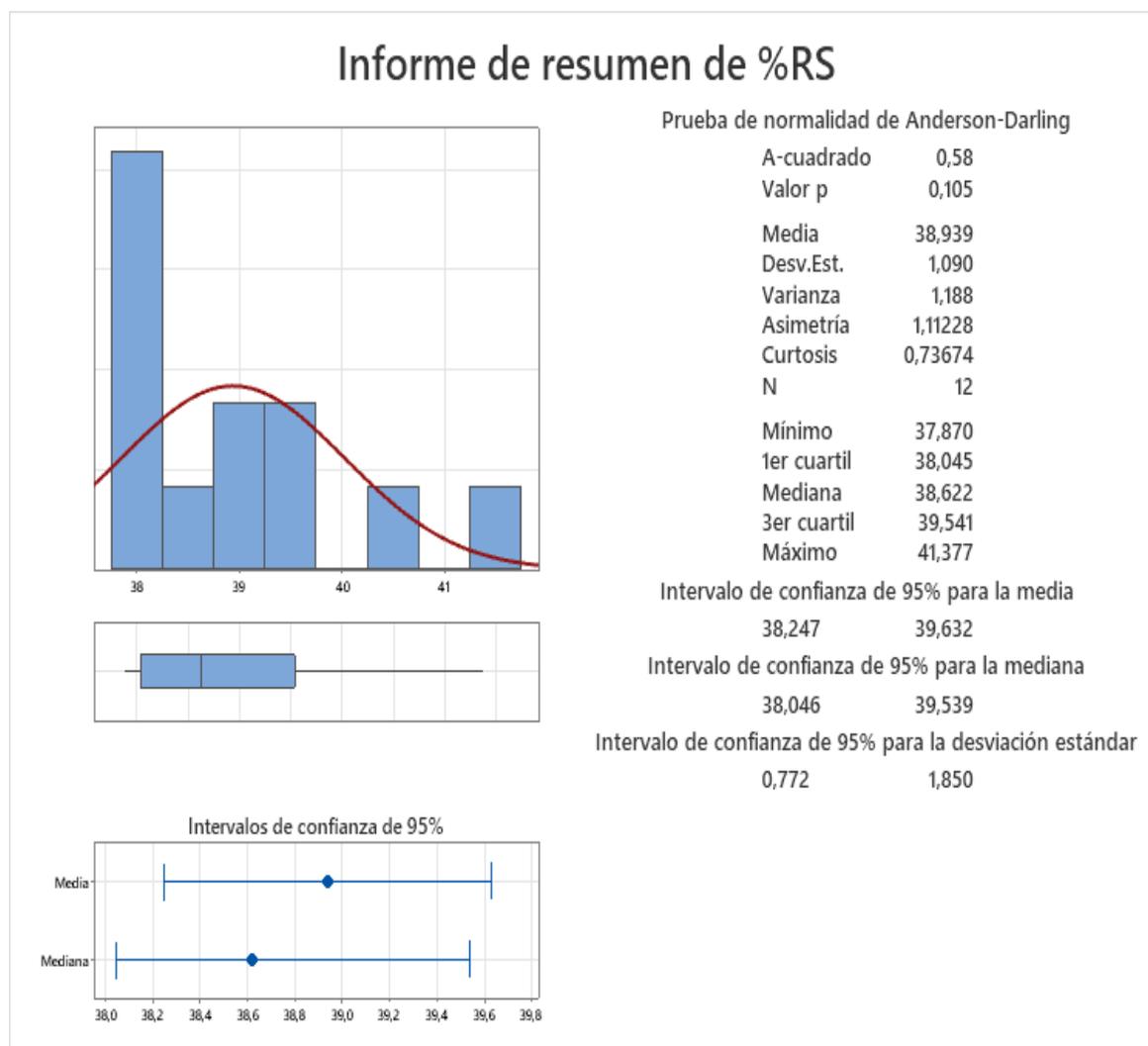
Temperatura(°C)	Relación catalizadora/MP (%)	<i>MEDIA</i> (%)	<i>DES. ESTANDAR</i> (%)	<i>VARIANZA</i> (%)	<i>MÍNIMO</i> (%)	<i>MEDIANA</i> (%)	<i>MAXIMO</i> (%)
500	0	41.380	2.190	4.810	39.530	40.800	43.800
	10	40.290	0.815	0.664	39.400	40.470	41.000
	20	39.243	1.497	2.242	37.600	39.600	40.530
550	0	39.580	1.291	1.666	38.800	38.870	41.070
	10	38.867	0.350	0.122	38.470	39.000	39.130
	20	38.133	0.355	0.126	37.730	38.270	38.400
600	0	39.420	3.160	10.010	37.400	37.800	43.070
	10	37.980	0.276	0.076	37.670	38.070	38.200
	20	38.110	0.381	0.145	37.670	38.330	38.330
650	0	38.023	0.306	0.094	37.670	38.200	38.200
	10	38.377	0.328	0.108	38.000	38.530	38.600
	20	37.870	0.000	0.000	37.870	37.870	37.870

#### ***4.2.8. Prueba de normalidad para el rendimiento de productos sólidos***

El análisis del rendimiento de productos sólidos (%RS) mostró una distribución que no se desvía significativamente de la normalidad, como lo indica la prueba de normalidad de Anderson-Darling (A-cuadrado = 0.58,  $p = 0.105$ ). Los datos presentaron una media de 38.939 con una desviación estándar de 1.090, una asimetría de 1.11228 y una curtosis de 0.73674, con un rango de valores entre 37.870 y 41.377. Los intervalos de confianza al 95% para la media y la mediana fueron [38.247, 39.632] y [38.046, 39.539] respectivamente, y para la desviación estándar [0.772, 1.850]. Estos resultados indican una distribución ligeramente sesgada a la derecha, pero dentro de los rangos esperados para una distribución normal.

**Figura 101**

Prueba de normalidad para el rendimiento de productos sólidos



#### ***4.2.9. Análisis de la Influencia de la Temperatura y % Catalizador/ MP en el rendimiento de productos sólidos***

##### **-Hipótesis General.**

H0= La temperatura y la relación catalizador/materia prima no influyen en el rendimiento de los productos sólidos obtenidos por pirólisis catalítica al vacío de neumáticos fuera de uso de camiones cisternas.

H1= La temperatura y la relación catalizador/materia prima influyen en el rendimiento de los productos sólidos obtenidos por pirólisis catalítica al vacío de neumáticos fuera de uso de camiones cisternas.

La información de los factores de la investigación se muestra en la tabla 36.

**Tabla 36**

Información de los factores

<b>Factor</b>	<b>Tipo</b>	<b>Niveles</b>	<b>Valores</b>
<b>Temperatura</b>	<b>fijo</b>	<b>4</b>	<b>500, 550, 600, 650</b>
<b>%Catalizador /MP</b>	<b>fijo</b>	<b>3</b>	<b>0, 10, 20</b>

Variable dependiente: Rendimiento de productos sólidos.

Variables independientes: % de Catalizador /MP – Temperatura

-Análisis de varianza: El análisis de Varianza se utiliza para evaluar el efecto de dos o más variables independientes sobre una variable dependiente.

El análisis de varianza del rendimiento de productos sólidos respecto a la temperatura y el % E-cat/MP se muestra en la tabla 37.

**Tabla 37**

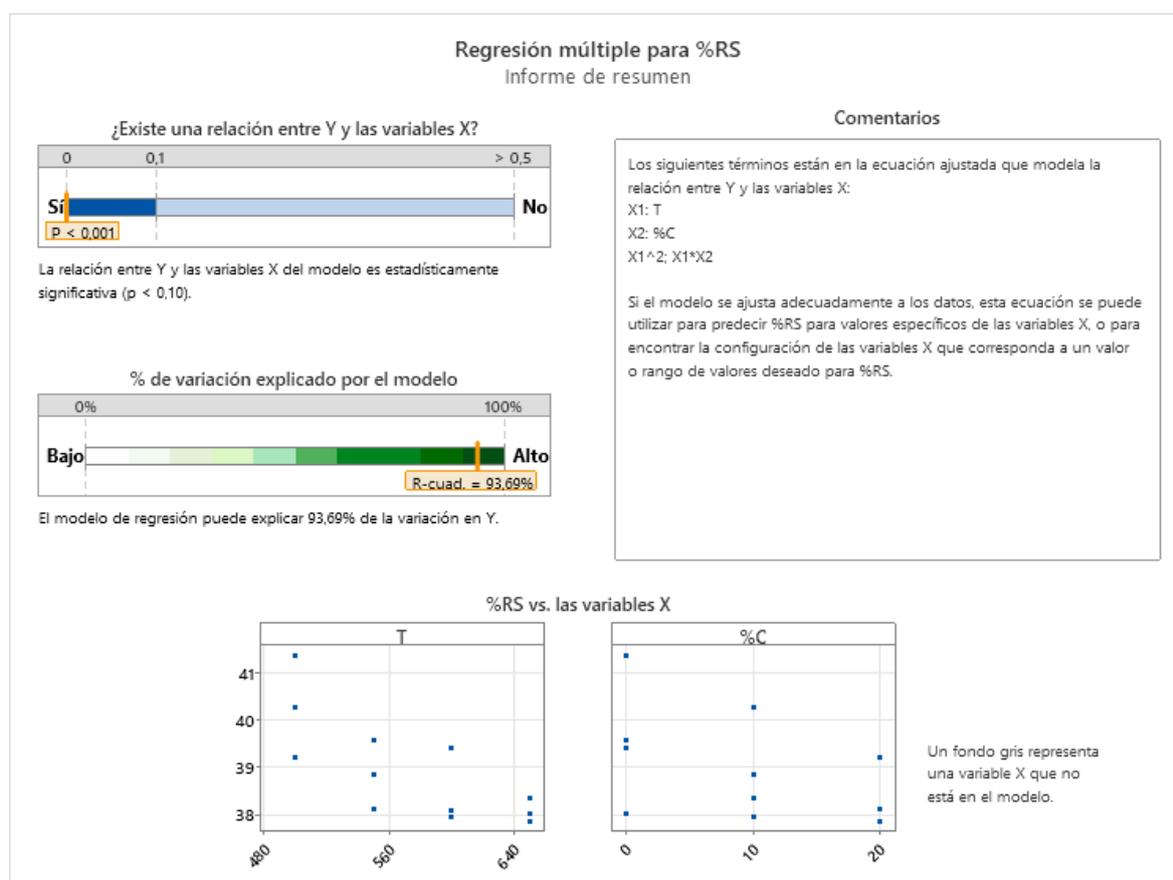
Análisis de varianza de rendimiento de productos sólidos respecto a la temperatura y % de Catalizador/MP

<b>Fuente</b>	<b>GL</b>	<b>SC Sec.</b>	<b>MC sec.</b>	<b>Valor F</b>	<b>Valor p</b>
<b>Regresión</b>	4	12.2404	3.0601	26.0000	0.000
<b>%C</b>	1	3.1836	3.1836	27.0500	0.001
<b>T</b>	1	7.3407	7.3407	62.3700	0.000
<b>T*%C</b>	1	0.9221	0.9221	7.8400	0.027
<b>T*T</b>	1	0.7940	0.7940	6.7500	0.036
<b>Error</b>	7	0.8238	0.1177		
<b>Total</b>	11	13.0642			

El análisis de varianza reveló que el valor F de Fisher obtenido, 26.00, es significativamente alto en comparación con el valor crítico de F. Esto indica una variabilidad notable en las medias del rendimiento de sólido debido a la interacción entre la temperatura y la relación catalizador/materia prima. Además, se observó que el valor p es menor a 0.000, lo cual es menor que el nivel de significancia establecido en  $\alpha=0.05$ , lo que implica que el resultado es estadísticamente significativo.

**Figura 102**

Informe resumido de la regresión múltiple para el rendimiento de productos sólidos



Dado que el p valor es pequeño, se puede rechazar la hipótesis nula ( $H_0$ ), lo que sugiere que los resultados no son probablemente debido al azar. En otras palabras, se acepta la hipótesis alternativa ( $H_1$ ) que respalda la existencia de una relación significativa entre las variables analizadas.

El análisis de la figura 104 muestra cómo la temperatura (X1) y la relación catalizador/MP (X2) influyen en el rendimiento del producto sólido (Y). Los resultados obtenidos demuestran de manera concluyente que existe una relación estadísticamente significativa entre Y y X (X1 y X2), ya que el valor  $p < 0.001$ , lo cual es menor que el nivel de significancia establecido en  $\alpha = 0.05$ .

Por lo tanto, se rechaza la hipótesis nula (H0) que sugiere que la temperatura y la relación catalizador/ materia prima no influyen en el rendimiento de los productos sólidos obtenidos por pirólisis catalítica al vacío de neumáticos fuera de uso de camiones cisternas. En cambio, se acepta la hipótesis alternativa (H1), que indica la temperatura y la relación catalizador/ materia prima influyen en el rendimiento de los productos sólidos obtenidos por pirólisis catalítica al vacío de neumáticos fuera de uso de camiones cisternas.

Estos resultados son de gran relevancia, ya que proporcionan una base sólida para comprender cómo los factores específicos de temperatura y la relación catalizador/MP impactan en la producción sólidos obtenidos a partir de la pirólisis catalítica al vacío de neumáticos fuera de uso. Estos conocimientos podrían tener implicaciones importantes en la optimización de los procesos de pirólisis catalítica y en la mejora de la eficiencia y rendimiento de los productos obtenidos.

### **Tabla 38**

Resumen del modelo para la regresión lineal múltiple

<b>S</b>	<b>R-cuadrado</b>	<b>R-cuadrado(ajustado)</b>
<b>0.343055</b>	93.69%	90.09%

Adicionalmente, en la tabla 38 se muestra el valor de R (Raíz cuadrada media ajustada), el cual indica que el modelo de regresión es capaz de explicar el 90.09% de la

variabilidad del modelo con respecto de la variabilidad total, se recomienda su aplicación debido a que el valor R- cuadrado ajustado es mayor al 70 %.

El análisis de regresión múltiple nos permite realizar las pruebas sobre coeficientes individuales del modelo la cual se resume en la tabla 39 y de la cual se obtiene la ecuación que permite relacionar el rendimiento de sólidos con la temperatura y la relación catalizador/MP.

**Tabla 39**

Análisis para el modelo de regresión múltiple

Término	Coef	EE del coef.	Valor T	Valor p	FIV
Constante	84.8	13.1	6.49	0	
%C	-0.412	0.125	-3.29	0.013	106.8
T	-0.1384	0.0456	-3.03	0.019	663.75
T*%C	0.000607	0.000217	2.8	0.027	108.3
T*T	0.000103	0.00004	2.6	0.036	662.25

$$RS = 84.8 - 0.412 \%C - 0.1384 T + 0.000607 T*\%C + 0.000103 T*T \dots\dots(9)$$

Donde:

RL: Rendimiento de productos sólidos (%)

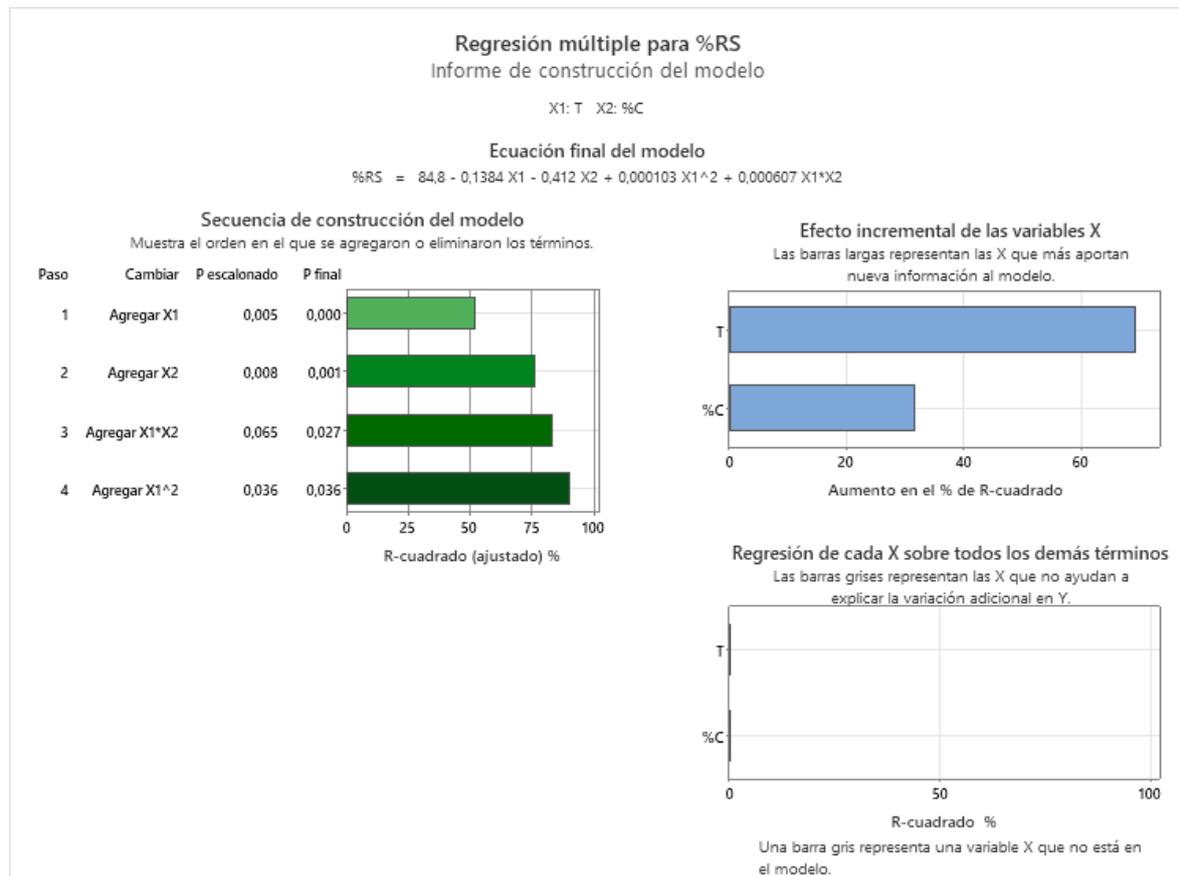
T= Temperatura (°C)

%C= Relación catalizador/materia prima

En la figura 103, se observa la influencia de cada variable sobre el rendimiento de sólidos. Se atribuye un 69.3252% del efecto de la temperatura en el modelo. Mientras, que un 31.5990% del efecto en el modelo se atribuye a la relación de Catalizador /MP (%), también nos presta la ecuación lineal del modelo que es la misma a la ecuación (9).

**Figura 103**

Informe resumido de la regresión múltiple para el rendimiento de productos sólidos



#### 4.2.9.1. Análisis de la influencia de la temperatura en el rendimiento de productos sólidos

Con el fin de analizar el efecto individual que tiene la temperatura sobre el rendimiento de los productos sólidos obtenidos se realizó la regresión lineal simple.

H0= El efecto de la temperatura no influye en el rendimiento de los productos sólidos obtenidos por pirólisis catalítica al vacío de neumáticos fuera de uso de camiones cisternas.

H1= El efecto de la temperatura influye en el rendimiento de los productos sólidos obtenidos por pirólisis catalítica al vacío de neumáticos fuera de uso de camiones cisternas.

El análisis de varianza del rendimiento respecto a la temperatura se muestra en la tabla 16 con los datos llenados de Minitab 18.

**Tabla 40**

Análisis de varianza del rendimiento respecto a la temperatura

<b>Fuente</b>	<b>GL</b>	<b>SC Sec.</b>	<b>MC sec.</b>	<b>Valor F</b>	<b>Valor p</b>
<b>Regresión</b>	1	7.3407	7.3407	12.83	0.005
<b>Error</b>	10	5.7235	0.5724		
<b>Total</b>	11	13.0642			

Se detecta que el valor F de Fisher es 12.83 que es mayor al valor F crítico por esto se rechaza la hipótesis nula, a su vez el nivel de significancia 0.005 (igual a 0.05), revelando que existe una relación significativa entre las medias de la temperatura que es la variable independiente (X1) y las medias obtenidas para los rendimientos de productos sólidos como variable dependiente (Y1), esto refuerza el hecho de rechazar la hipótesis alternativa (H1).

**Tabla 41**

Resumen del modelo para la regresión lineal

<b>S</b>	<b>R-cuadrado</b>	<b>R-cuadrado(ajustado)</b>
<b>0.756538</b>	56.19%	51.81%

Además, en la tabla 41, se observa el valor de R (Raíz cuadrática media ajustado) indica que el modelo de regresión lineal puede explicar 51.81% de la variación en el rendimiento de líquidos. Este modelo brinda una ecuación que relaciona la temperatura del reactor con el rendimiento de los productos líquidos, pero no se recomienda su aplicación debido a que el valor R- cuadrado ajustado es menor al 70 % y su correlación es de -0.75.

$$RS = 46.98 - 0.01399 T \dots\dots(10)$$

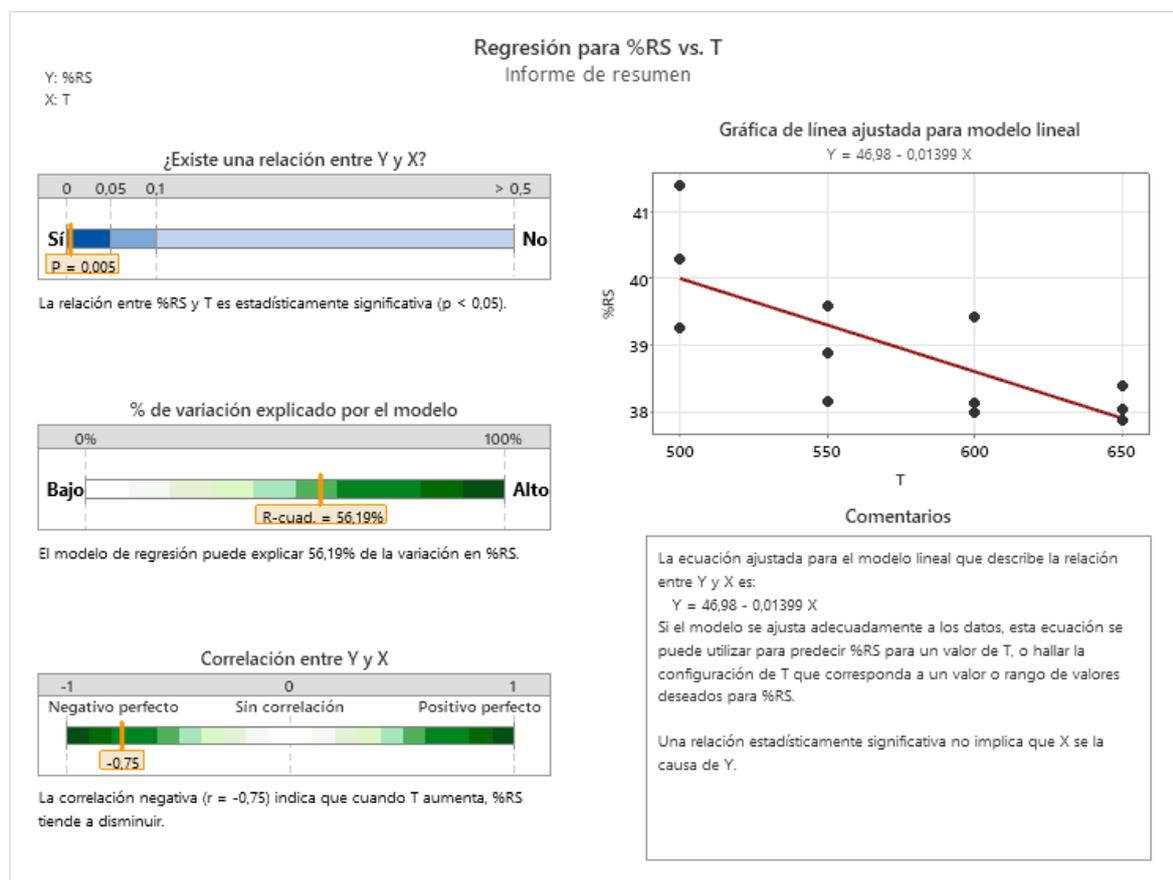
Donde:

RS: Rendimiento de productos sólidos (%)

T= Temperatura (°C)

Figura 104

Informe resumido de la regresión simple para el rendimiento de productos sólidos vs temperatura



#### 4.2.9.2. Análisis de la influencia del % de catalizador /MP en el rendimiento de productos sólidos

Con el fin de analizar el efecto individual que tiene la relación catalizador/materia prima sobre el rendimiento de los productos sólidos obtenidos se realizó la regresión lineal simple.

$H_0$  = La relación catalizadora/materia prima no influye en el rendimiento de los productos sólidos por pirólisis catalítica al vacío de neumáticos fuera de uso de camiones cisternas.

HI= La relación catalizadora/materia prima influye en el rendimiento de los productos sólidos por pirólisis catalítica al vacío de neumáticos fuera de uso de camiones cisternas.

El análisis de varianza del rendimiento respecto a la relación catalizador/materia prima se muestra en la tabla 42 con los datos llenados de Minitab 18.

**Tabla 42**

Análisis de varianza de rendimiento respecto a la relación catalizador/materia prima

<b>Fuente</b>	<b>GL</b>	<b>SC Sec.</b>	<b>MC sec.</b>	<b>Valor F</b>	<b>Valor p</b>
<b>Regresión</b>	1	3.1836	3.1836	3.22	0.103
<b>Error</b>	10	9.8806	0.9881		
<b>Total</b>	11	13.0642			

Se detecta que el valor F de Fisher es 3.22 que es menor al valor F crítico por esto se rechaza la hipótesis alternativa, con un nivel de significancia de 0.103 (mayor que 0.05), revelando existe una relación significativa entre las medias de la relación catalizador/MP que es la variable independiente (X1) y las medias obtenidas para los rendimientos de productos sólidos como variable dependiente (Y1), esto refuerza el hecho de rechazar la hipótesis nula (H0).

**Tabla 43**

Resumen del modelo para la regresión lineal

<b>S</b>	<b>R-cuadrado</b>	<b>R-cuadrado(ajustado)</b>
<b>0.99401</b>	24.37%	16.81%

Además, en la tabla 43, se observa el valor de R (Raíz cuadrática media ajustada) indica que el modelo de regresión lineal puede explicar 16.81% de la variabilidad del modelo con respecto de la variabilidad total. Este modelo brinda la ecuación que relaciona la relación

catalizador/materia prima con el rendimiento de los productos sólidos, pero no se recomienda su aplicación debido a que el valor R- cuadrado ajustado es menor al 70 %.

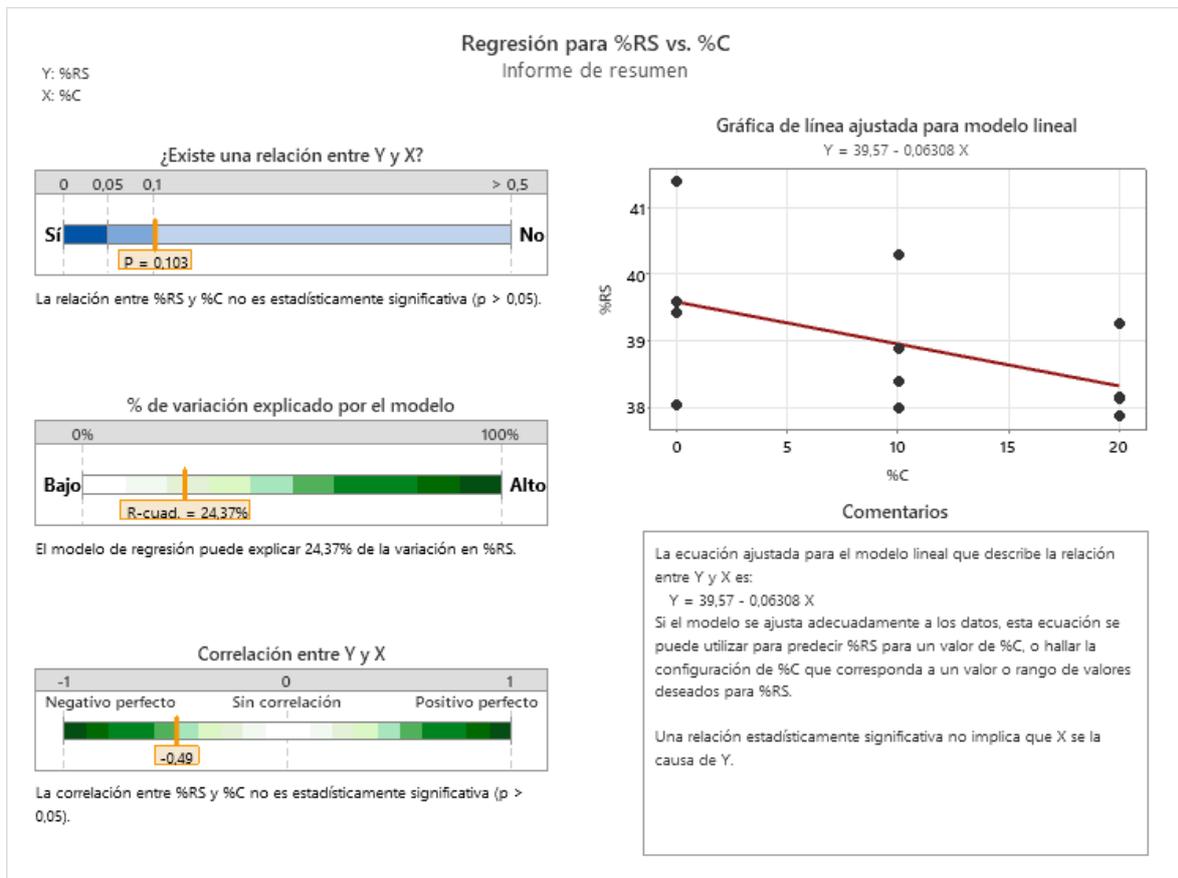
$$RS=39.57 + 0.06308 \%C \dots\dots(11)$$

Donde:

RS: Rendimiento de productos sólidos (%); %C= Relación catalizador/materia.

**Figura 105**

Informe resumido de la regresión simple para el rendimiento de productos sólidos vs la relación catalizador/ materia prima

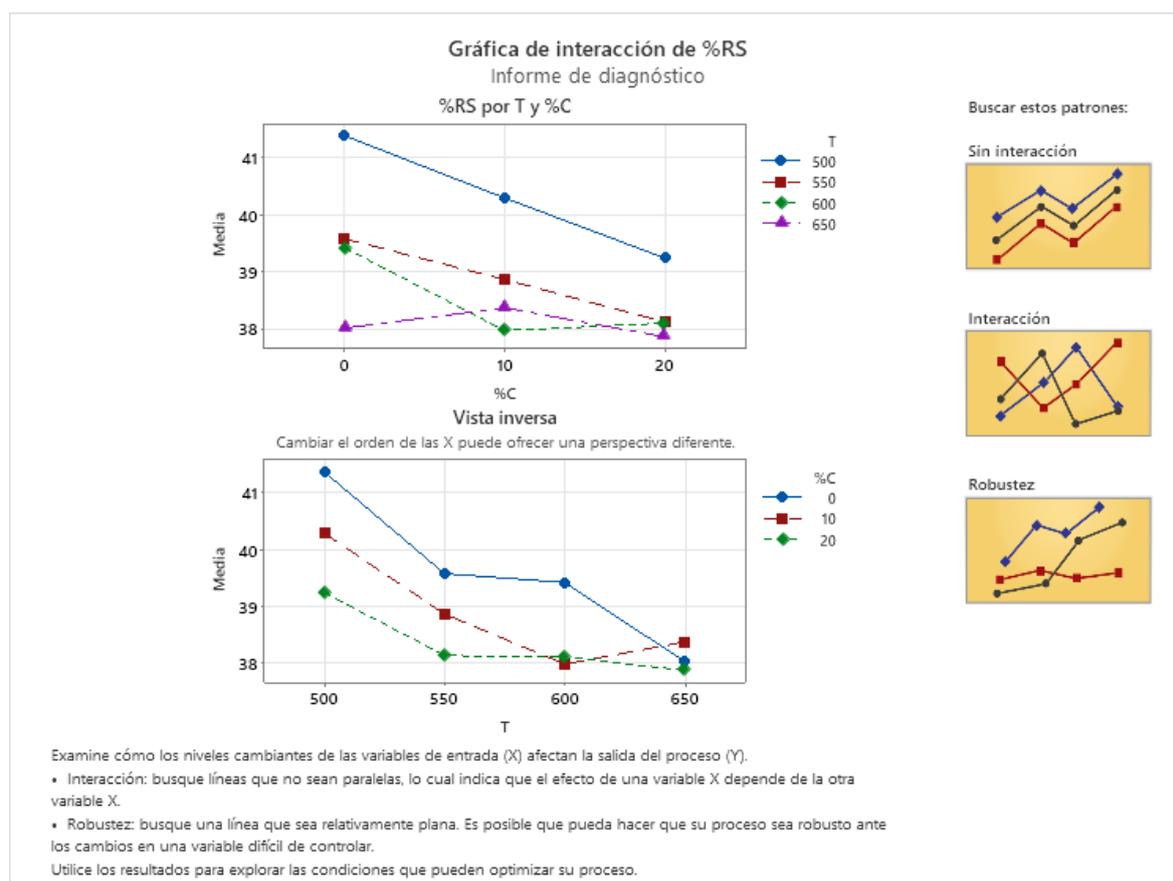


### 4.2.9.3. Interacción productos sólidos con respecto a la temperatura y la relación catalizador/materia prima

En la figura 106 se muestra la gráfica de interacción realizada con los promedios para los rendimientos de los productos sólidos obtenidos

**Figura 106**

Interacción del rendimiento de los productos sólidos de la pirolisis



La interacción sugiere varias inferencias en términos de interacción significativa, tendencias y robustez del proceso de pirolisis, en función de la temperatura y el porcentaje de catalizador.

#### **Interacción significativa:**

La gráfica de interacción entre la temperatura y el porcentaje de catalizador muestra una interacción significativa debido a que las líneas no son paralelas. Esto indica que el

efecto de la temperatura sobre el rendimiento de sólidos depende del porcentaje de catalizador. Por ejemplo, a una temperatura de 500 °C, el rendimiento de sólidos disminuye con el aumento del porcentaje de catalizador, pasando de 41.38% con 0% de catalizador a 39.24% con 20% de catalizador. A medida que la temperatura aumenta a 550 °C y 600 °C, esta tendencia se mantiene, pero con una disminución menos pronunciada. Sin embargo, a 650 °C, el rendimiento de sólidos es más alto con un 10% de catalizador (38.38%) en comparación con 20% C (37.87%). Esta interacción subraya la necesidad de ajustar tanto la temperatura como el porcentaje de catalizador para optimizar el rendimiento de sólidos.

### **Tendencias:**

Las tendencias observadas indican que, sin catalizador, el rendimiento de sólidos disminuye progresivamente con el aumento de la temperatura, bajando de 41.38% a 500 °C a 38.02% a 650 °C. Con un 10% de catalizador, el rendimiento también disminuye con la temperatura, aunque de manera menos pronunciada, pasando de 40.29% a 500 °C a 38.38% a 650 °C. Con un 20% de catalizador, la tendencia es similar, con una disminución del rendimiento de sólidos de 39.24% a 500 °C a 37.87% a 650 °C. Estas tendencias sugieren que el aumento de la temperatura reduce el rendimiento de sólidos, y este efecto se modera ligeramente con la adición de catalizador.

### **Robustez:**

La robustez del proceso puede evaluarse observando la estabilidad del rendimiento de sólidos frente a variaciones en las condiciones operativas. A 500 °C, el proceso muestra mayor variabilidad en el rendimiento de sólidos con cambios en el porcentaje de catalizador, indicando menor robustez. A temperaturas de 550 °C y 600 °C, el rendimiento de sólidos se estabiliza, especialmente entre 10% y 20% de catalizador, lo que sugiere una mayor robustez en estos rangos de temperatura. A 650 °C, la variabilidad vuelve a aumentar, especialmente con 20% de catalizador, lo que indica una menor robustez a altas temperaturas.

### 4.3. Presentación de resultados (Discusión de resultados finales)

#### 4.3.1 Discusión acerca de la caracterización de la materia prima

A la materia prima utilizada (NFU) se le realizaron los ensayos de poder calorífico, contenido de humedad, contenido de cenizas y densidad aparente, los resultados se muestran en la tabla 44, donde se compara los resultados con otros autores.

**Tabla 44**

Comparación de las características de la materia prima

<b>Autores</b>	<b>Investigación</b>	(Sunarno et al., 2023)	Pretell et al., 2021)	(Wang et al., 2021)	(Qu et al., 2020)	(Laresgoiti et al., 2004)	(Williams y Brindle, 2003)
<b>Volátiles</b>	66.3	63.84		60.66	63.35	58.8	62.2
<b>Carbón</b>	29.94	32.63		33.52	28.54	27.7	29.4
<b>Ceniza</b>	3.38	2.6	0.09	5.1	7.68		7.1
<b>Humedad</b>	0.38	0.93	1.87	0.72	0.43		1.3
<b>Poder calorífico (MJ/Kg)</b>	32.68	32.95	30.92	37.34	38.3	31.8	40.18
<b>Densidad aparente (kg/m<sup>3</sup>)</b>	0.44		0.663				

La diferencia en el poder calorífico se debe a la composición química del combustible debido a que contienen diferentes cantidades de carbono, hidrógeno, oxígeno, nitrógeno y otros elementos. Estos elementos tienen diferentes energías de enlace, lo que significa que liberan diferentes cantidades de energía cuando se queman. De la fórmula de Dulong podemos relacionar el análisis elemental, donde se obtiene el contenido de carbono, hidrogeno y azufre para obtener el poder calorífico superior (B. Wang et al., 2021).

El análisis termogravimétrico (TGA) de acuerdo a la investigación realizada por Aravena (2016), indica que las degradaciones asociadas a la volatilización de plastificantes muestran una pérdida de masa mínima, y ocurren antes de alcanzar los 300 °C. Posteriormente, la degradación del caucho empieza a los 370 °C, la pérdida de masa alcanza dos “picos” a 410 y

450 °C el primero para el caucho natural y el segundo para el caucho sintético, con una rampa de calentamiento de 60 °C/min.

De acuerdo a Ayanoglu & Yumrutaş (2016) el análisis termogravimétrico se realizó con una rampa de calentamiento de 5 °C/min y 80 °C/min, los NFU contienen tres componentes principales NR, SBR y BR donde el primero tiene un “pico” a los 370 °C atribuyéndose su degradación al caucho natural y un segundo “pico” a los 450 °C, siendo la degradación del caucho butadieno y estireno butadieno.

De acuerdo a (Tahir & Shimizu, 2023) para el análisis termogravimétrico realizado a 20 °C/min se pueden distinguir 3 zonas durante la ruptura de cadenas en los neumáticos , la primera zona se da entre 30-312 °C, causado por la ruptura de volátiles formados por plastificantes , aditivos y aceite contenidos en los neumáticos la segunda zona de 312-515 °C está asociado a la descomposición de componentes primarios como poliisopreno (caucho natural), polibutadieno, poliestireno butadieno, la tercera zona a partir de los (515-800 °C) relacionado con la reacciones de crackeo secundario de los productos pirolíticos.

Han et al. (2018), demostró que la pirolisis para neumáticos se puede dividir en 4 etapas, la primera etapa se da a temperaturas menores a 320 °C, donde se dan las pérdidas de masa por vaporización del agua y la descomposición de plastificantes, la etapa secundaria se atribuyó a la descomposición del caucho natural a 320-400 °C, la tercera etapa se da entre 400 y 520 °C relacionado con la descomposición del caucho sintético y las temperaturas por encima de los 520 °C se consideró como la 4 etapa la cual no fue identificada.

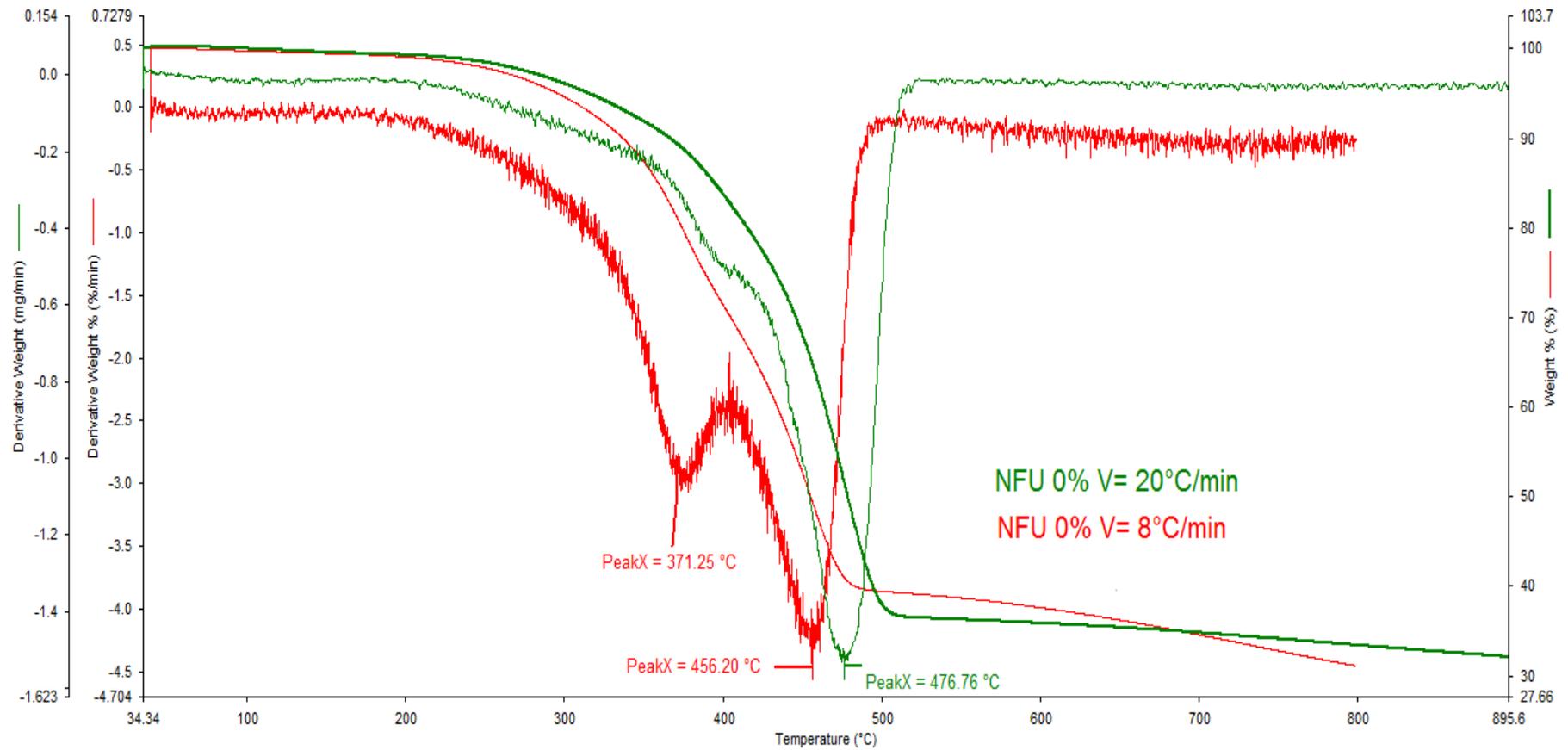
El análisis termogravimétrico realizado a 5 °C/min, 10 °C/min y 20 °C muestra tres secciones de descomposición de acuerdo a Choi et al. (2016), la primera región a 200-300 °C resulta principalmente de la pérdida de peso o del azufre u otros aditivos agregados durante la fabricación del neumático, la segunda región a 350-480 °C corresponde a la

descomposición del caucho natural y el caucho estireno butadieno y la región final a 450-500 °C es causado por la descomposición del caucho de butadieno.

Se puede deducir que la velocidad de calentamiento tiene un papel muy importa en el análisis termogravimétrico (TGA) y la pirolisis en general, en la figura 107 se muestra dos rampas de calentamiento diferentes, la de color rojo es a 8 °C/min formado dos “picos” a 371.25 y 456.20 °C ,para la segunda rampa a 20 °C/min formando un “pico” a 476.76 °C lo que se contrasta por lo descrito por Han et al. (2018) el cual demostró que a mayor velocidad de calentamiento aumenta la temperatura de descomposición realizando pruebas termogravimétricas para velocidades de calentamiento de 5,10,15 y 20 °C/min con “picos” de 369,376, 389 y 395 °C, el cambio se atribuye a la presencia de un mayor retraso térmico, a su vez observo un pico bimodal entre 250 y 500 °C atribuyéndole eso a la degradación del NR/SBR/BR representado por un solo pico debido a que las temperaturas de degradación térmica para cada caucho son muy próximas que se produce entre 300-500 °C.

**Figura 107**

Análisis termogravimétrico a diferentes velocidades de calentamiento



#### ***4.3.2. Discusión acerca del rendimiento de los productos obtenidos de la pirólisis***

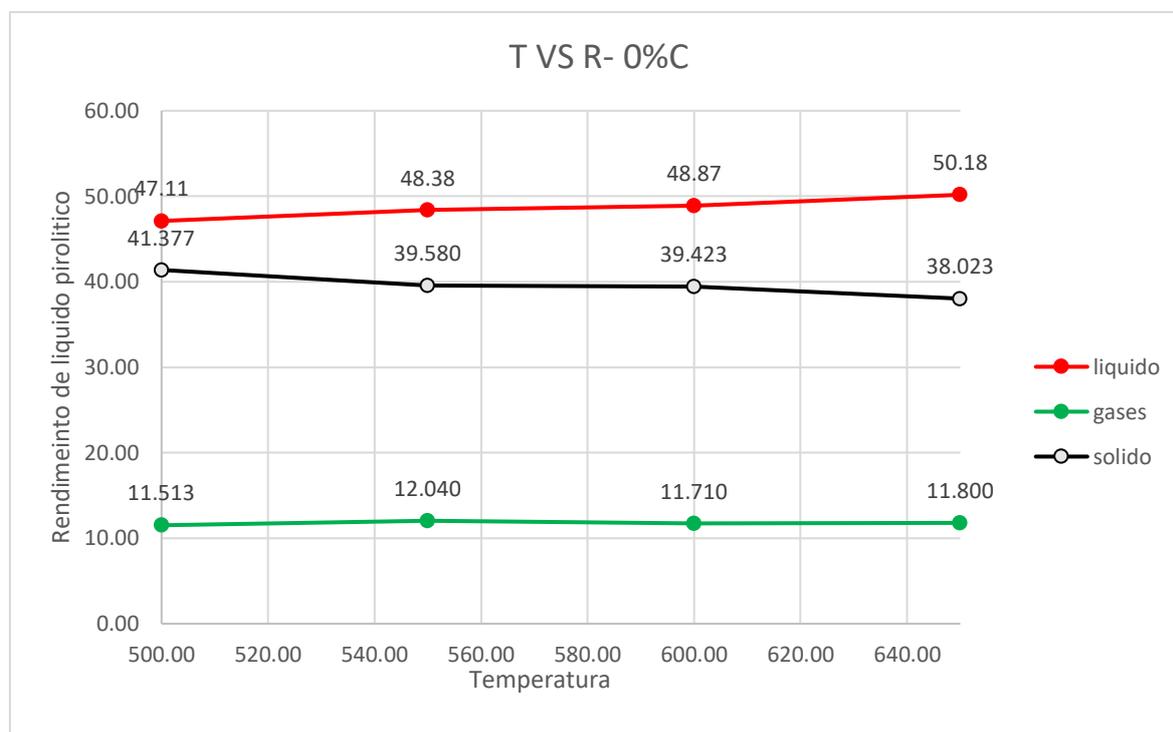
##### **-Pirolisis térmica**

En la figura 108 se muestran los resultados del rendimiento de los productos de la pirólisis a diferentes temperaturas observando que a la temperatura de 650 °C se obtiene el mayor rendimiento de productos líquidos (50.18 %), el menor rendimiento de productos sólidos (38.02 %) y el incremento de productos gaseosos (11.8 %)

Los presentes resultados para la investigación realizada, difieren con los presentados por Pretell et al. (2021) observando que a la temperatura de 550 °C se obtiene el mayor rendimiento de productos líquidos y el menor rendimiento de productos sólidos y gaseosos, para NFU procedentes de camiones mineros, debido al contenido de caucho natural y sintético presentes, las materias primas no deben considerarse iguales, esto concuerda con R. K. Singh et al. (2019), que al realizar el proceso de degradación termoquímica o pirolisis a 750 °C para tres diferentes NFU de vehículos (ligeros, medianos y pesados), y sus mezclas en proporciones variables, comprobó que el rendimiento de productos varía según al contenido NR, SBR y BR, esto concuerda con Ucar et al. (2005), el cual trabajo con dos tipos diferentes de neumáticos (transporte público y camiones), donde muestra la diferencia en los rendimientos líquidos para cada neumático estudiados en el mismo reactor, donde concluye que no existe un efecto notable de la temperatura sobre el rendimiento de productos líquidos.

**Figura 108**

Rendimiento de los productos de la pirólisis térmica



En la investigación realizadas por Aylón et al. (2010) y Gamboa et al. (2020) se puede observar que existe una dispersión importante en los rendimientos reportados en función de la temperatura; las variaciones más significativas se reportan en los rendimientos de gas y líquido, de tal forma que el rendimiento de líquidos varía en un rango de 41.5% a 50.2% para una temperatura de reacción de 600 °C. Estas variaciones indican que los rendimientos de producto no son solo influenciados por la temperatura de reacción, sino también por las características específicas del sistema, principalmente la velocidad de calentamiento y el tipo de reactor. Por lo tanto, diferentes diseños de reactores pueden conducir a diferentes tiempos de residencia del gas, variando el craqueo de los productos primarios de pirólisis, esto concuerda con (Li et al., 2016), el cual utilizó un reactor agitado por lotes y velocidades de calentamiento de 15 °C/min, el cual obtuvo un máximo rendimiento de productos líquido a 500 °C, los rendimientos térmicos del líquido pirolítico

aumentan en función a la temperatura de reacción, los gases disminuyen parcialmente y el sólido disminuye hasta ser constante.

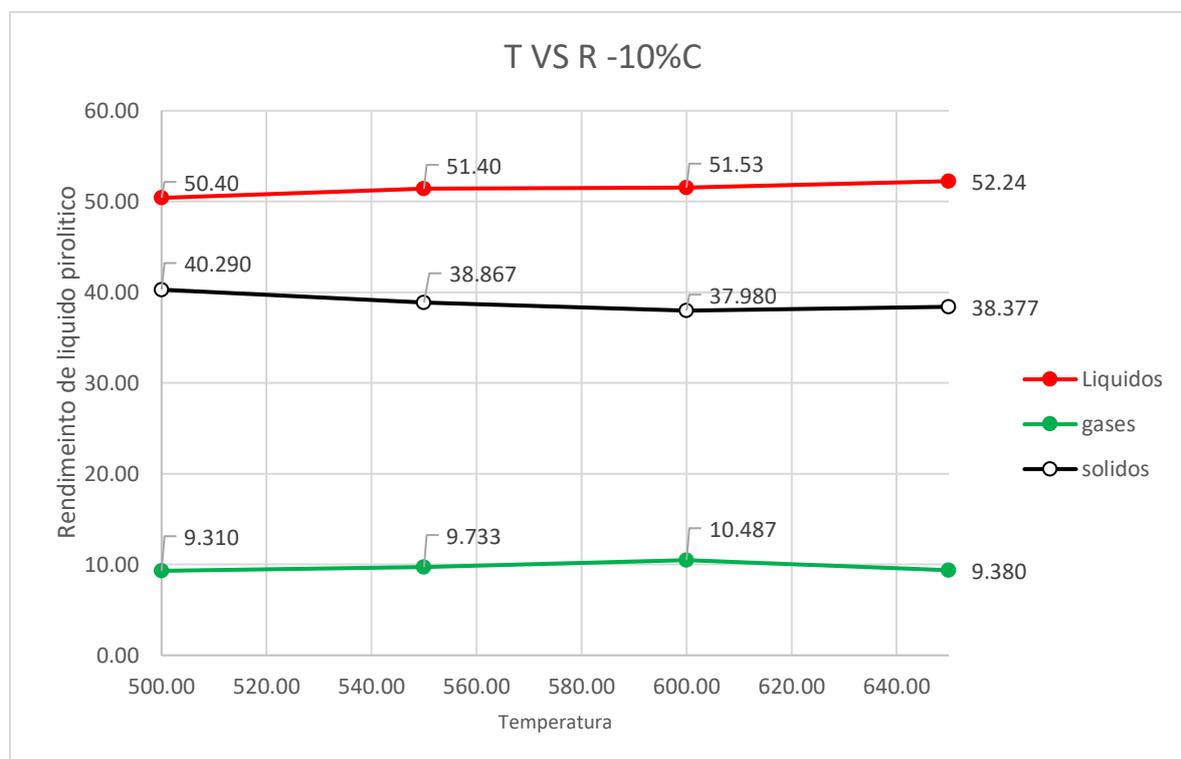
Sin embargo, en el trabajo de investigación de Aravena (2016), la temperatura a la cual se obtiene el máximo rendimiento de productos líquidos es 450 °C, a medida que aumenta la temperatura de 450 °C hasta 750 °C, se genera la disminución de los productos condensables en favor de los gaseosos esto se debe al mayor crackeo generado por las altas temperaturas, ya que se espera que se supere la energía de disociación de una mayor cantidad de enlaces generando mayor cantidad de gases, mientras que los productos carbonizados se mantienen relativamente constantes en el rango de temperaturas. Esto último se principalmente el negro de humo, producto que no reacciona en ambiente inerte.

#### **-Pirolisis catalítica**

En la figura 109 se muestran los resultados de los productos al 10% de catalizador/MP, se observa que el rendimiento de productos líquidos es creciente en función a la temperatura, a 650 °C se obtiene 52.24% de rendimiento líquidos, 9.38% para los gases y 38.38% para los sólidos, al utilizar catalizadores de FCC gastados, mejora el rendimiento de productos líquidos, esto concuerda con Tian et al. (2022) , el cual analizó el rendimiento de los cauchos vulcanizados y sin vulcanizar; además, de un caucho compuesto en el proceso de pirolisis térmica y catalítica, comprobando que los cauchos vulcanizados generan menores rendimientos líquidos, para el caucho compuesto se comprobó que el rendimiento de los productos líquidos, sólidos y gaseosos dependerá del contenido de caucho NR,SBR y BR.

**Figura 109**

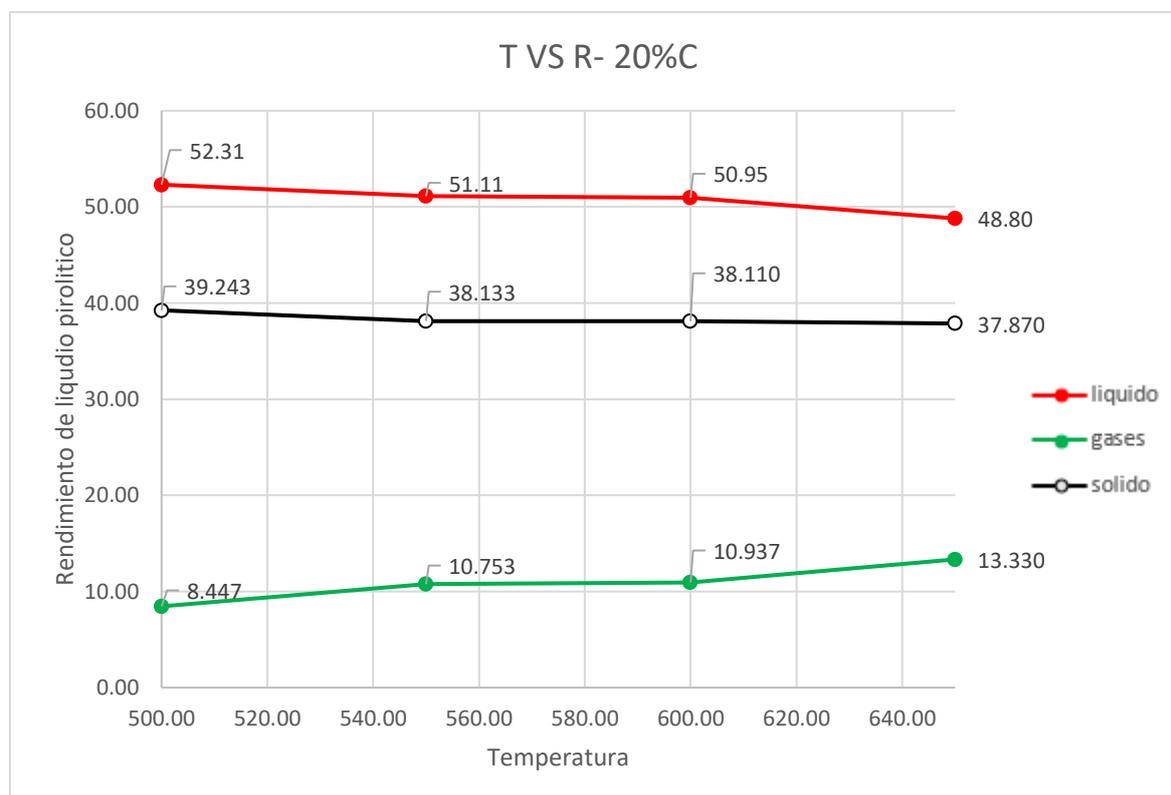
Rendimiento de los productos de la pirolisis catalítica al 10%



En la figura 110 se muestra el resultado de los productos obtenidos para la pirolisis catalítica al 20% de catalizador/MP, el rendimiento de productos líquidos es decreciente en función a la temperatura, a 500 °C se obtiene el mayor rendimiento de productos líquidos 52.31%, el menor rendimiento de productos gaseosos 7.93% y 39.67% de productos sólidos, a 650 °C disminuyen los rendimientos de los producto líquidos y sólidos (48.8% y 37.87%), pero el contenido de productos gaseosos se incrementa a 13.33%, el incremento en el rendimiento de productos gaseosos a expensas de los otros productos, posiblemente se deba a la cantidad agregada de catalizador que retrasa la reacción produciendo un efecto contrario al esperado.

**Figura 110**

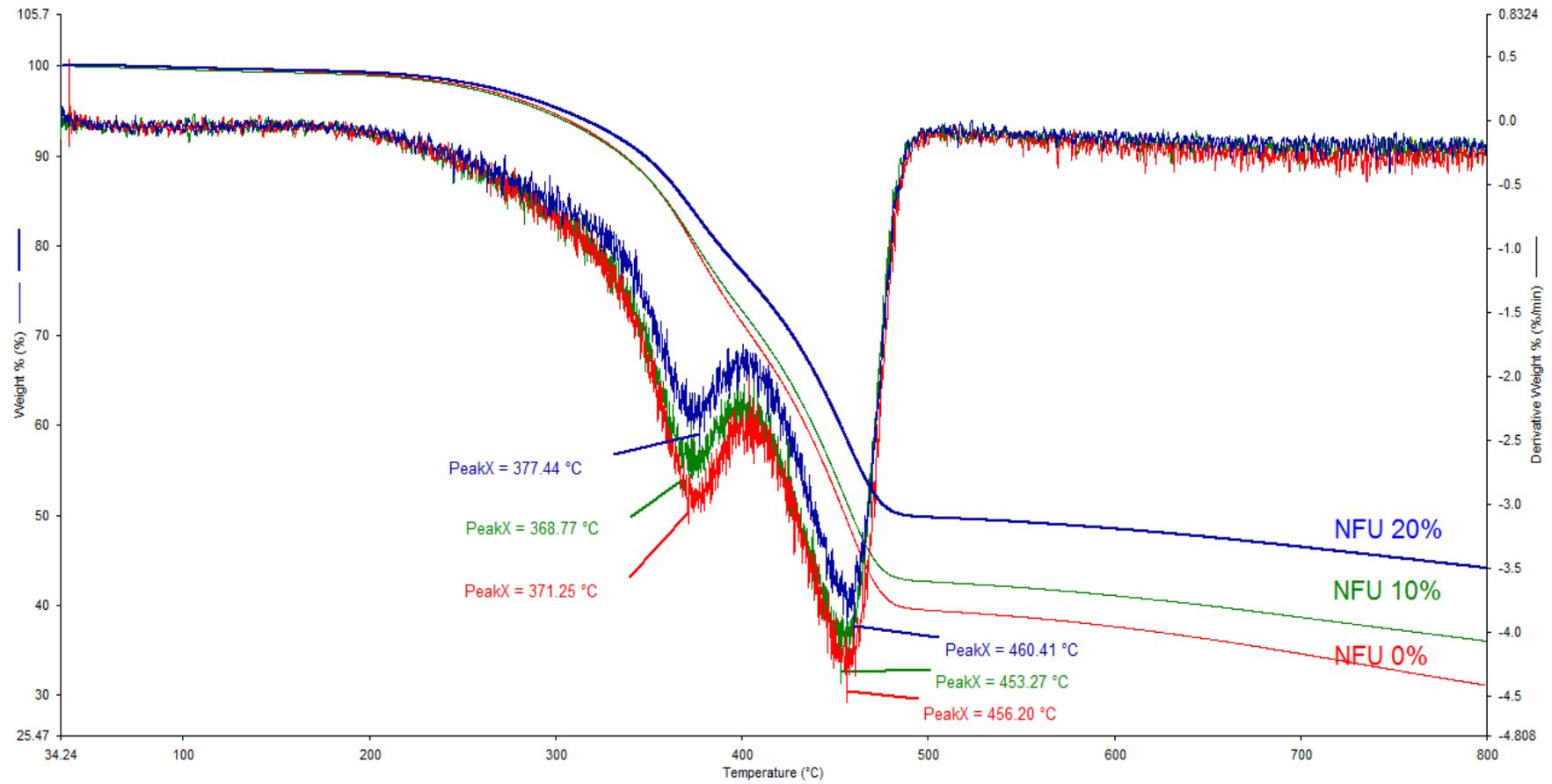
Rendimiento de los productos para la pirolisis catalítica al 20%



Según la investigación de (R. K. Singh et al., 2019) al analizar la interacción de tres categorías de residuos de neumáticos durante la pirolisis, el análisis de la TGA muestra dos fases de pérdida de masa lo que fue confirmado por dos picos obtenidos en el rango de temperatura de 300-520 °C. El primer pico representó la degradación de NR, mientras que el segundo pico mostró la degradación combinada de SBR y BR. El NR y el SR favorecen a la formación de productos líquidos y forman pocos gases condensables, el NR se degradó a un rango de temperatura más bajo 300–450 °C, mientras que el SR se degradó a 360–500 °C. Se informó que los picos de temperatura de degradación de SBR 440–460 °C y BR 455–465 °C estaban muy cerca y generalmente estaban representados por un solo pico en el rango de temperatura de 440–500 °C, el SBR favorece a la formación de productos gaseosos y sólidos, reduciendo el contenido de productos líquidos.

**Figura 111**

Análisis termogravimétrico a la muestra con 0, 10% y 20% de catalizador



La investigación mencionada, consolida nuestra TGA en los dos “picos” de cada condición de E-cat mostrados en la figura 111, ya que los valores se encuentran en el intervalo de temperaturas donde existen las reacciones de pirolisis.

La curva verde que es al 10% de catalizador /MP, tiene dos “picos” uno de 368.77 °C y otro de 453.27 °C, que son menores a los “picos” mostrados por la pirolisis térmica representada con la curva de color rojo, lo que posiblemente pueda favorecer al rendimiento de productos líquidos, el 20% de catalizador /MP, representada por la curva de color azul tiene dos “picos” de 377.44 °C y 460.41 °C, que al compararlo con las otras curvas se ve que los “picos” son mayores, por ende se puede suponer que terminan sus reacciones a una mayor temperatura; por lo tanto posiblemente contribuya a la generación de productos gaseosos reduciendo los productos líquidos, explicando así el comportamiento de los resultados para pirolisis al 20% como se mostró en la figura, todas los experimentos de TGA fueron a 8 °C/min.

En la tabla 45 se muestran comparaciones de características y resultados que tuvieron otras investigaciones similares, con respecto a la nuestra en la pirolisis térmica.

**Tabla 45**

Comparación de características y resultados para la pirolisis térmica

Pirolisis térmica							
Autores	Tipo de neumáticos	Velocidad de calentamiento (°C/min)	Tipo de Reactor	Temperatura (°C)	Rendimiento de productos líquidos (%)	Rendimiento de productos sólidos (%)	Rendimiento de productos gaseosos (%)
<u>Datos de la presente tesis</u>	Camiones cisterna	8	Tubular horizontal	650	50.18	38.02	11.8
(Pretell et al., 2021)	Camiones de minería	Nd	Tubular horizontal	550	54.32	39.87	5.81
(Gamboa et al., 2020)	Camiones	Nd	cónico	475	50.2	Nd	Nd
(Ucar et al., 2005)	Camiones	7	lecho fijo	650	48.4	41.7	7.6
(R. K. Singh et al., 2019)	vehículos pesados	20	Semi continuo	750	62.67	27.33	10
(Aylón et al., 2010)	Nd	Nd	tornillo	600	41.5	40.6	17.9
(Li et al., 2016)	Nd	15	agitado	500	55.5	40	4.5
(Aravena, 2016)	Nd	150	lecho fijo	450	57	36	7

En la tabla 46, se muestran comparaciones de características y resultados que tuvieron otras investigaciones similares, con respecto a la nuestra en la pirolisis catalítica.

**Tabla 46**

Comparación de características y resultados para la pirolisis catalítica

Pirolisis catalítica							
Autores	Velocidad de calentamiento (°C/min)	Tipo de Reactor	Catalizador	Temperatura (°C)	Rendimiento de productos líquidos (%)	Rendimiento de productos sólidos (%)	Rendimiento de productos gaseosos (%)
<u>Datos de la presente tesis</u> (C. Wang et al., 2019)	8	Tubular horizontal	E-cat.	500	52.31	39.24	8.45
(Li et al., 2016)	15	Agitado	ZSM-5	500	55.65	37.86	6.49
			USY		53.49	36.54	9.97
			B		54	37.76	8.24
			SAPO-11		55.12	34.43	10.45
			ZSM-5		55.12	38.71	6.17

#### 4.3.3. Caracterización del producto líquido obtenido por pirolisis

##### a) Propiedades físicas del producto líquido.

Se realizó la caracterización fisicoquímica del producto líquido obtenido de los diferentes ensayos del proceso de pirolisis de los residuos provenientes de neumáticos fuera de uso, como se explicó en párrafos anteriores, las muestras examinadas fueron aquellas obtenidas a las siguientes condiciones de temperatura de 500, 550, 600 y 650 °C-térmicamente, con una relación E-cat/MP de 10, 17.76, 20% - catalítica, velocidad de calentamiento de 8 °C/min). Se analizaron las diversas características que debe contener dicho producto: el poder calorífico, viscosidad cinemática, densidad, destilación, gravedad API, contenido de azufre. En la tabla 46 se muestran los resultados obtenidos.

La calidad de los productos líquidos (características físicas y químicas), se vieron alteradas por las diferentes condiciones de temperatura, debido a las diversas reacciones que se producen para cada rango de temperatura, por lo mencionado antes es posible considerar al producto líquido como un combustible diferente en cada rango de temperatura, esto se contrasta con lo presentado por R. k Singh et al. (2018) y Gamboa et al. (2020); además, el catalizador que puede acelerar como frenar las reacciones principales sobre los cauchos NR, SBR y SR como se mostró en el análisis TGA.

En la investigación realizada por Cortés (2015), los productos líquidos presentan un nivel de agua que oscila entre el 3% y el 5% en volumen. Esta cantidad se debe a la ocurrencia de diversas reacciones durante el proceso, lo cual también se observa en la investigación, donde la presencia mínima de agua se debe a la gran cantidad de reacciones que tienen lugar en el proceso y directamente en la muestra alimentada (composición). Los resultados revelan que, además de alquitranes y aceites (compuestos orgánicos), el líquido también contiene agua. La presencia de este componente se atribuye a la deshidratación de materiales de relleno, como los ácidos grasos.

Existen dos mecanismos para la liberación de agua durante la pirolisis, la primera es la eliminación de humedad y la segunda corresponde a la reacción del grupo hidroxilo (Han et al., 2018)

El Contenido de agua tiene origen mínimamente en la composición del neumático, ya que, en el análisis próximo, nos dan unos resultados ideales con respecto a los principales componentes del NFU, del cual se pudo calcular un aproximado de humedad de 0.38 % (m/m).

Se obtuvieron de 3.34 a 5.64% en volumen de agua, el contenido de humedad elevado podría ser influenciado por el sistema de enfriamiento, teniendo este sistema un contacto indirecto con el refrigerante (hielo) y la temporada de verano que evapora al refrigerante que

se encuentra expuesto al medio ambiente, condensándose en las uniones y tapones del sistema, al tener el sistema en vacío, se da la succión del rocío de agua que se forma en los tapones y en la parte exterior del recipiente colector hacia la parte interna donde se colecta el líquido pirolítico, este último el mayor causante de la presencia de agua la pirolisis, el contenido de humedad presentado por Pretell et al. (2021) es de 2.7% en volumen de agua, el cual utilizo el mismo reactor y sistema de enfriamiento.

En la tabla número 47 se presenta los resultados obtenidos, después de realizar los análisis de laboratorio correspondientes.

Del ensayo de Destilación a 760 mmHg, el cual se denomina ensayo ASTM D86, el cual a través de sus resultados aplicados al software de uso gratuito DWSIM se puede estimar el punto de inflamación, viscosidad cinemática, punto de escurrimiento, índice de cetano, poder calorífico bruto y densidad, como lo propuesto por Ramos et al. (2023), el cual estima las características mencionadas, por medio de curvas de destilación, estableciendo el número de pseudocomponentes y las propiedades termodinámicas necesarias para realizar dicha estimación y a su vez calculando también el error que tiene los datos estimados con los obtenidos por ensayos experimentales. Las características estimadas para esta investigación se presentan en la tabla 48 y en la tabla número 49 se presenta el error que presentan con las pruebas de laboratorio.



Debido al contenido de humedad elevado se tuvo que realizar un tratamiento previo utilizando una centrifuga (apéndice 10 - Destilación “ASTM D86”) a 80 RPM por 30 min para separar el agua del combustible alternativo.

**Tabla 48**

Estimación de propiedades fisicoquímicas utilizando las curvas de destilación de la ASTM D86

	NFU -500 - 0%	NFU -550 - 0%	NFU -600 - 0%	NFU -650 - 0%	NFU -500 - 10%	NFU -500 - 20%	NFU -500 - 17.76%
<b>Propiedades del combustible</b>	Resultado final						
<b>Punto de inflamación (°C)</b>	57.1304	58.978	63.7528	64.3101	68.4582	69.4155	67.2464
<b>Viscosidad cinemática a 40 °C (cSt)</b>	5.270829	4.08892	4.514407	8.431431	8.4411	8.57871	8.6361
<b>Punto de escurrimiento (°C)</b>	-0.0741	-7.07059	-4.89857	12.6329	12.3537	12.7082	13.1076
<b>Índice de cetano</b>	57.0599	55.8364	55.8646	57.2909	57.2226	57.1666	57.1833
<b>Poder calorífico bruto (Mj/kg)</b>	45.9702	46.0544	45.9422	45.9594	46.0888	45.8232	45.8339
<b>Densidad a 60 °F (kg/m<sup>3</sup>)</b>	815.248	812.5	815.408	818.979	821.14	821.798	819.984

**Tabla 49**

Cálculo del error para las características estimadas y de laboratorio

Propiedad del combustible	Resultado estimado		Resultado experimental		Error (%)	
	Térmico (500 °C sin E-cat)	Catalítico (500 °C con 17.7% de E-cat)	Térmico (500 °C sin E-cat)	Catalítico (500 °C con 10% de E-cat)		
Viscosidad cinemática a 40 °C (cSt)	5.27	8.64	6.92	9.23	23.83%	6.43%
Poder calorífico bruto (MJ/kg)	45.97	45.83	42.57	43.10	7.99%	6.33%
Densidad a 60 °F (kg/m <sup>3</sup> )	815.25	819.98	954.30	950.70	14.57%	13.75%

#### 4.3.4. *Discusión acerca de la caracterización del producto líquido.*

Después de realizar el análisis estadístico y maximizar el rendimiento de productos líquidos, este último se compara en la tabla 49 con diversos combustibles y crudos para ver si cumple con las especificaciones mínimas requeridas para ser usado como combustible directo, caso contrario se necesitará diversos tratamientos para mejorar su calidad.

En la tabla 50 se muestra la comparación de resultados de las propiedades del producto líquido con investigaciones realizadas.

#### a) **Características fisicoquímicas del producto líquido**

Según el informe de resultado de los análisis físico-químico del producto líquido de las pirolisis provenientes de NFU, se realiza la comparación con los resultados de los combustibles comerciales (Diésel B5, Diésel N°2), Crudo Talara y Selva. Como se muestra en la tabla 27

La siguiente tabla fue elaborada con la información adaptado de (Moizo, 2013), (Ancota, 2019), (Rojas, 2018), (Ramos y Pretell, 2021) y (Pretell et al., 2021)

**Tabla 50**

Comparación de resultados de las propiedades del producto líquido con las especificaciones técnicas del diésel B5 y diésel N°2.

Ensayo	Método de Ensayo	Producto Líquido (Producto líquido maximizado 17.76%)	Diésel B5		Diésel N°2		Crudo Talara		Crudo Selva	
			Min.	Max.	Min.	Max.	Min.	Max.	Min	Max.
<b>Poder Calorífico Bruto (MJ/Kg)</b>	ASTM D-240	43.1043	-	45.000	-	45.438	41.717	46.213	42.869	44.601
<b>Viscosidad (cSt)</b>	ASTM D-445	9.23	1.7	4.1	1.7	4.3	2.791	30.6	16.86	371
<b>Gravedad API (°API)</b>	ASTM D-287	17	32	36	-	33.6	-	34.2	-	22.7
<b>Contenido de agua (% v/v)</b>	ASTM D-4377	5.2022	-	0.1	Reportar		Nd	3.9	0.05	1.1
<b>Densidad (kg/m<sup>3</sup>)</b>	ASTM D-287	950.7	843	870	800	876	Nd	nd	896.7	905.4
<b>Destilación ASTM (°C)</b>	ASTM D-86									
<b>Vol 10%</b>		141.5	Reportar		Reportar					
<b>Vol 50%</b>		321.5	Reportar		Reportar					
<b>Vol 80%</b>		369.5	282	360	-	357	-	-	-	-
<b>Contenido de azufre (%m/m)</b>	ASTM D-4294	1.1	-	0.005	-	0.005	0.0403	0.394	0.0666	1.85

Al realizar la comparación, se observa que la viscosidad obtenida en la presente investigación es mayor a las especificaciones técnicas de los combustibles comerciales Diésel B5 y N°2 reportadas por Petroperú, con lo cual se concluye que el producto líquido cuenta con componentes pesados y ligeramente pesados.

La densidad obtenida es mayor a las especificaciones brindadas en el Diésel B5 y N°2 reportadas por Petroperú, esto se debería a que el tipo de combustible obtenido del proceso de pirólisis es de tipo pesado. Esta información también fue corroborada por los grados API de la muestra analizada, la cual muestra una mayor predominancia de hidrocarburos pesados; sin embargo, si comparamos los datos del mayor líquido pirolítico obtenido con los crudos de Talara y Selva se asemejan bastante con respecto a su viscosidad, y poder calorífico o está en el rango de estos, así como su contenido de azufre y ligeramente su densidad.

En el Perú se producen y procesan básicamente dos tipos de crudo, el crudo pesado denominado “Selva” y un crudo más liviano denominado “Talara”, de la tabla 50. que muestran sus características fisicoquímicas y se las compara con las del mayor líquido de pirólisis, se puede apreciar que cumple con la mayoría de las características para ser considerado como el crudo “selva.

Para la tabla 51 se usan los valores obtenidos de los productos líquidos pirolíticos térmico a 0% y catalítico maximizado a 17.76% de relación E-cat/MP y a 500°C.

**Tabla 51**

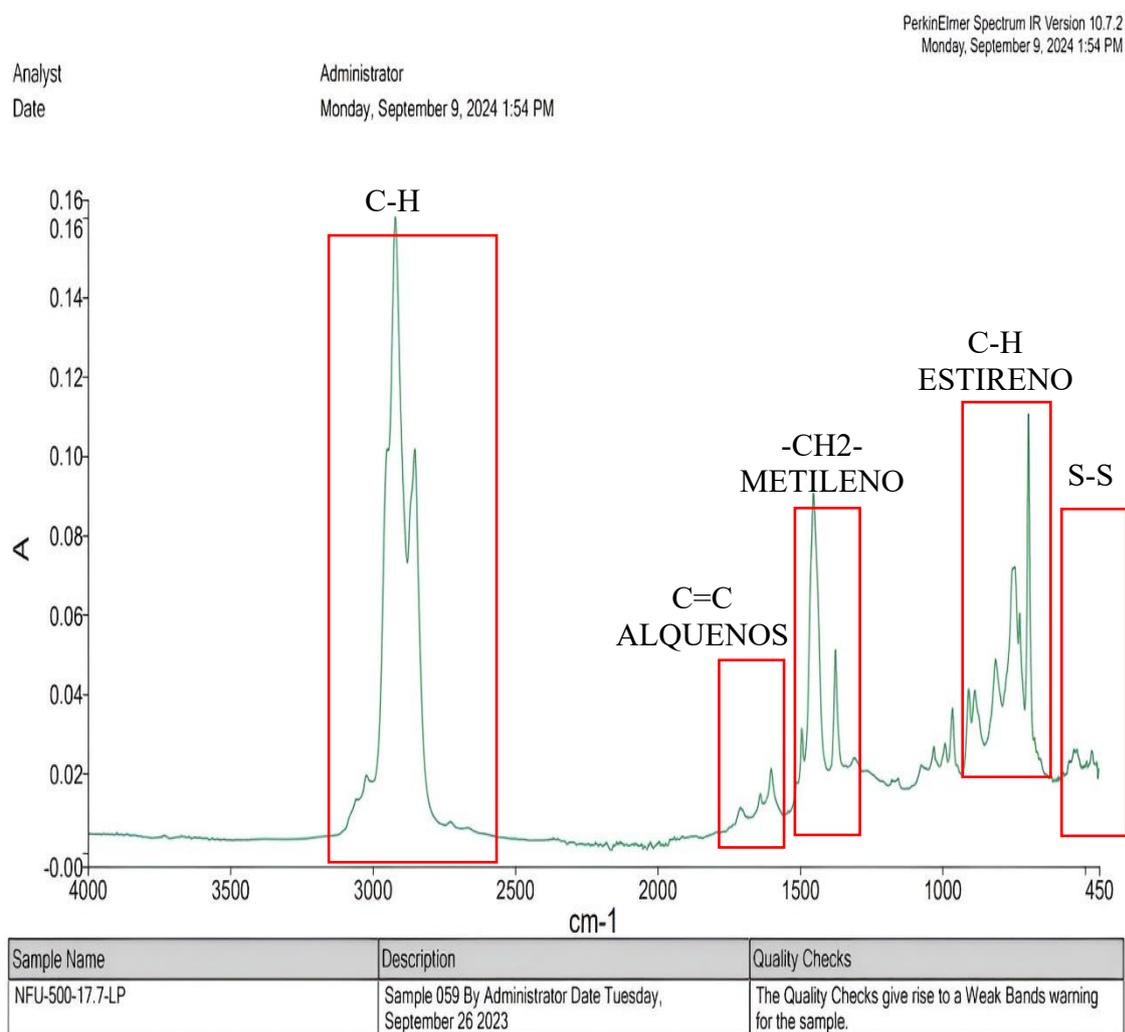
Comparación de resultados de las propiedades del producto líquido con investigaciones realizadas.

Ensayo	Producto Líquido (Investigación)		Producto Líquido (Cortés, 2015)		Producto Líquido (Pretell et al., 2021)	Producto Líquido (Wang et al., 2019)	
	Térmico	Catalítico (FCC)	Térmico	Catalítico (CaCO <sub>3</sub> )	Térmico	Térmico	Catalítico FCC
	<b>Temperatura de operación (°C)</b>	500	500	800	800	550	400
<b>Relación catalizadora/materia prima (%)</b>	0	17.76	0	5,10,15	0	0	2.85
<b>Velocidad de calentamiento(°C/min)</b>	8	8	2	2	10	2	2
<b>Duración (min)</b>	3h	3h	2h	2h	3h	-	-
<b>Poder Calorífico Bruto (MJ/Kg)</b>	42.5670	43.1043	45±3	43±4, 45±5, 42±5	40.81	-	-
<b>Viscosidad (cSt)</b>	6.92	9.23	2,43	2.36, 2.33, 2.36	5.824	5.556	5.461
<b>Densidad (kg/m<sup>3</sup>)</b>	954.3	950.7	890	860,880,890	911	0.9308	0.9415
<b>Contenido de azufre (%masa)</b>	1.1	1.1	-	-	0.813	0.76	0.8
<b>Rendimiento de productos líquidos (%)</b>	47.11	52.40	29.8	42.3,43.1,42.9	54.32	42.68	40.71

## b) Análisis FTIR

### Figura 112

Espectrofotometría de la muestra líquida maximizada obtenida al 17.76% de relación E-cat/MP y a 500°C



En la investigación de Jerzak et al. (2024), se presentan los espectros FT-IR de líquidos de pirolisis sin y con catalizador. En ambos tipos de líquidos de pirolisis se observaron picos de absorbancia asociados con enlaces C-H en las frecuencias de 2922, 2858, 904, 749 y 696  $\text{cm}^{-1}$ , siendo los picos más fuertes a 2922 y 749  $\text{cm}^{-1}$ . Las vibraciones a 749 y 696  $\text{cm}^{-1}$ , se atribuyen a grupos aromáticos C-H del estireno. El líquido de pirolisis con catalizador mostró un pico más débil a 696  $\text{cm}^{-1}$ , lo cual podría estar relacionado con

hidrocarburos de cadena abierta que contienen cuatro o más grupos CH<sub>2</sub>. Además, se confirmó la presencia de alquenos en líquidos de pirolisis con catalizador mediante un pequeño pico a 1600 cm<sup>-1</sup> (C=C). Se observaron también vibraciones características de grupos metileno (-CH<sub>2</sub>-) a 1449 cm<sup>-1</sup>, sugiriendo la presencia de componentes elastoméricos. Finalmente, pequeñas vibraciones del puente S-S a 475 cm<sup>-1</sup> indicaron que una parte del azufre se transfirió a los líquidos de pirolisis, siendo más notable en el líquido de pirolisis con catalizador.

#### ***4.3.5. Discusión acerca de la caracterización de los productos sólidos y Ecat FCC*** ***caracterización de los productos solidos***

##### **a) Caracterización de los productos solidos**

El rendimiento para los productos solidos está en el rango de 37 a 42% para la pirolisis térmica y catalítica, valores muy cercanos a los obtenidos por R. K. Singh et al. (2019) y Pretell et al. (2021), para la producción de solidos a partir de la pirolisis térmica en un rango de 35 a 40% para el primer autor y 39 a 44% de productos sólidos para el segundo autor, los sólidos producidos en la pirolisis catalítica realizada por Tian et al. (2022) fue de 27.14%.

En la tabla 52 se muestra el resultado del poder calorífico realizado al carbón para la pirolisis térmica y catalítica a 500 °C; además, de los resultados presentados para otros combustibles de uso típico.

**Tabla 52**

Poder calorífico superior en MJ/kg de los sólidos de la pirolisis vs combustibles de uso típico.

Materia prima	Productos sólidos térmicos a 500 °C	Productos sólidos catalíticos a 500 °C 17.76 % de catalizador	Productos sólidos térmicos a 500 °C (referencias)	Leña	GLP	GN
32.68	32.01	32.14	23.49	19.87	49.28	53.67

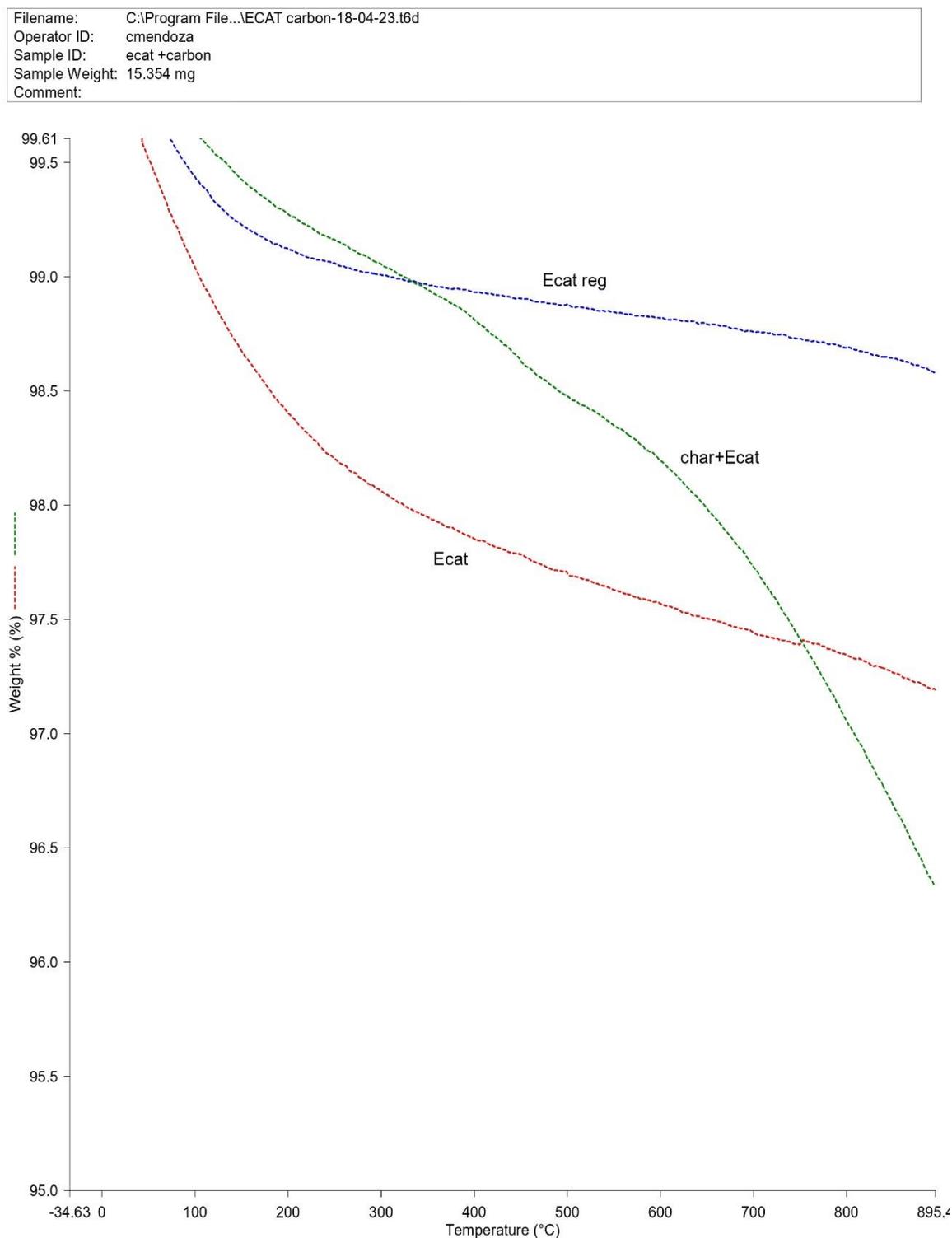
*Nota.* Adaptado de (Pretell et al., 2021), para comparar con los resultados obtenidos en la presente investigación.

#### **b) Regeneración del catalizador (E-cat)**

El análisis termogravimétrico que se muestra en la figura 113, realizado al catalizador (E-cat), al catalizador después de la pirolisis (E-cat + char) y al catalizador regenerado (E-cat reg) nos describe el comportamiento que tiene al interior de la pirolisis, el catalizador (E-cat) sufre cambios ligeros en su masa a partir de los 100 °C, posiblemente se deba a la humedad y la presencia de contaminantes orgánicos arrastrados de la unidad de FCC, para el catalizador procedente de la pirolisis (E-cat + char), se observó cambios en su masa a partir de los 300 °C, esto debido a que el catalizador contiene trazas de carbono que son arrastradas de la pirolisis y se aprecia el comportamiento del catalizado regenerado (E-cat) que presente una pérdida de masa casi despreciable y constante a medida que se incrementa la temperatura.

**Figura 113**

Análisis termogravimétrico al catalizador E-cat, catalizador gastado y regenerado



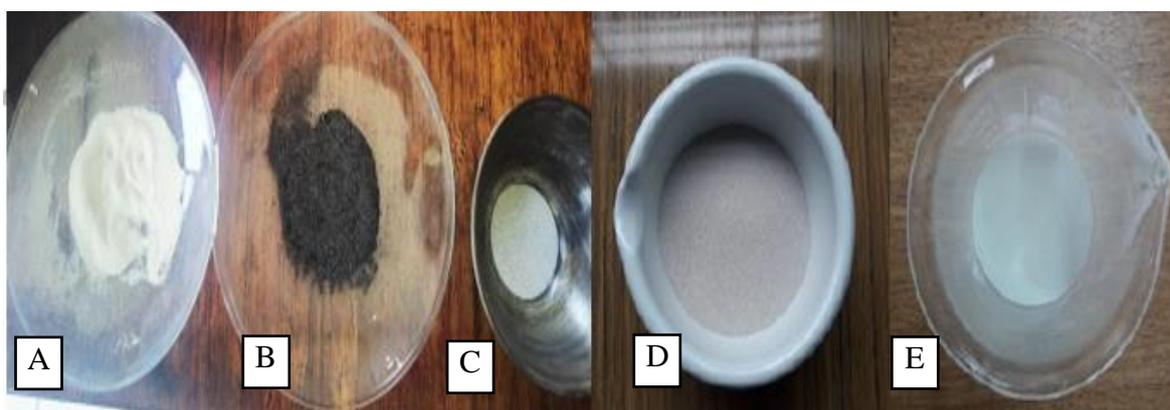
18/04/2023 16:44:09

1) Heat from 40.00°C to 900.00°C at 20.00°C/min

En la figura 114 se compara visualmente la regeneración del catalizador, en la imagen del lado izquierdo “A” se aprecia primero al catalizador regenerado de color plomo claro, al media se encuentra al catalizador contaminado “B” con carbon proveniente de la pirolisis debido a esto tiene un color oscuro, caracterisitico del carbon y al lado derecho “C” se encuentra el catalizador (E-cat), la imagen del lado derecho tomada de Ramos et al. (2020), nos muestra al catalizador E-cat “D” y al catalizador regenerado “E” antes de ser usado en la pirolisis.

### Figura 114

Regeneración del catalizador E-cat



El catalizador regenerado despues de ser usado en la pirolisis y antes de ser usado en ella son visualmente semejantes, por lo antes expuesto se puede considerar que la recuperacion del catalizador fue exitosa, pero se debe realizar mas analisis para aceptar por completo dicha afirmacion.

## CONCLUSIONES

- Se pudo determinar el rendimiento de los combustibles líquidos obtenidos por pirólisis catalítica al vacío de neumáticos fuera de uso de camiones cisternas obteniéndose tres productos los cuales fueron líquidos, sólidos y gases con diversos rendimientos, utilizando un reactor semicontinuo horizontal tubular.
- Se evaluaron los efectos individuales de la temperatura y la relación catalizador/materia prima sobre el rendimiento de los productos líquidos obtenidos mediante pirólisis catalítica al vacío de neumáticos fuera de uso procedentes de camiones cisterna. Los resultados mostraron que la temperatura, no influye significativamente sobre los rendimientos de los productos líquidos. La relación catalizador/materia prima, influye pero no de manera significativa. Sin embargo, la interacción entre ambos factores (temperatura y relación catalizador/materia prima) sí tiene un efecto significativo en el rendimiento de los productos líquidos.
- El mayor rendimiento del producto líquido, 52.31%, se obtuvo a una temperatura de 500 °C y una relación de catalizador/materia prima del 20%. Maximizando el rendimiento de líquido, se obtuvo un rendimiento experimental de 52.4% en comparación con el pronosticado de 52.1724%. Los productos sólidos y gaseosos fueron de 39.67% y 7.93%, respectivamente.
- Los productos líquidos se caracterizaron mediante normas ASTM, concluyendo que son combustibles alternativos comparables al crudo Selva, lo que sugiere que se pueden obtener productos derivados con procesamientos posteriores. En conclusión, la pirólisis catalítica y térmica de neumáticos tiene diferentes propiedades fisicoquímicas; por lo tanto, cada rendimiento debe ser analizado como un combustible alternativo distinto.

## RECOMENDACIONES

- El tren de enfriamiento utilizado en el experimento no es adecuado para su uso en el ambiente específico de la ciudad de Lima durante el verano. El uso de hielo como refrigerante en estas condiciones resulta en un rápido derretimiento del tren de enfriamiento, lo que lleva a la formación de gotas de rocío entre las uniones y tapas del tren. Esto puede afectar negativamente el rendimiento y la eficacia del sistema de enfriamiento, para evitar este problema, se recomienda aislar el tren de enfriamiento del medio ambiente para mantener una temperatura más estable y evitar que el hielo se derrita rápidamente. Esto podría lograrse mediante la implementación de algún tipo de cubierta o aislamiento térmico para proteger el tren de las altas temperaturas del verano.
- Se recomienda captar los productos gaseosos para luego poder caracterizarlos, a través del uso de las bolsas inertes Flex film o recipiente de material polimérico que son aplicados para captar efluentes gaseosos.
- La presente investigación es un punto de partida para próximas investigaciones a partir de los subproductos obtenidos, como son las posibles aplicaciones del carbón como adsorbentes para efluentes líquidos contaminados o la integración del gas como fuente de energía para la misma pirolisis.

**BIBLIOGRAFIA**

- Acosta, R., Moncada, S., Gauthier-Maradei, P., & Alcida Nabarlatz, D. (2013). estudio preliminar de la producción de aceite y carbón mediante pirólisis intermedia de caucho de llantas usadas. Preliminary study of oil and char production by intermediate pyrolysis of scrap tires rubber. *Rev. Invest. Univ. Quindío. (Col.)*, 24(1), 139-145.
- Alarifi, I. M. (2022). Synthetic rubber. *synthetic engineering materials and nanotechnology*, 79-100. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-824001-4.00012-0>
- Al-lal, A. M., Canoira, L., & Fernandez, A. (2015). *Investigación de mezclas de caucho, con bajo contenido en cloro, para bandas transportadoras con características ignífugas* [Tesis Doctoral]. Universidad Politécnica de Madrid.
- Ancota, W. (2019). *Reemplazo del combustible Diésel B5 por gas natural de una caldera acuotubular de 700 HP a fin de mejorar la eficiencia térmica* [Tesis de grado]. Universidad Nacional Jorge Basadre Grohmann.
- Aquino, E., & Francesqui, R. (2018). *Efecto del precio internacional del petróleo y del tipo de cambio en la importación de Diésel de PetroPerú* [Trabajo de Investigación]. Universidad San Ignacio de Loyola.
- Arabiourrutia, M., Lopez, G., Artetxe, M., Alvarez, J., Bilbao, J., & Olazar, M. (2020). Waste tyre valorization by catalytic pyrolysis – A review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 129. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2020.109932>
- Aravena, C. (2016). *Estudio de pirolisis catalítica de desechos provenientes del caucho* [Tesis de grado]. Universidad de Chile.
- Arya, S., Sharma, A., Rawat, M., & Agrawal, A. (2020). Tyre pyrolysis oil as an alternative fuel: A review. *Materials Today: Proceedings*, 28, 2481-2484. <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2020.04.797>

- ASTM. (2015). Standard Test Methods for proximate analysis of coal and coke by macro thermogravimetric analysis. En *American Society for Testing and Materials*. ASTM International. <https://doi.org/10.1520/D7582-15>
- ASTM. (2019a). Standard Test Method for bulk density of densified particulate biomass fuels. En *American Society for Testing and Materials* (p. 1). ASTM International. <https://doi.org/10.1520/E0873-82R19>
- ASTM. (2019b). Standard Test Method for heat of combustion of liquid hydrocarbon fuels by bomb calorimeter. En *American Society for Testing and Materials*. ASTM International. <https://doi.org/10.1520/D0240-19>
- ASTM. (2020). Standard Test Method for water in crude oils by potentiometric karl fischer titration. En *American Society for Testing and Materials*. ASTM International. <https://www.astm.org/d4377-00r11.html>
- ASTM. (2022). Standard Test Method for Density, relative density, and api gravity of crude oils by digital density analyzer. En *American Society for Testing and Materials*. ASTM International. <https://doi.org/10.1520/D5002-22>
- ASTM. (2023). Standard Test Method for distillation of petroleum products and liquid fuels at atmospheric pressure. En *American Society for Testing and Materials* (pp. 1-13). ASTM International. <https://doi.org/10.1520/D0086-2>
- ASTM. (2024). Standard Test Method for kinematic viscosity of transparent and opaque liquids (and calculation of dynamic viscosity). En *American Society for Testing and Materials* (pp. 1-10). ASTM International. <https://doi.org/10.1520/D0445-2>
- Ayanoğlu, A., & Yumrutaş, R. (2016). Production of gasoline and diesel like fuels from waste tire oil by using catalytic pyrolysis. *Energy*, *103*, 456-468. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2016.02.155>

- Aylón, E., Fernández-Colino, A., Murillo, R., Navarro, M. V., García, T., & Mastral, A. M. (2010). Valorisation of waste tyre by pyrolysis in a moving bed reactor. *Waste Management*, 30(7), 1220-1224. <https://doi.org/10.1016/j.wasman.2009.10.001>
- Bolivar Rojas, G. T., & Cuenca Mayorga, M. P. (2019). *evaluación del proceso de pirólisis como alternativa de valorización para la rebaba de caucho en Croydon Colombia S.A.* [Tesis de grado]. Fundación Universidad de América.
- Bonilla, P. A. (2019). *Compendio de técnicas de pirólisis para el reaprovechamiento energético de llantas usadas* [Tesis de maestría]. Universidad Nacional de Colombia.
- Bosques, G. (2014). *Síntesis de Polibutadieno cis-1,4 en Solución con Estireno y su uso como Hule Precursor en Poliestireno de Alto Impacto Obtenido Mediante el Proceso In Situ en Masa* [Tesis de maestría]. Centro de Investigación en Química Aplicada.
- Bowles, A. J., & Fowler, G. D. (2022). Assessing the impacts of feedstock and process control on pyrolysis outputs for tyre recycling. *Resources, Conservation and Recycling*, 182. <https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2022.106277>
- Campos, G. A., & Arrazola, F. del M. (2017). *Estudio Preliminar de la Pirólisis Catalítica de Desechos Plásticos para la Obtención de Combustibles* [Tesis de grado]. Instituto Politécnico Nacional.
- Castro, G. (2008). *Materiales y Compuestos para la Industria del neumático* [Tesis de grado]. Universidad de Buenos Aires.
- Choi, G. G., Oh, S. J., & Kim, J. S. (2016). Non-catalytic pyrolysis of scrap tires using a newly developed two-stage pyrolyzer for the production of a pyrolysis oil with a low sulfur content. *Applied Energy*, 170, 140-147. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2016.02.119>
- Consesa Ferrer, J. A. (1996). *Estudio de la pirolisis de residuos plásticos de polietileno y neumáticos usados* [Tesis doctoral]. Universidad de Alicante.

- Cortés, D. (2015). *Exploración de la obtención del fuel oil a partir de pirólisis de desechos de neumáticos en presencia de catalizadores básicos* [Tesis de grado]. Universidad de los Andes.
- Criollo, A. (2014). *Caracterización de caracterización de caucho reciclado proveniente de scrap y de neumáticos fuera de uso para su potencial aplicación como materia prima* [Tesis de grado]. Universidad Politécnica Salesiana.
- Gamboa, A. R., Rocha, A. M. A., dos Santos, L. R., & de Carvalho, J. A. (2020). Tire pyrolysis oil in Brazil: Potential production and quality of fuel. En *Renewable and Sustainable Energy Reviews* (Vol. 120). Elsevier Ltd. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2019.109614>
- García, R., & Tomé, A. (2017). *Análisis de las Rutas de Producción de Isobutileno* [Tesis de grado]. Universidad de Sevilla.
- Grados, A. M. (2018). *La Importancia de una regulación especial para la gestión de los neumáticos fuera de uso en el Perú* [Tesis de maestría, Pontificia Universidad Católica del Perú]. [https://tesis.pucp.edu.pe/repositorio/bitstream/handle/20.500.12404/15644/Grados\\_Mi\\_teen\\_n\\_Importancia\\_regulaci%C3%B3n\\_especial1.pdf?sequence=1](https://tesis.pucp.edu.pe/repositorio/bitstream/handle/20.500.12404/15644/Grados_Mi_teen_n_Importancia_regulaci%C3%B3n_especial1.pdf?sequence=1)
- Guillen, O., Sánchez, M., & Begazo, L. (2020). *Pasos para elaborar una tesis de tipo correlacional* (O. Guillen, M. Sánchez, & L. Begazo, Eds.; 1era edición).
- Gutiérrez, H., & de la Vara, R. (2008). *Análisis y diseño de experimentos* (P. Roig & L. Campa, Eds.; Segunda edición, Vol. 2). McGRAW-HILL/INTERAMERICANA EDITORES, S.A. de C.V. [https://gc.scalahed.com/recursos/files/r161r/w19537w/analisis\\_y\\_diseno\\_experimento\\_s.pdf](https://gc.scalahed.com/recursos/files/r161r/w19537w/analisis_y_diseno_experimento_s.pdf)

- Han, J., Li, W., Liu, D., Qin, L., Chen, W., & Xing, F. (2018). Pyrolysis characteristic and mechanism of waste tyre: A thermogravimetry-mass spectrometry analysis. *Journal of Analytical and Applied Pyrolysis*, 129, 1-5. <https://doi.org/10.1016/j.jaap.2017.12.016>
- Hernández, R., Fernandez, C., & Basptista, M. del P. (2014). *Metodología de la Investigacion* (J. Mares & M. Rocha, Eds.; 6.a ed.). McGRAW-HILL / INTERAMERICANA EDITORES, S.A. DE C.V.
- Hines, W. W., & Montgomery, D. C. (1996). *Probability and statistics in engineering and management science*. Wiley.
- Hooshmand, A., & Zandi-Atashbar, N. (2014). Fuel production based on catalytic pyrolysis of waste tires as an optimized model. *Energy Conversion and Management*, 87, 653-669. <https://doi.org/10.1016/j.enconman.2014.07.033>
- Jerzak, W., Wądrzyk, M., Sieradzka, M., & Magdziarz, A. (2024). Valorisation of tyre waste from a vulcanisation plant by catalytic pyrolysis – Experimental investigations using pyrolysis–gas chromatography–mass spectrometry and drop-tube–fixed-bed reactor. *Energy Conversion and Management*, 313. <https://doi.org/10.1016/j.enconman.2024.118642>
- Juárez, D., Balart, R., Ferrándiz, S., & García, D. (2012). estudio y análisis de los polímeros derivados del estireno-butadieno. Study and analysis of polymers styrene-butadiene derivatives. *3Ciencias, Innovación y desarrollo*.
- Laresgoiti, M. F., Caballero, B. M., De Marco, I., Torres, A., Cabrero, M. A., & Chomón, M. J. (2004). Characterization of the liquid products obtained in tyre pyrolysis. *Journal of Analytical and Applied Pyrolysis*, 71(2), 917-934. <https://doi.org/10.1016/j.jaap.2003.12.003>
- Li, W., Huang, C., Li, D., Huo, P., Wang, M., Han, L., Chen, G., Li, H., Li, X., Wang, Y., & Wang, M. (2016). Derived oil production by catalytic pyrolysis of scrap tires. *Cuihua*

- Xuebao/Chinese Journal of Catalysis*, 37(4), 526-532. [https://doi.org/10.1016/S1872-2067\(15\)60998-6](https://doi.org/10.1016/S1872-2067(15)60998-6)
- López, A., de Marco, I., Caballero, B. M., Adrados, A., & Laresgoiti, M. F. (2011). Deactivation and regeneration of ZSM-5 zeolite in catalytic pyrolysis of plastic wastes. *Waste Management*, 31(8), 1852-1858. <https://doi.org/10.1016/j.wasman.2011.04.004>
- Martínez, J. D., Betancur, M., Murillo, R., & Garcia, T. (2015). *Waste tire valorization by pyrolysis: production and application of the products* View project Activated carbon production from waste tires View project. <https://www.researchgate.net/publication/289999506>
- Martínez, J. D., Puy, N., Murillo, R., García, T., Navarro, M. V., & Mastral, A. M. (2013a). Waste tyre pyrolysis - A review. En *Renewable and Sustainable Energy Reviews* (Vol. 23, pp. 179-213). Elsevier Ltd. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2013.02.038>
- Martínez, J. D., Puy, N., Murillo, R., García, T., Navarro, M. V., & Mastral, A. M. (2013b). Waste tyre pyrolysis - A review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 23, 179-213. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2013.02.038>
- Mejia, S., & Upegi, S. (2021). La Pirolisis y Otros Metodos para el Aprovechamiento de Residuos de Neumaticos como Fuente de Energia para la Industria. *Cuaderno Activa*, 16, 41-60.
- Menare, T. (2019). *Pirólisis catalítica de neumáticos residuales sobre Me/SiO<sub>2</sub>: Efecto de la naturaleza de la fase activa sobre la formación de limoneno* [Tesis de grado]. Universidad del Bio-Bio.
- Meza, I. (2014). *Diseño de una planta para la obtención de carbón activado a partir de neumáticos de automóvil fuera de uso (NFU's)*. [Tesis de grado]. Escuela Politécnica Nacional.

- MINAM. (2021). *Régimen especial de gestión y manejo de NFU* (024-2021-MINAM; pp. 1-14). Ministerio del Ambiente.
- MINEM. (2023). *Anuario estadístico de hidrocarburos*.  
<https://www.gob.pe/institucion/minem/informes-publicaciones/4702707-anuario-estadistico-de-hidrocarburos-2022>
- MINEM. (2024). *Revista estadística en cifras hidrocarburos*.  
<https://www.gob.pe/institucion/minem/informes-publicaciones/5264520-revista-en-cifras-edicion-diciembre-2023>
- Ministerio del ambiente. (2021). *Perú limpio Perú natural régimen especial de gestión y manejo de los neumáticos fuera de uso-nfu*. [www.gob.pe/minam](http://www.gob.pe/minam)
- Moizo, R. (2013). *Proyecto modernización refinería talara*.
- Mora, M., Alubja, M., & Proaño, O. (2014). Evaluación de la pirólisis térmica de aceite vegetal de desecho en un reactor batch. *Revista EPN*, 33(Pirolisis), 1.
- Naranjo, J., Palmay, P., & Jaramillo, K. (2024). Uso de un catalizador regenerado de la unidad de craqueo catalítico fluidizado para el reciclaje químico mediante glicólisis del poli-(tereftalato de etileno). *Revista Politécnica*, 53(1), 47-56.  
<https://doi.org/10.33333/rp.vol53n1.05>
- Navarro, R. M. (2007). *Pirólisis catalítica de polietileno. estudio de la evolución de la distribución de productos y desactivación del catalizador* [Tesis doctoral]. Universidad de Alicante.
- Ochoa, A., & Mahecha, D. (2018). *Evaluación del proceso de pirólisis para la obtención de combustibles a partir de llantas usadas* [Tesis de grado, Universidad Libre].  
<https://repository.unilibre.edu.co/bitstream/handle/10901/15885/Proyecto%20de%20Grado-%20Andrea%20Ochoa-%20Derly%20Mahecha.pdf?sequence=1&isAllowed=y>

- Olivares, D. (2016). *Planta de reciclaje de neumáticos de caucho Comercialización de miga de caucho* [Tesis de maestría, Universidad de Chile].  
<https://repositorio.uchile.cl/bitstream/handle/2250/140906/Olivares%20Carmona%20Daniel.pdf>
- Ordoñez, J., & Moreno, M. N. (2017). *Modelamiento de una unidad de micro-reacción de FCC para analizar el efecto del catalizador* [Tesis de grado]. Instituto Politécnico Nacional.
- Orlando, A., & Posada, G. (2019). *Producción y caracterización de un material compuesto a base de partículas de magnetita y matrices de caucho nitrilo butadieno* [Tesis doctoral]. Universidad Nacional de Colombia.
- OSINERGMIN. (2021). *Análisis del Mercado de Hidrocarburos*.
- OSINERGMIN. (2024). *Demanda nacional de combustibles líquidos*.  
<https://www.osinergmin.gob.pe/empresas/hidrocarburos/scop/documentos-scop>
- Peña, korina. (2023). *Evaluación de la pirólisis catalítica de neumáticos en desuso con zeolita sintetizada a partir de puzolana y sintética como catalizadores* [Tesis de grado]. Universidad Nacional de San Agustín de Arequipa.
- Pertuz, A., Oviedo, L. A., Navarro, U., Centeno, M. A., Odriozola, J. A., De, A., Vespucio, A., España, S., De, L. M., De Fcc, C., Agámez Pertuz, Y. Y., Oviedo Aguiar, L. A., Navarro Uribe, U., Centeno, M. A., & Odriozola, J. A. (2023). *Análisis de la microporosidad de catalizadores de FCC*.  
[https://doi.org/10.18257/raccefyn.30\(115\).2006.2248](https://doi.org/10.18257/raccefyn.30(115).2006.2248)
- Poblete, E. (2013). *Pirólisis catalítica de desechos plásticos mediante zeolitas modificadas con cobre* [Tesis de grado]. Universidad de Chile.
- Pretell, V., Ramos, W., Astorayme, M., & Pilco, A. (2021). Production of liquid fuels by vacuum pyrolysis of used tires. *Proceedings of the LACCEI international Multi-*

- conference for Engineering, Education and Technology, 2021-July.*  
<https://doi.org/10.18687/LACCEI2021.1.1.70>
- Qu, B., Li, A., Qu, Y., Wang, T., Zhang, Y., Wang, X., Gao, Y., Fu, W., & Ji, G. (2020). Kinetic analysis of waste tire pyrolysis with metal oxide and zeolitic catalysts. *Journal of Analytical and Applied Pyrolysis*, 152. <https://doi.org/10.1016/j.jaap.2020.104949>
- Ramos, W., Nahui-Ortiz, J., Erazo, R., Manrique, H., & Pretell, V. (2023). Modeling and Estimation of Physicochemical Properties of the Liquid Fuel Obtained from the Catalytic Pyrolysis of Disposable Masks. *Proceedings of the LACCEI international Multi-conference for Engineering, Education and Technology.*
- Ramos, W., & Pretell, V. (2020). Evaluation of plastic waste and catalysts for application in thermochemical processes. *Proceedings of the LACCEI international Multi-conference for Engineering, Education and Technology.*  
<https://doi.org/10.18687/LACCEI2020.1.1.131>
- Ramos, W., & Pretell, V. (2021). Optimization and characterization of liquid fuels obtained from catalytic pyrolysis of plastic waste. *Proceedings of the LACCEI international Multi-conference for Engineering, Education and Technology, 2021-July.*  
<https://doi.org/10.18687/LACCEI2021.1.1.95>
- Ramos, W., Silva, R., & Pretell, V. (2020). Catalytic pyrolysis of high-density polyethylene residues using FCC equilibrium catalyst. *Proceedings of the LACCEI international Multi-conference for Engineering, Education and Technology.*  
<https://doi.org/10.18687/LACCEI2020.1.1.105>
- Reyes, E. (2015). *Biodegradación del Caucho por Alternaria Alternata* [Tesis Doctoral]. Universidad Nacional Andrés Bello.
- Rojas, C. (2018). *Estudio de factibilidad técnico-económica de cambio de combustible e instalación de recuperador de calor en caldera Cimelco del hospital Virgen de Fátima*

- Chachapoyas para reducir costos de generación de vapor* [Tesis de grado].  
Universidad César Vallejo.
- Salvador, A. A. (2021). *Desarrollo de materiales poliméricos híbridos (caucho epdm-smc) sin uso de adhesivos* [Tesis doctoral, Universidad del País Vasco].  
[https://addi.ehu.es/bitstream/handle/10810/51125/TESIS\\_ALLUE\\_SALVADOR\\_AL EXANDRA.pdf?sequence=2](https://addi.ehu.es/bitstream/handle/10810/51125/TESIS_ALLUE_SALVADOR_AL EXANDRA.pdf?sequence=2)
- Sánchez, M. (2017). *Diagnóstico de sustentabilidad de neumáticos fuera de uso (NFU)*.
- Sebastián, W., & Urrego, P. (2019). *Análisis de ciclo de vida de la pirolisis como alternativa de gestión de residuos de llantas usadas: una revisión bibliográfica* [Tesis de maestría].  
Universidad Libre.
- Singh, R. K., Mondal, S., Ruj, B., Sadhukhan, A. K., & Gupta, P. (2019). Interaction of three categories of tyre waste during co-pyrolysis: Effect on product yield and quality. *Journal of Analytical and Applied Pyrolysis*, 141.  
<https://doi.org/10.1016/j.jaap.2019.05.007>
- Singh, R. k, Ruj, B., Jana, A., Mondal, S., Jana, B., Kumar Sadhukhan, A., & Gupta, P. (2018). Pyrolysis of three different categories of automotive tyre wastes: Product yield analysis and characterization. *Journal of Analytical and Applied Pyrolysis*, 135, 379-389. <https://doi.org/10.1016/j.jaap.2018.08.011>
- Solorzano, C. (2010). *Estudio de compatibilidad de elastómeros empleados en bombas de cavidades progresivas con crudo* [Tesis de grado]. Universidad Simón Bolívar.
- Sunarno, Zahrina, I., Reni Yenti, S., Sri Irianty, R., & Setia Utama, P. (2023). Catalytic co-pyrolysis of palm oil empty fruit bunch and waste tire using calcium oxide catalysts for upgrading bio-oil. *Materials Today: Proceedings*.  
<https://doi.org/10.1016/j.matpr.2023.03.290>

- Tahir, M. H., & Shimizu, N. (2023). Investigation of coupling synergistic interaction during Co-pyrolysis of cabbage waste and tire waste. *Journal of Analytical and Applied Pyrolysis*, 172. <https://doi.org/10.1016/j.jaap.2023.105992>
- Tian, X., Wang, K., Shan, T., Li, Z., Wang, C., Zong, D., & Jiao, D. (2022). Study of waste rubber catalytic pyrolysis in a rotary kiln reactor with spent fluid-catalytic-cracking catalysts. *Journal of Analytical and Applied Pyrolysis*, 167. <https://doi.org/10.1016/j.jaap.2022.105686>
- Torres Castellanos, N., & Torres Agredo, J. (2010). *Uso del catalizador gastado de craqueo catalítico (FCC) como adición puzolánica-revisión*. 30(2), 35-42.
- Ucar, S., Karagoz, S., Ozkan, A. R., & Yanik, J. (2005). Evaluation of two different scrap tires as hydrocarbon source by pyrolysis. *Fuel*, 84(14-15), 1884-1892. <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2005.04.002>
- Uriarte, D. (2018). *Experimentación de la obtención de combustibles líquidos a partir del polietileno de alta densidad* [Tesis de grado]. Universidad Nacional de Ingeniería.
- Vallejo, J. (2011). *Polibutadieno catalizado con neodimio bimodal* (Patent 2522546). <https://patentimages.storage.googleapis.com/18/ed/79/95edffce7bd87d/ES2522546T3.pdf>
- Varguez, J., Dominguez, M., & Mendoza, L. (2016). *Efecto de la incorporacion de alumina nanometrica en una matriz de policloropreno* [Tesis de maestría]. Centro de Investigación en Materiales Avanzados.
- Varón, D. J., Gimeno, R. B., Ferrándiz Bou, S., & Sanoguera, D. G. (2013). propiedades y procesado de la silicona líquida inyectada. Properties and processing of liquid silicone injected. *3Ciencias, Innovación y desarrollo*.
- Velarde, R., Artemio, J., Lazarte, G., Enrique, C., Rodriguez, D., & Luis, J. (2018). *Plan de negocio para la implementación de una planta de reciclaje de llantas usadas mediante*

- el proceso de Pirolisis* [Tesis de maestría, Universidad Peruana de Ciencias Aplicadas].  
<http://hdl.handle.net/10757/624919>;
- Velasquez, M., Giraldo, D., & Zapata, N. (2015). *Propiedades mecánicas bajo compresión y resistencia al desgaste abrasivo de piezas gruesas de caucho acrilonitrilo*.
- Velázquez, E., Dullak, A., & Duarte, S. (2016). Pirolisis convencional de neumáticos en desuso para la producción de combustibles líquidos. *Revista Científica de la UCSA*, 3(2), 25-32. [https://doi.org/10.18004/ucsa/2409-8752/2016.003\(02\)025-032](https://doi.org/10.18004/ucsa/2409-8752/2016.003(02)025-032)
- Villegas, E., & Zamudio, V. (2022). *Influencia de la temperatura y el tamaño de partícula durante el proceso de pirólisis en el rendimiento del combustible líquido obtenido a partir de residuos del poliestireno expandido (EPS)* [Tesis de grado]. Universidad Nacional del Centro del Perú.
- Wang, B., Fu, Y., Zheng, H., Zeng, D., & Xiao, R. (2021). Catalytic and noncatalytic fast pyrolysis of waste tires to produce high-value monocyclic aromatic hydrocarbons. *Journal of Analytical and Applied Pyrolysis*, 156. <https://doi.org/10.1016/j.jaap.2021.105131>
- Wang, C., Tian, X., Zhao, B., Zhu, L., & Li, S. (2019). Experimental study on spent FCC catalysts for the catalytic cracking process of waste tires. *Processes*, 7(6). <https://doi.org/10.3390/pr7060335>
- Williams, P. T., & Brindle, A. J. (2003). Aromatic chemicals from the catalytic pyrolysis of scrap tyres. En *Journal of Analytical and Applied Pyrolysis* (Vol. 67). [www.elsevier.com/locate/jaap](http://www.elsevier.com/locate/jaap)
- Zurita, M. (2010). *Modelos de optimización para las ventas de Novartis Ecuador S.A basados en algoritmos y análisis de regresión y simulación Montecarlo* [Tesis de grado]. Universidad San Francisco de Quito.

**APENDICE**

**Apéndice 1. Matriz de Consistencia**

**Tabla 53**

Matriz de Consistencia para la Obtención de Combustibles Líquidos por Pirólisis al Vacío de Neumáticos Fuera de Uso de Cisternas

---

**“EVALUACION DEL RENDIMIENTO DE COMBUSTIBLES LIQUIDOS OBTENIDOS POR PIROLISIS CATALITICA AL VACIO DE ENEUMATICOS FUERA DE USO”**

---

<b>Problema</b>	<b>Objetivo</b>	<b>Variables</b>	<b>Metodología</b>
<b>General</b>	<b>General</b>	<b>Variables Independientes</b>	<b>Tipo de investigación</b>
<p>- ¿Cuál es el rendimiento de los combustibles líquidos obtenidos mediante la pirólisis catalítica al vacío utilizando E-Cat, a partir de neumáticos fuera de uso?</p>	<p>Evaluar el rendimiento de los combustibles líquidos obtenidos mediante la pirólisis catalítica al vacío utilizando E-Cat, a partir de neumáticos fuera de uso.</p>	<p>-Temperatura (°C) -Relación Catalizador/Materia Prima (%m/m.) -Tamaño de partícula fija constante(25x25mm)</p>	<p>-La investigación es de tipo explicativa experimental</p>
<b>Específico</b>	<b>Específico</b>	<b>Variables Dependientes</b>	

---

			<b>Enfoque de la investigación</b>
<p>- ¿Cuál es el efecto de la temperatura y la relación del catalizador (E-Cat) con respecto a la alimentación de la materia prima, así como la interacción entre estos factores, sobre el rendimiento de los productos líquidos obtenidos mediante pirólisis catalítica al vacío de neumáticos fuera de uso?</p>	<p>Evaluar el efecto de la temperatura y la relación del catalizador (E-Cat) con respecto a la alimentación de la materia prima, así como la interacción entre estos factores, sobre el rendimiento de los productos líquidos obtenidos mediante pirólisis catalítica al vacío de neumáticos fuera de uso.</p>	<p>-Rendimiento de productos líquidos</p>	<p>-El enfoque de la investigación es cuantitativa</p>
<p>- ¿Cuáles son los parámetros de temperatura y la relación del</p>		<p><b>Variables Intervinientes</b> -Temperatura Ambiente (°C)</p>	<p><b>Alcance de la investigación</b></p>

---

catalizador (E-Cat) con la materia prima que logren un mayor rendimiento de productos líquidos obtenidos mediante pirólisis catalítica al vacío de neumáticos fuera de uso?

- ¿Cuáles son las propiedades fisicoquímicas de los combustibles líquidos obtenidos bajo las condiciones que resultaron en un mayor rendimiento en la pirólisis catalítica al vacío de neumáticos fuera de uso?

Determinar los parámetros de temperatura y la relación del catalizador (E-Cat) con la materia prima que logren un mayor rendimiento de productos líquidos obtenidos mediante pirólisis catalítica al vacío de neumáticos fuera de uso.

Evaluar las propiedades fisicoquímicas de los combustibles líquidos obtenidos bajo las condiciones que resultaron en un mayor rendimiento en la pirólisis catalítica al vacío de neumáticos fuera de uso.

-Presión Atmosférica (atm)  
-Reactor semicontinuo

-El alcance o nivel de la investigación es de tipo explicativo.

## Apéndice 2. Matriz de Operalización de variables

**Tabla 54**

Tabla de Operalización de Variables

---

**“EVALUACION DEL RENDIMIENTO DE COMBUSTIBLES LIQUIDOS OBTENIDOS POR PIROLISIS CATALITICA AL VACIO DE ENEUMATICOS FUERA DE USO”**

---

<b>Variables</b>	<b>Definición conceptual</b>	<b>Definición operacional</b>	<b>Dimensiones</b>	<b>Indicadores</b>
<b>Independientes</b>				
Temperatura	Es una magnitud de medida de la intensidad o cantidad de calor que posee un cuerpo y determina la dirección a la cual fluye el calor.	Grados centígrados que se dará al proceso de pirólisis.	°C	Rangos de temperatura establecidos para el experimento 500-650°C.
Relación Catalizador/Materia Prima	La relación catalizador/materia prima es una división en peso.	Porcentaje de catalizador en relación con la materia prima alimentada que se dará al proceso de pirólisis.	%m/m	Rangos de catalizador/ materia prima (150g) establecidos para el experimento 0%-20%.

---

Tamaño de partícula	Se define como el tamaño relativo de los NFUs representados en la muestra.	Tamaño específico que debe tener la muestra a pirolizar.	mm	Tamaño constante de 25x25mm
<b>Dependientes</b>				
Rendimiento de Productos líquidos	Es el producto con mayor porcentaje óptimo frente a otros productos.	Porcentaje de masa para el líquido obtenido en el proceso de pirólisis.	% m/m	Los rangos de porcentajes de producción están entre el 47-55%.
<b>Intervinientes</b>				
Temperatura Ambiente	La temperatura es una magnitud física que indica la energía interna de un cuerpo, o de un sistema termodinámico en general, es la temperatura que se manifiesta en el aire y en los cuerpos en forma de calor, que fluctúa entre dos extremos que,	Cuantos grados centígrados está el ambiente (Lima-Perú).	°C	20-30

---

se denominan: caliente y frío. Y esta se mide en grados Celsius, Fahrenheit, Kelvin o Rankine.

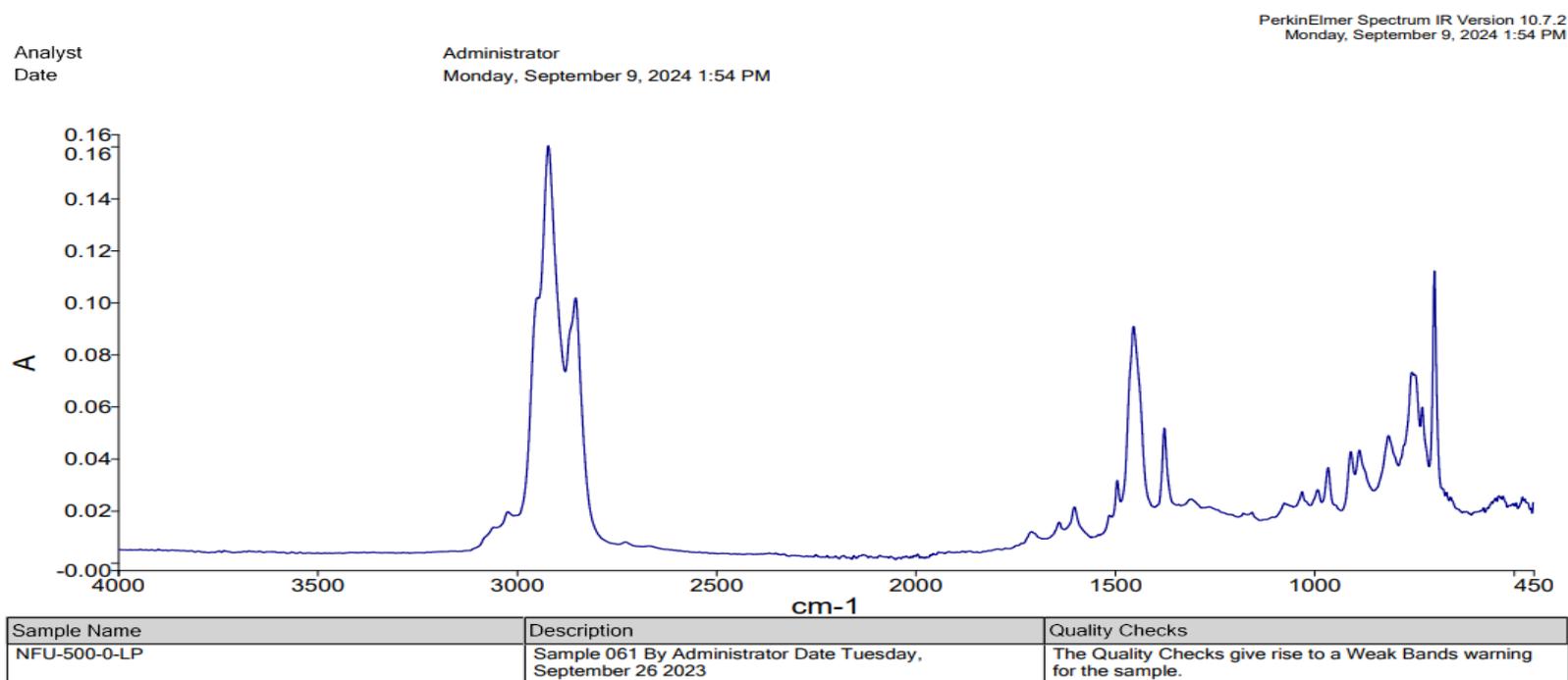
Presión Atmosférica	Es la presión que ejerce la atmósfera que rodea la tierra sobre todos los objetos que se hallan en contacto con ella, la presión atmosférica cambia con la altura sobre el nivel del mar y las condiciones atmosféricas.	Presión del entorno (Lima-Perú)	Atm	1
Reactor semicontinuo tubular horizontal	Equipo en cuyo interior tiene lugar una reacción química, diseñado para maximizar la conversión.	Equipo donde se llevará a cabo la reacción de pirolisis.	$cm^3$	Diámetro interior 5cm y longitud 60cm.

---

### Apéndice 3. Análisis FTIR de los productos líquidos.

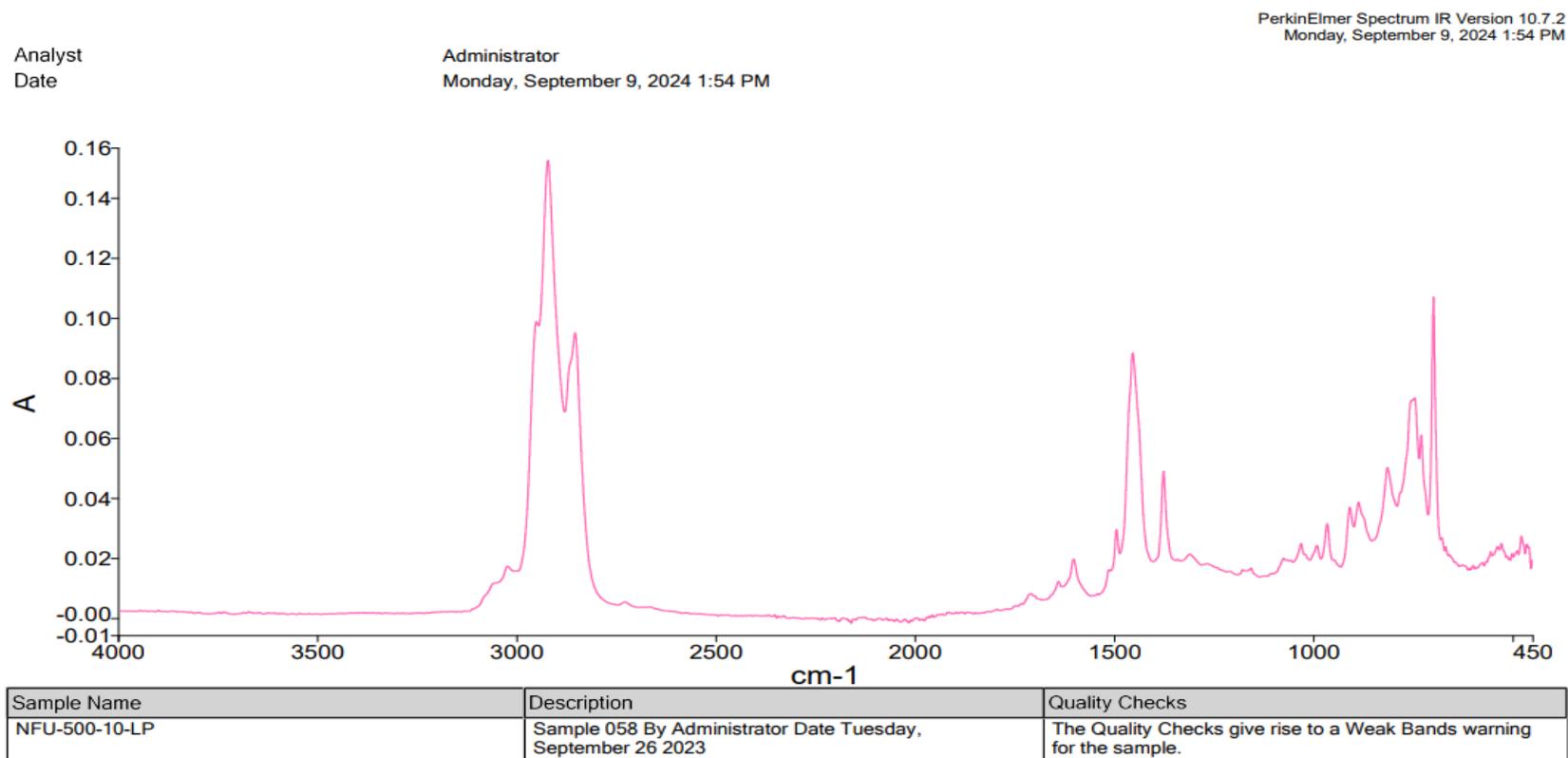
#### Figura 115

Espectrofotometría de la muestra líquida obtenida para 500°C y 0% E-cat



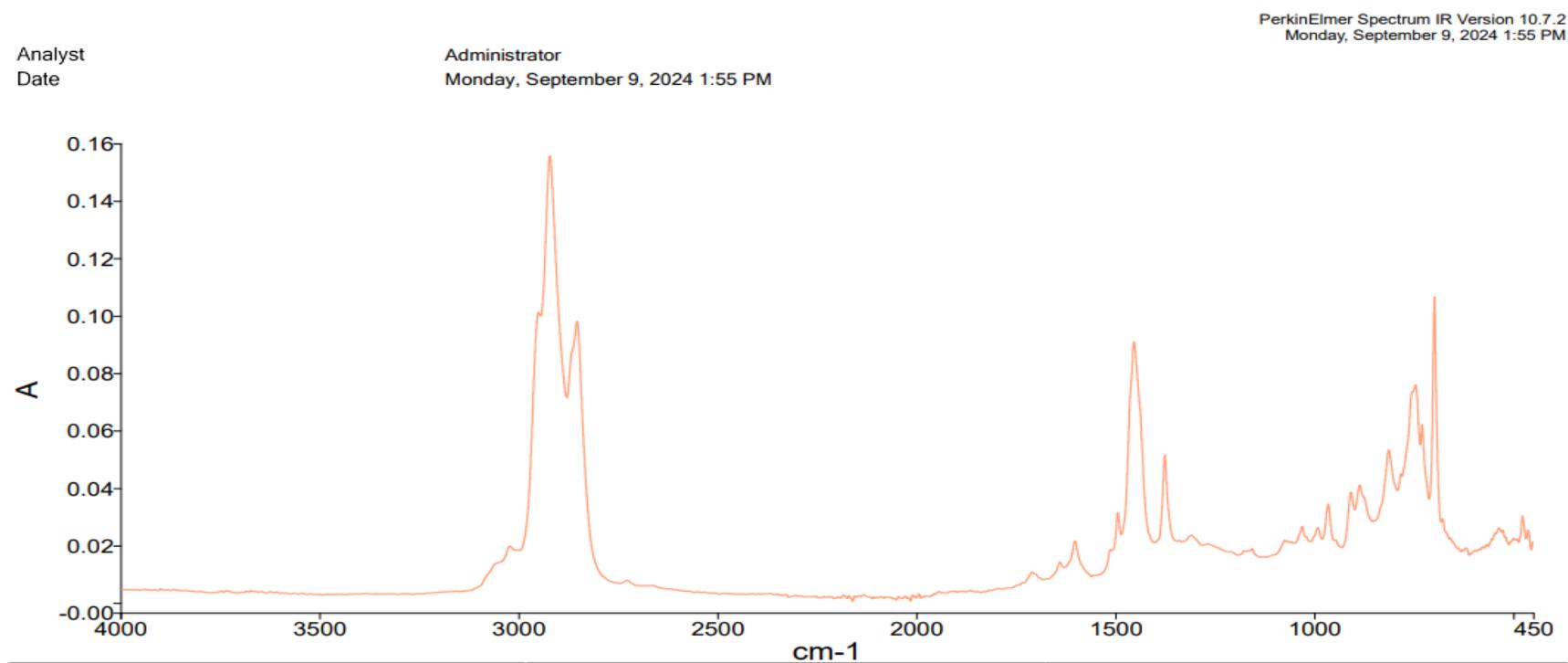
**Figura 116**

Espectrofotometría de la muestra líquida obtenida para 500°C y 10% E-



**Figura 117**

Espectrofotometría de la muestra líquida obtenida para 500°C y 20% E-cat

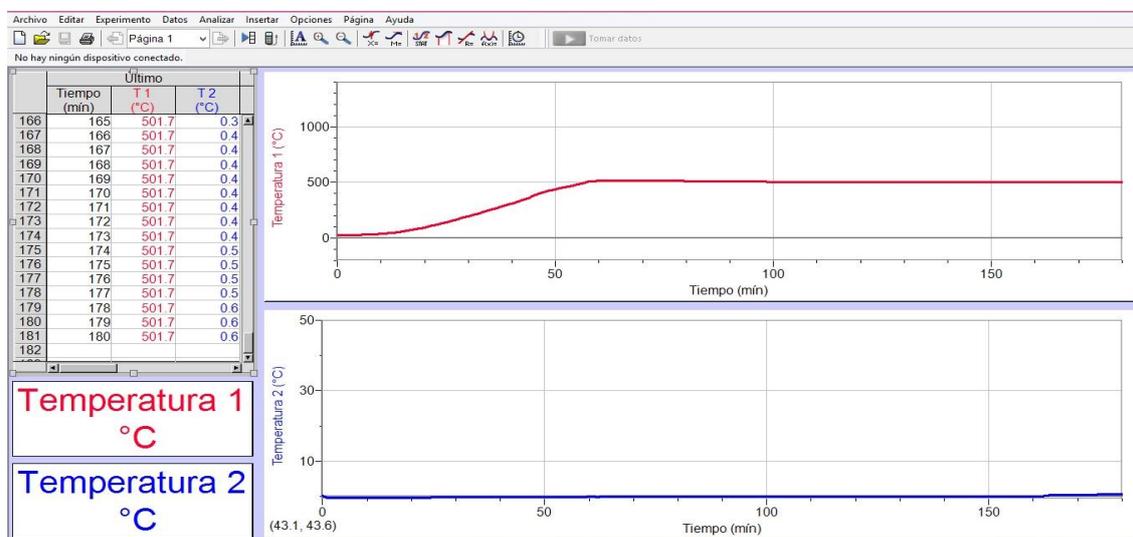


Sample Name	Description	Quality Checks
NFU-500-20-LP	Sample 060 By Administrator Date Tuesday, September 26 2023	The Quality Checks give rise to a Weak Bands warning for the sample.

## Apéndice 4. Lectura de los sensores de temperatura del reactor y del baño de enfriamiento

**Figura 118**

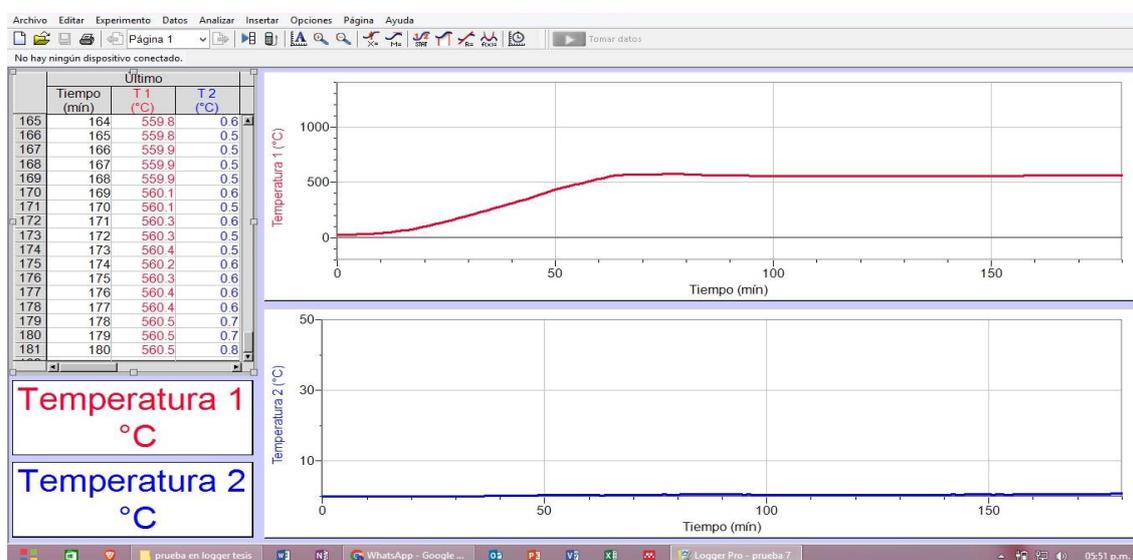
*Experimento a 500 °C – 0% E-cat.*



*Nota. Lectura de los sensores de temperatura del reactor y del baño de enfriamiento a condiciones de temperatura 500 °C y 0% de E-cat- Software “Logger pro”*

**Figura 119**

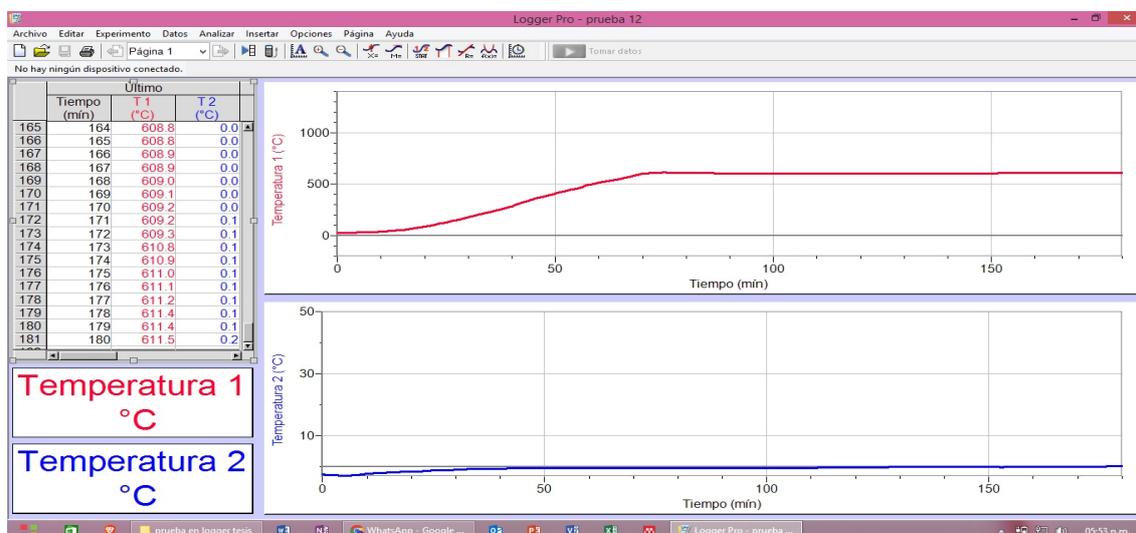
*Experimento a 550 °C – 0% E-cat*



*Nota. Lectura de los sensores de temperatura del reactor y del baño de enfriamiento a condiciones de temperatura 550 °C y 0% de E-cat - Software “Logger pro”*

Figura 120

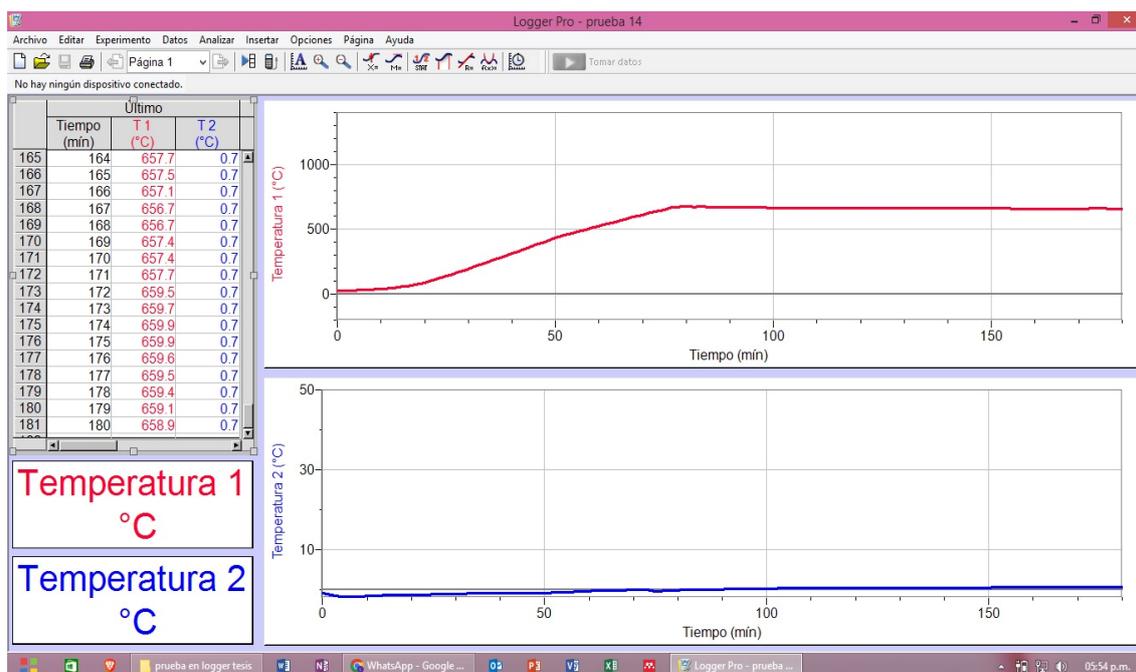
Experimento a 600 °C – 0% E-cat



Nota. Lectura de los sensores de temperatura del reactor y del baño de enfriamiento a condiciones de temperatura 600 °C y 0% de E-cat –Software “Logger pro”

Figura 121

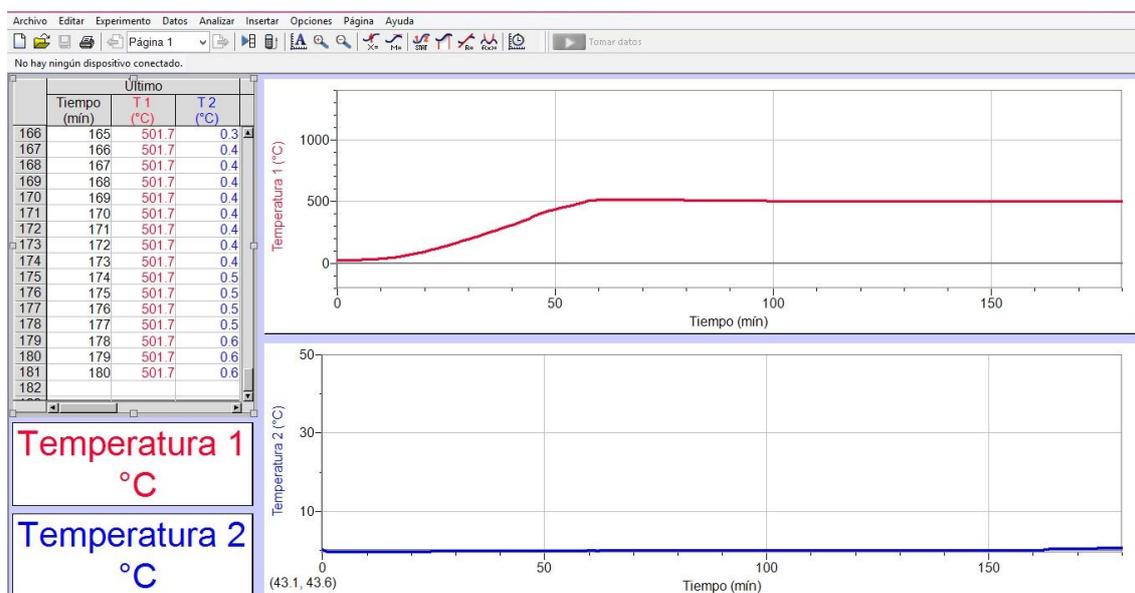
Experimento a 650 °C – 0% E-cat



Nota. Lectura de los sensores de temperatura del reactor y del baño de enfriamiento a condiciones de temperatura 650 °C y 0% de E-cat - Software “Logger pro”

Figura 122

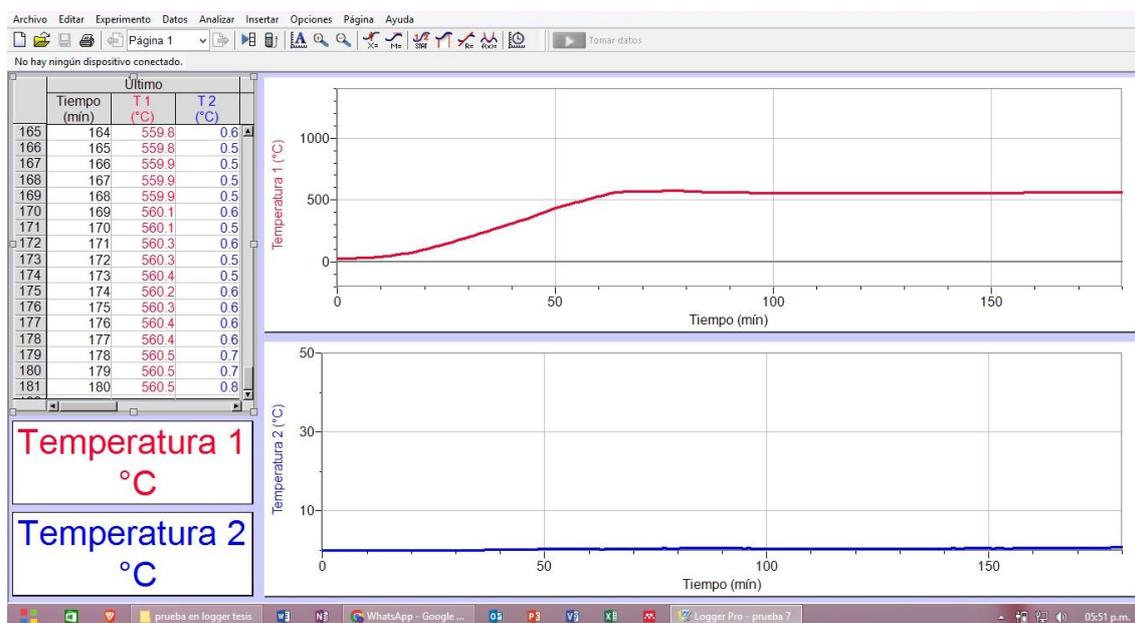
Experimento a 500 °C – 10% E-cat



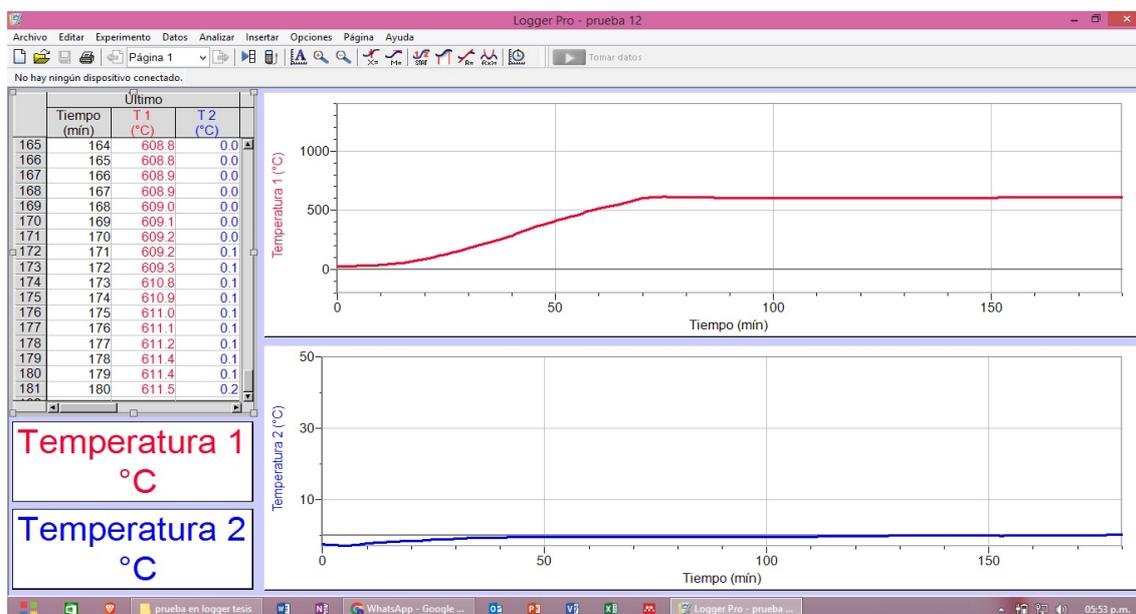
Nota. Lectura de los sensores de temperatura del reactor y del baño de enfriamiento a condiciones de temperatura 500 °C y 10% de E-cat -Software "Logger pro"

Figura 123

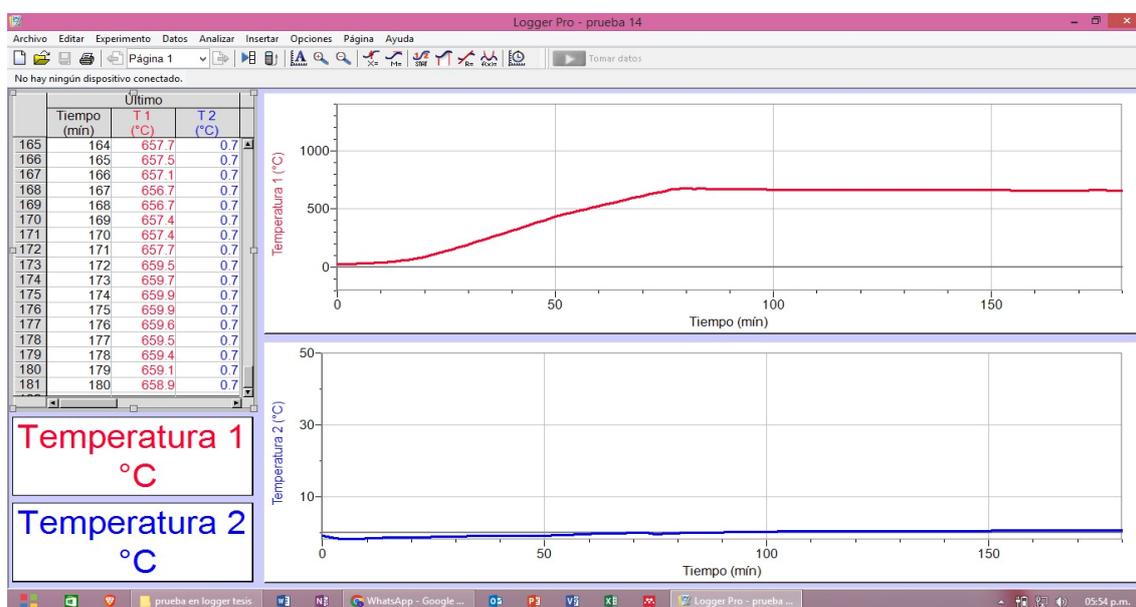
Experimento a 550 °C – 10% E-cat



Nota. Lectura de los sensores de temperatura del reactor y del baño de enfriamiento a condiciones de temperatura 550 °C y 10% de E-cat - Software "Logger pro"

**Figura 124***Experimento a 600 °C – 10% E-cat*

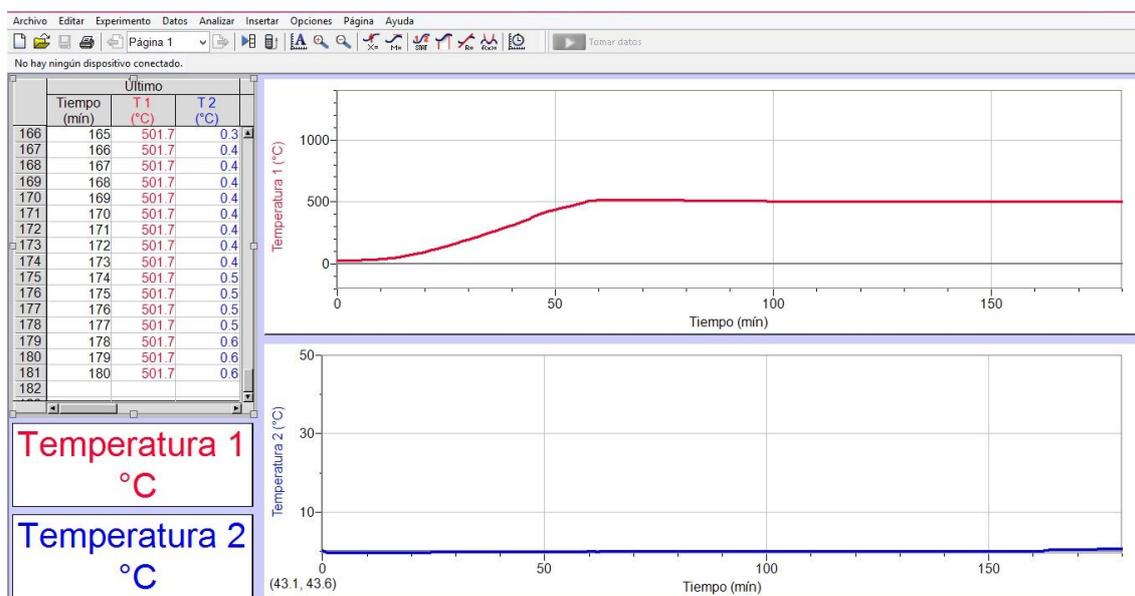
*Nota. Lectura de los sensores de temperatura del reactor y del baño de enfriamiento a condiciones de temperatura 600 °C y 10% de E-cat -Software “Logger pro”*

**Figura 125***Experimento a 650 °C – 10% E-cat*

*Nota. Lectura de los sensores de temperatura del reactor y del baño de enfriamiento a condiciones de temperatura 650 °C y 10% de E-cat - Software “Logger pro”*

Figura 126

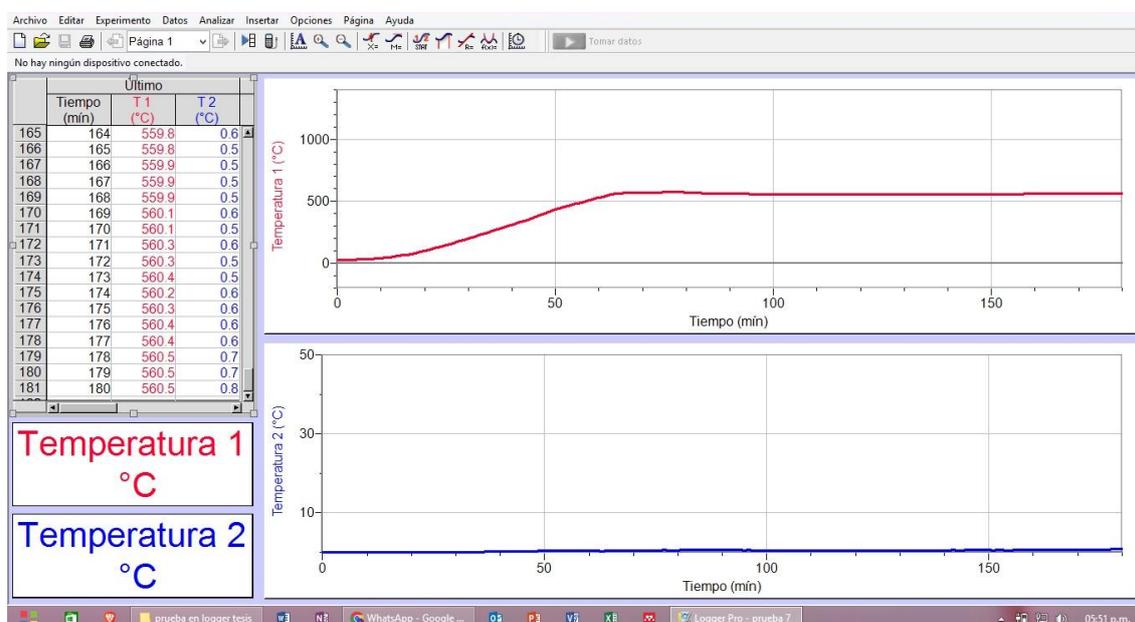
Experimento a 500 °C – 20% E-cat



Nota. Lectura de los sensores de temperatura del reactor y del baño de enfriamiento a condiciones de temperatura 500 °C y 20% de E-cat - Software "Logger pro"

Figura 127

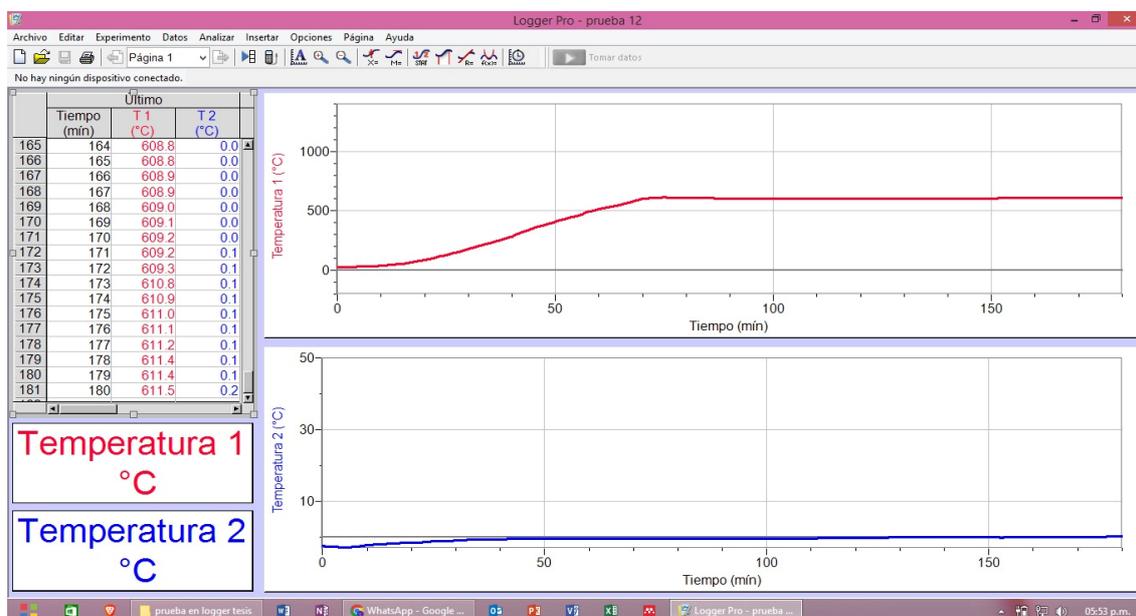
Experimento a 550 °C – 20% E-cat



Nota. Lectura de los sensores de temperatura del reactor y del baño de enfriamiento a condiciones de temperatura 550 °C y 20% de E-cat - Software "Logger pro"

**Figura 128**

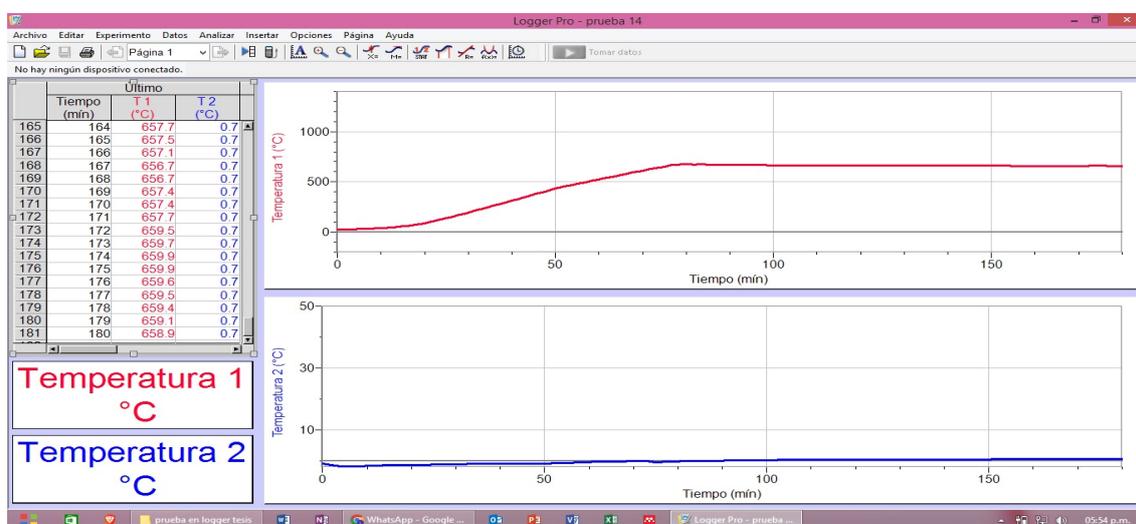
Experimento a 600 °C – 20% E-cat



Nota. Lectura de los sensores de temperatura del reactor y del baño de enfriamiento a condiciones de temperatura 600 °C y 20% de E-cat - Software “Logger pro”.

**Figura 129**

Experimento a 650 °C – 20% E-cat



Nota. Lectura de los sensores de temperatura del reactor y del baño de enfriamiento a condiciones de temperatura 650 °C y 20% de E-cat - Software “Logger pro”

**Apéndice 5. Resultados experimentales obtenidos en laboratorio de las corridas de pirolisis de NFU**

Tabla 55

Resultados experimentales obtenidos al trabajar con una relación E-cat/Materia prima de 0%.

Relación E-cat/Materia prima: 0%					
Item	n° de muestra	T ° (C)	(%m/m) L	(%m/m) G	(%m/m) S
1	1	500	46.93	13.54	39.53
2	2	500	46.93	9.27	43.80
3	3	500	47.47	11.73	40.80
4	1	550	46.87	12.06	41.07
5	2	550	47.87	13.33	38.80
6	3	550	50.40	10.73	38.87
7	1	600	46.27	10.66	43.07
8	2	600	50.33	12.27	37.40
9	3	600	50.00	12.20	37.80
10	1	650	48.53	13.27	38.20
11	2	650	52.00	10.33	37.67
12	3	650	50.00	11.80	38.20
<b>P man.(bar) :</b> -0.66					
<b>tiempo (min.):</b> 180					

Tabla 56

Resultados experimentales obtenidos al trabajar con una relación E-cat/Materia prima de 10%.

Relación E-cat/Materia prima: 10%					
Item	n° de muestra	T ° (C)	(%m/m) L	(%m/m) G	(%m/m) S
1	1	500	51.07	8.46	40.47
2	2	500	50.40	8.60	41.00
3	3	500	49.73	10.87	39.40
4	1	550	51.40	9.47	39.13
5	2	550	49.87	11.13	39.00
6	3	550	52.93	8.60	38.47
7	1	600	46.27	10.66	43.07
8	2	600	50.33	12.27	37.40
9	3	600	50.00	12.20	37.80
10	1	650	48.53	13.27	38.20
11	2	650	52.00	10.33	37.67
12	3	650	50.00	11.80	38.20
<b>P man.(bar) :</b> -0.66					
<b>tiempo (min.):</b> 180					

**Tabla 57**

Resultados experimentales obtenidos al trabajar con una relación E-cat/Materia prima de 20%.

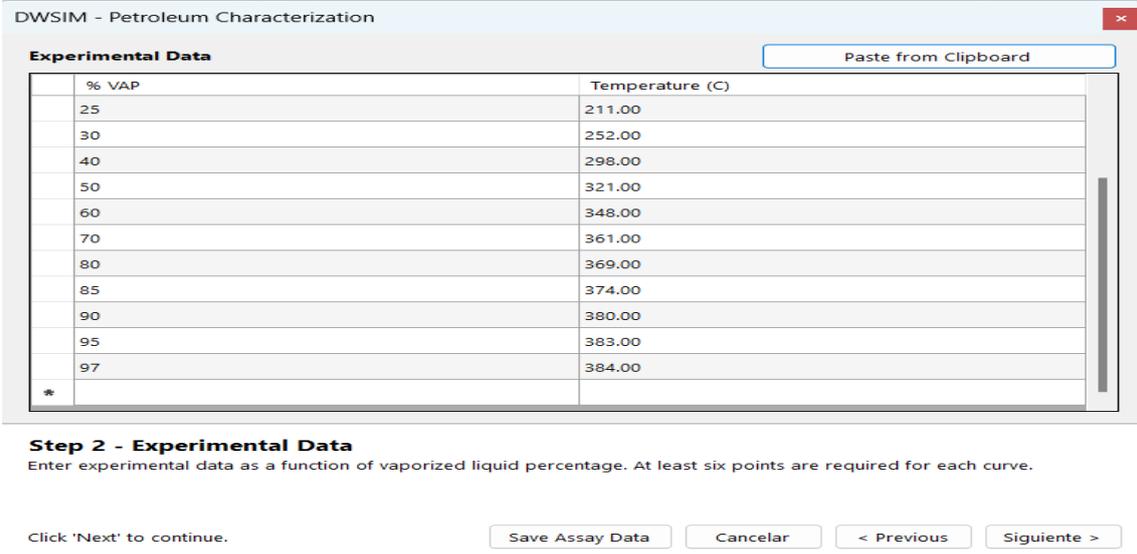
Relación E-cat/Materia prima: 20%					
Item	n° de muestra	T ° (C)	(%m/m) L	(%m/m) G	(%m/m) S
1	1	500	51.13	8.34	40.53
2	2	500	53.67	8.73	37.60
3	3	500	52.13	8.27	39.60
4	1	550	52.40	9.87	37.73
5	2	550	51.47	10.26	38.27
6	3	550	49.47	12.13	38.40
7	1	600	51.80	10.53	37.67
8	2	600	50.53	11.14	38.33
9	3	600	50.53	11.14	38.33
10	1	650	48.80	13.33	37.87
11	2	650	48.80	13.33	37.87
12	3	650	48.80	13.33	37.87
<b>P man.(bar) :</b>		-0.66			
<b>tiempo (min.):</b>		180			

### Apéndice 6. Resultados de las corridas de DWSIM

- CORRIDA SOFTWARE DWSIM: 500 °C – 0% de Relación E-cat/MP

**Figura 130**

Caracterización de líquido pirolítico con curva ASTM D86 Software “DWSIM



DWSIM - Petroleum Characterization

Experimental Data

% VAP	Temperature (C)
25	211.00
30	252.00
40	298.00
50	321.00
60	348.00
70	361.00
80	369.00
85	374.00
90	380.00
95	383.00
97	384.00
*	

Paste from Clipboard

**Step 2 - Experimental Data**  
Enter experimental data as a function of vaporized liquid percentage. At least six points are required for each curve.

Click 'Next' to continue.

Save Assay Data    Cancelar    < Previous    Siguiente >

Figura 131

*Elección de 30 pseudocomponentes para líquido de pirolisis - Software "DWSIM"*

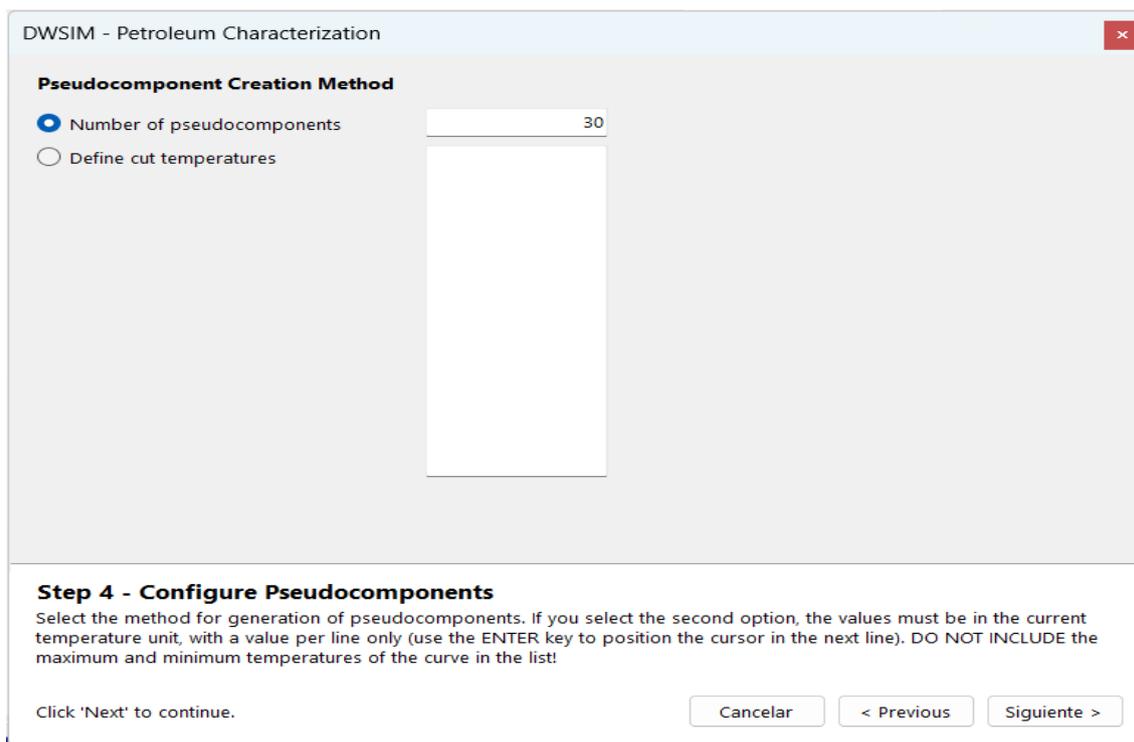
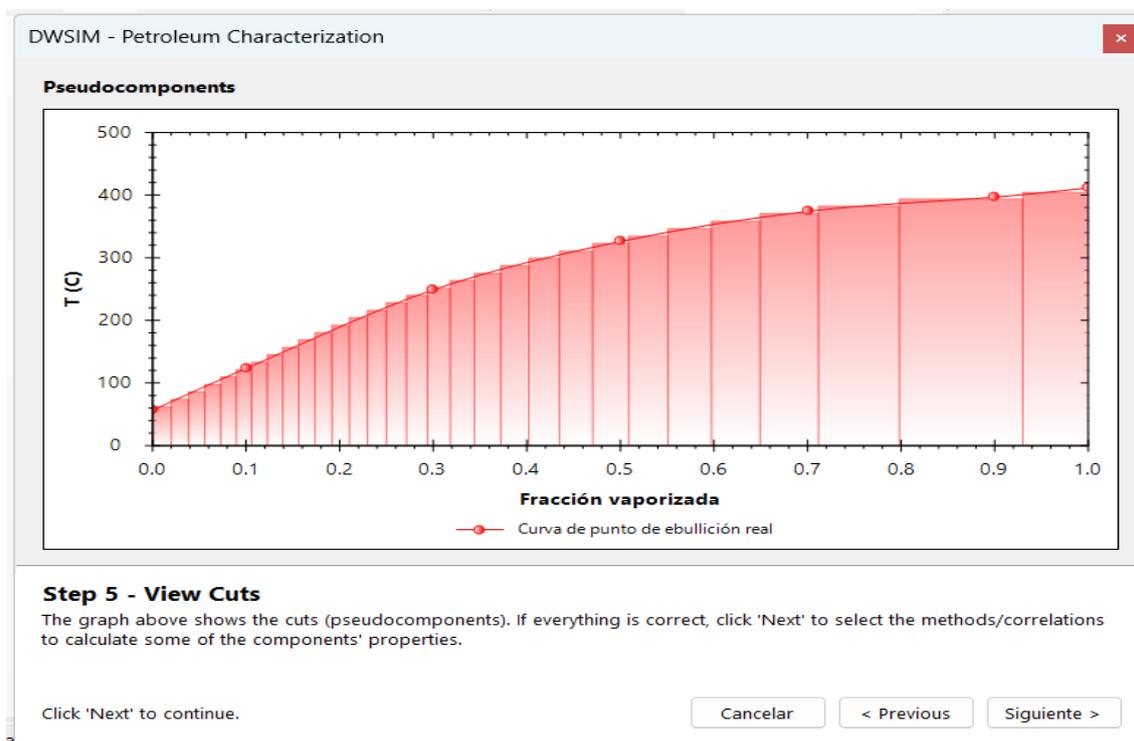


Figura 132

*Pseudocomponentes para el líquido de pirolisis -Software "DWSIM"*



**Figura 133**

Elección de métodos y correlaciones para la caracterización por curva ASTM D86 de líquido de pirólisis -Software “DWSIM”

DWSIM - Petroleum Characterization

**Methods and Correlations**

Temperatura crítica: Riazi-Daubert (1985)

Presión crítica: Riazi-Daubert (1985)

Factor acéntrico: Korsten (2000)

Gravedad específica: Riazi-Al-Sahhaf (1996)

Peso molar: Winn (1956)

Viscosidad cinemática: Abbott (1971)

Adjust Acentric Factors to match NBPs

Adjust Rackett Parameters to match Specific Gravities

**Step 6 - Methods and Correlations**  
Select the methods and correlations to calculate the pseudocomponents' properties.

Click 'Next' to continue.

Cancelar < Previous Siguiente >

**Figura 134**

Resultados de la caracterización con 30 pseudocomponentes para líquido de pirólisis- Software “DWSIM”

DWSIM - Petroleum Characterization

**Resultados**

Nombre	Fración molar	NBP (C)	SG	MW (kg/kmol)	Tc (C)	Pc (bar)	Ac. Factor	Visc (m <sup>2</sup> /s)
C_5818_NBP_62	0.0440564	62.1859	0.701649	81.7683	237.54	34.5494	0.2424	3.124
C_5818_NBP_74	0.0383199	74.0867	0.712348	87.5863	251.676	33.2511	0.258166	3.36C
C_5818_NBP_86	0.0344895	85.9614	0.722513	93.6248	265.564	31.9921	0.274037	3.635
C_5818_NBP_98	0.0317254	97.8241	0.732201	99.8915	279.233	30.7743	0.290032	3.955
C_5818_NBP_110	0.0296413	109.68	0.741452	106.39	292.698	29.599	0.306164	4.32E
C_5818_NBP_122	0.0280314	121.532	0.750304	113.124	305.972	28.467	0.322442	4.754
C_5818_NBP_133	0.0267751	133.382	0.758785	120.096	319.065	27.3786	0.338874	5.24E
C_5818_NBP_145	0.0257972	145.23	0.766924	127.306	331.985	26.3334	0.355471	5.81E
C_5818_NBP_157	0.0250491	157.078	0.774745	134.757	344.74	25.3309	0.37224	6.48C
C_5818_NBP_169	0.0244988	168.924	0.78227	142.452	357.336	24.3699	0.389193	7.24E

You can edit/update the values on the above table before creating the oil stream.

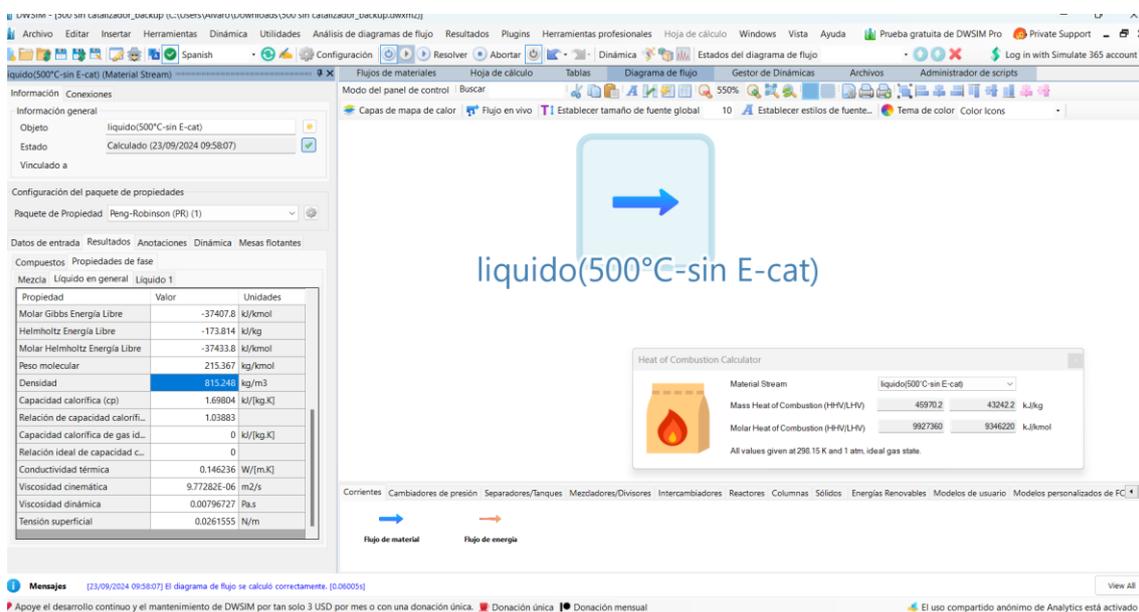
**Step 7 - Results**  
The table above shows the characterization results. Click 'Finalize' to exit and add a Material Stream to the simulation with the created pseudocomponents.

Stream name: OIL\_5818

Cancelar < Previous Finalize

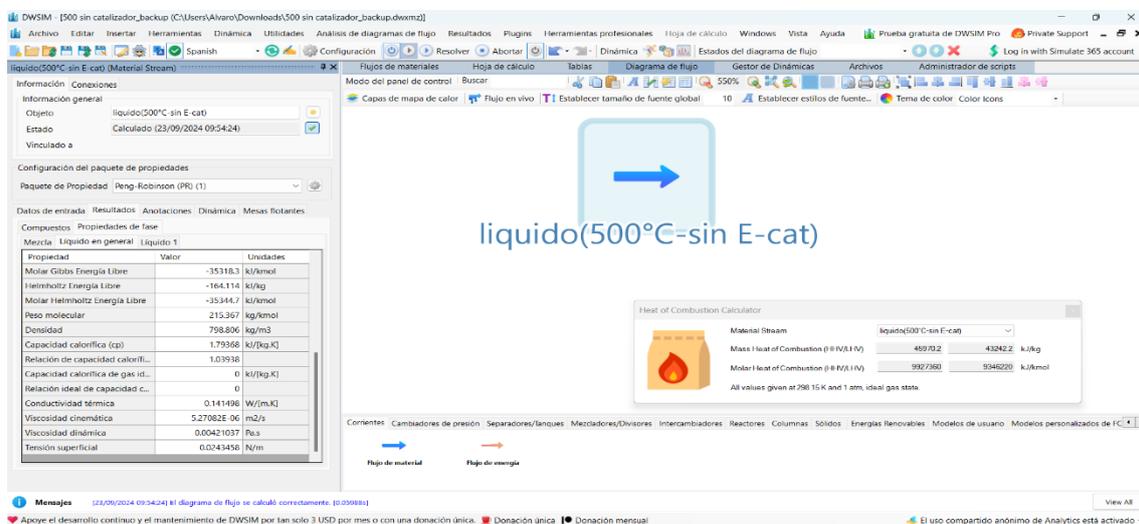
**Figura 135**

Resultados de los valores estimados por el software a 15.566 °C o 60°F de poder calorífico bruto, densidad y viscosidad cinemática para comparación con reales de laboratorio- Software “DWSIM”



**Figura 136**

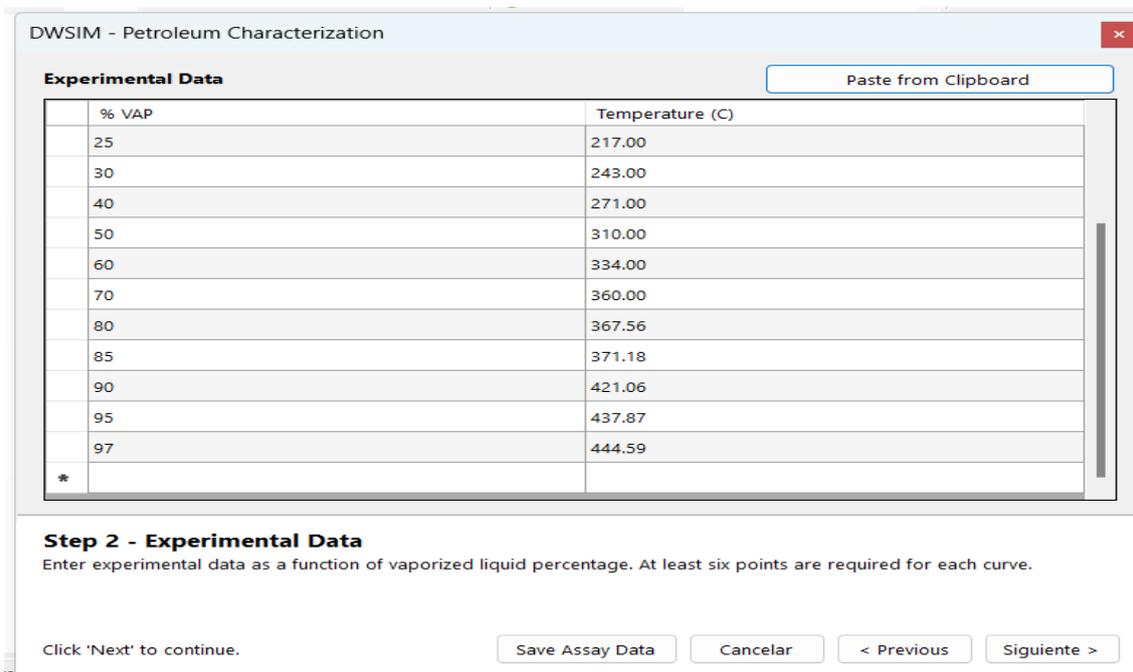
Resultados de los valores estimados por el software a 37.8 °C de la viscosidad cinemática para comparación con reales de laboratorio- Software “DWSIM”



- CORRIDA SOFTWARE DWSIM: 500 °C – 17.7696% de Relación E-cat/MP

**Figura 137**

Caracterización de líquido pirolítico con curva ASTM D86 para rendimiento más representativo - Software “DWSIM”



DWSIM - Petroleum Characterization

**Experimental Data** Paste from Clipboard

% VAP	Temperature (C)
25	217.00
30	243.00
40	271.00
50	310.00
60	334.00
70	360.00
80	367.56
85	371.18
90	421.06
95	437.87
97	444.59
*	

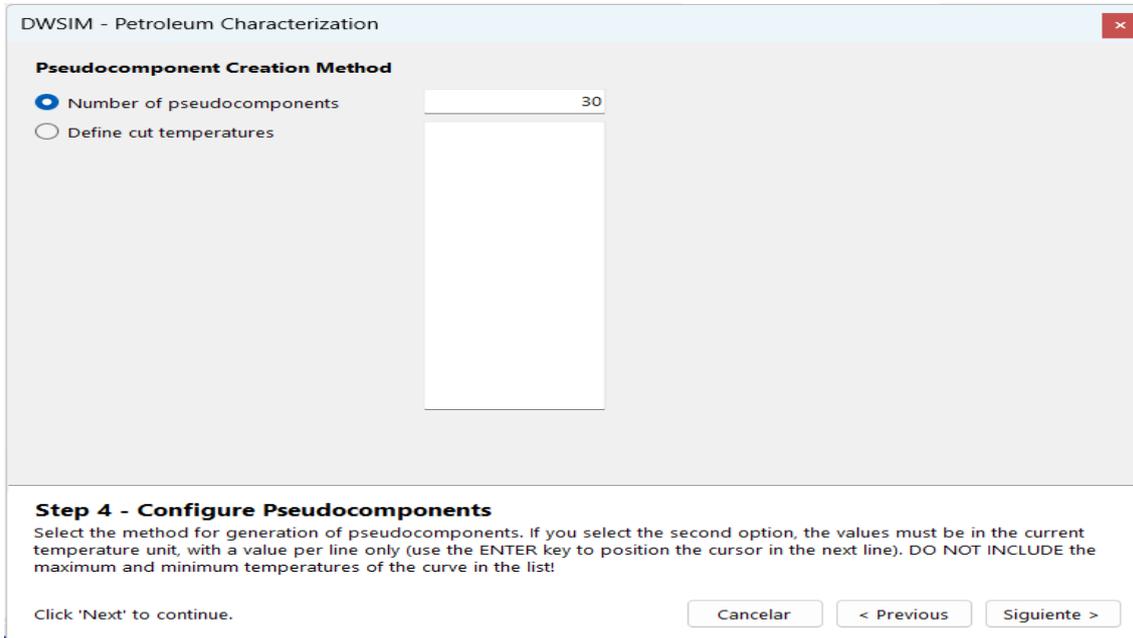
**Step 2 - Experimental Data**  
Enter experimental data as a function of vaporized liquid percentage. At least six points are required for each curve.

Click 'Next' to continue.

Save Assay Data Cancelar < Previous Siguiente >

**Figura 138**

Elección de 30 pseudocomponentes para líquido de pirolisis -Software “DWSIM”



DWSIM - Petroleum Characterization

**Pseudocomponent Creation Method**

Number of pseudocomponents

Define cut temperatures

**Step 4 - Configure Pseudocomponents**  
Select the method for generation of pseudocomponents. If you select the second option, the values must be in the current temperature unit, with a value per line only (use the ENTER key to position the cursor in the next line). DO NOT INCLUDE the maximum and minimum temperatures of the curve in the list!

Click 'Next' to continue.

Cancelar < Previous Siguiente >

Figura 139

Pseudocomponentes para el líquido de pirólisis- Software “DWSIM”

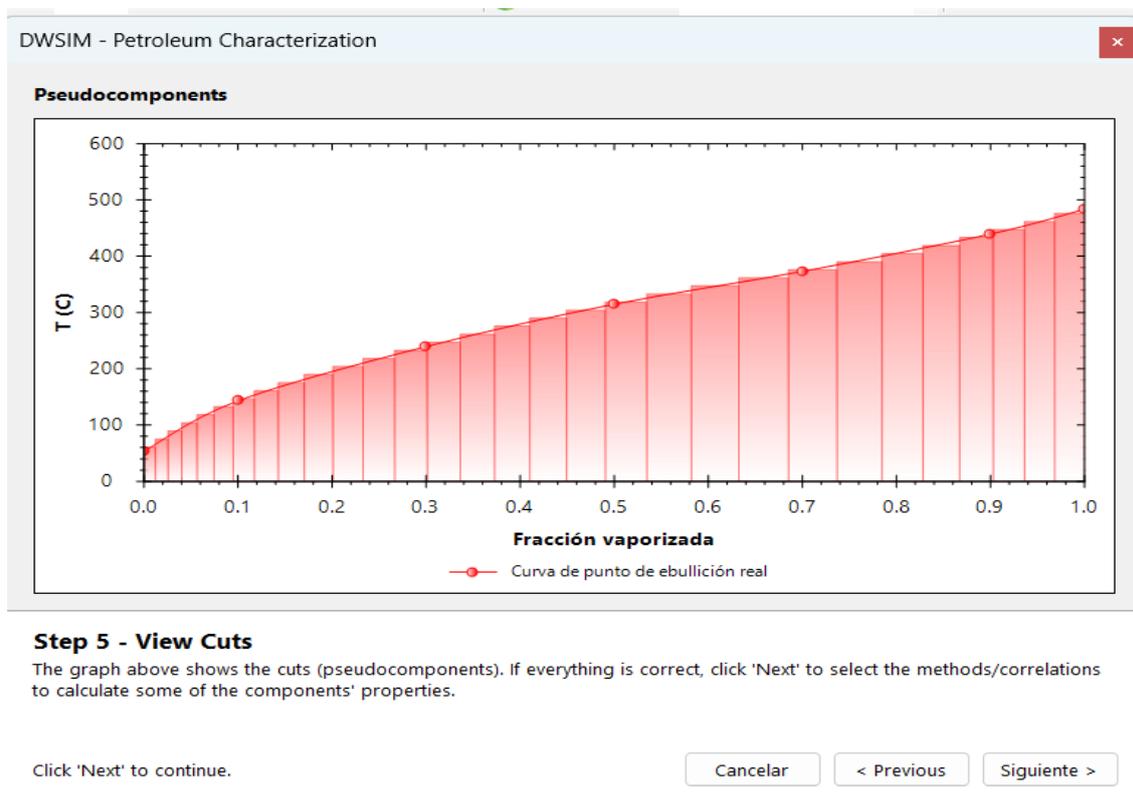
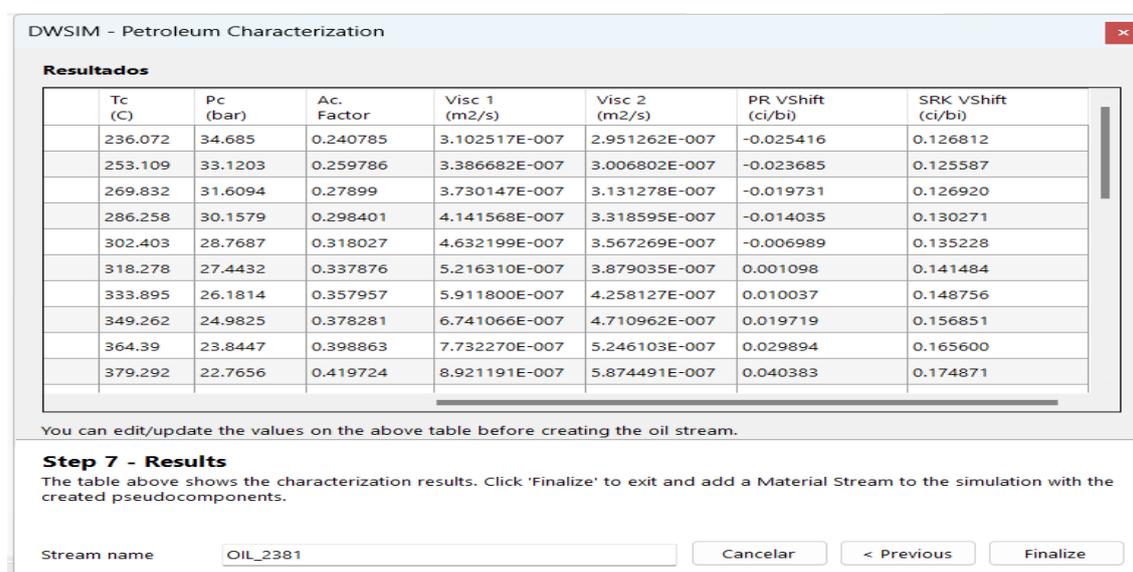


Figura 140

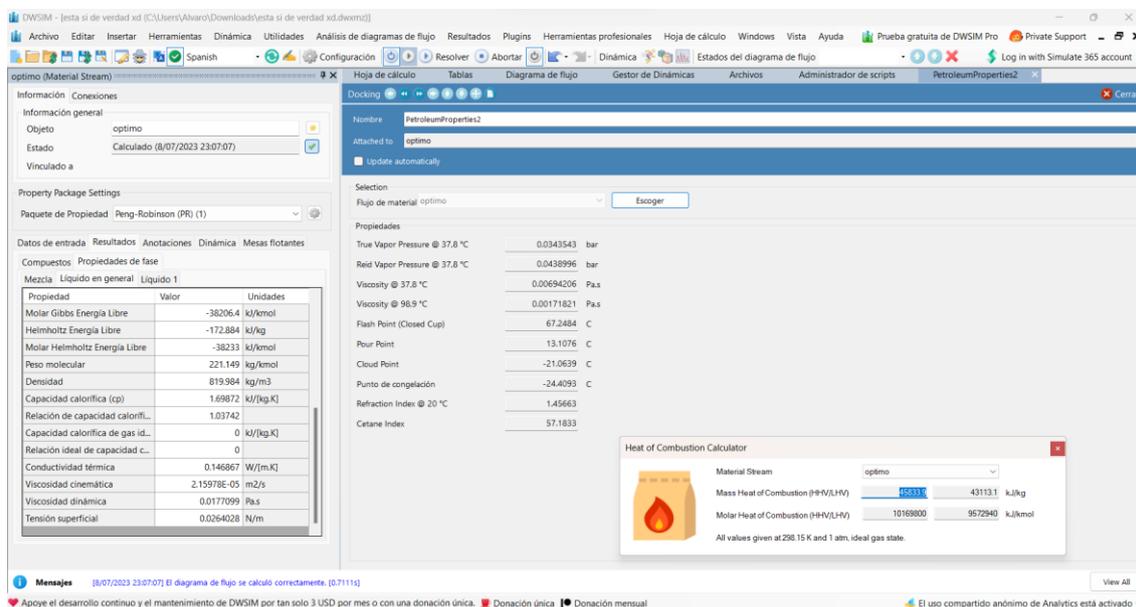
Resultados de la caracterización con 30 pseudocomponentes para líquido de pirólisis-

Software “DWSIM”



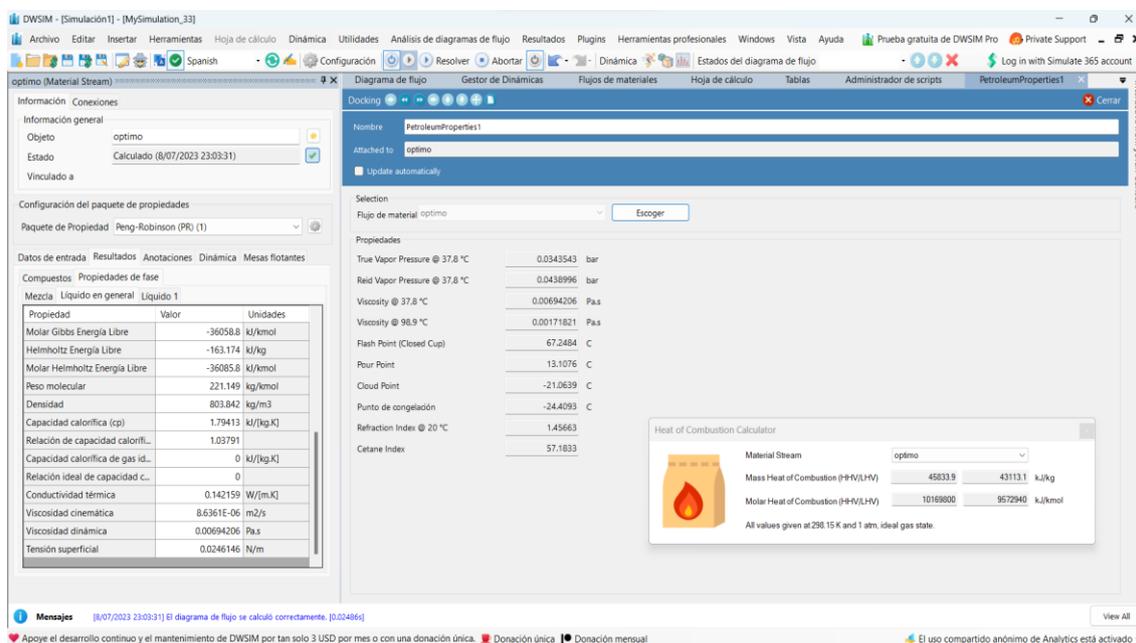
**Figura 141**

Resultados de los valores estimados por el software a 15.566 °C o 60°F de poder calorífico bruto, densidad y viscosidad cinemática para comparación con reales de laboratorio - Software “DWSIM”



**Figura 142**

Resultados de los valores estimados por el software a 37.8 °C de la viscosidad cinemática para comparación con reales de laboratorio-Software “DWSIM”



## ANEXOS

### Anexo 1. Constancia de realización de experimentos de pirolisis catalítica de NFU en el laboratorio del grupo de investigación procesos termoquímicos y energéticos.



**UNIVERSIDAD NACIONAL DE INGENIERÍA**

**Facultad de Ingeniería de Petróleo, Gas Natural y Petroquímica**

### CONSTANCIA

El Jefe (e) del Laboratorio de Normalización de Petróleo y Derivados de la Facultad de Ingeniería de Petróleo, Gas Natural y Petroquímica de la Universidad Nacional de Ingeniería, deja constancia que:

Los bachilleres en Ingeniería Petroquímica, Luis Carlos Chávez Pacheco, con código UNSAAC 141063 y código UNI I12021107, y Álvaro Gonzales Trujillano, con código UNSAAC 161423 y código UNI I12021206, llevaron a cabo en el Laboratorio del Grupo de Investigación Procesos Termoquímicos y Energéticos las pruebas experimentales bajo la estricta supervisión del responsable de dicho área, correspondientes a la tesis de investigación titulada: **“Evaluación del rendimiento de combustibles líquidos obtenidos por pirólisis catalítica al vacío de neumáticos fuera de uso”**. Lo hicieron de acuerdo al cronograma de laboratorio presentado, utilizando los equipos de laboratorio de manera adecuada según las normas establecidas. Durante su estancia en este lugar, demostraron responsabilidad y puntualidad en todas las actividades realizadas.

Este documento se expide a solicitud de los interesados para los fines que consideren pertinentes.

Lima, 08 de mayo del 2024



Firmado digitalmente por:  
RAMOS VASQUEZ WILLIAMS  
JAVIER FIR 40409777 hard  
Motivo: Soy el autor del  
documento  
Fecha: 08/05/2024 14:52:27-0500

**MSc. Williams Javier Ramos Vasquez**

Jefe (e) del Laboratorio de Normalización de Petróleo y Derivados

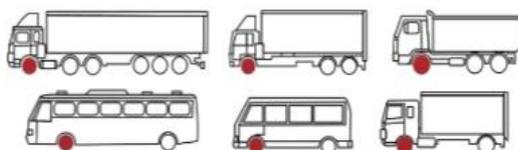
Av. Túpac Amaru 210, Rimac - Lima 25, Apartado Postal 1301- Perú  
Escuelas Profesionales Telf.: 381-3831 / 481-1070 Anexo: 6005  
Administración Interna / Of. Abastecimiento: Telf.: 481-0576 / 481-1070 Anexo: 6003  
Secretaría FIP Telf.: 481-1070 Anexo 6001  
Oficina Estadística Telf.: 483-2424 / 481-1070 Anexo: 6012  
Pos grado Telf.: 381-8208 / 481-1070 Anexo: 6008

## Anexo 2. Neumático usado para pirolisis – ficha técnica 1


**TB 906**

**Características**

- Llanta radial para ser usada en el eje direccional y trailer en una ruta regional 100% pavimentada en tractos, camiones, volquetas, buses, camión ligero y busetas.
- Banda de rodamiento de buena resistencia a la abrasión.
- Cuatro surcos que permiten la evacuación del agua en piso mojado.
- Carcasa reforzada que brinda mayor capacidad de carga.



Medida	LI	Símbolo velocidad (Km/h)	Lonas	Profundidad de grabado mm	Ancho de Rin pulgadas	Diámetro Exterior mm	Capacidad de carga kg S D	Presión de inflado PSI	Ancho de Rin alterno pulgadas
205/75R17.5	124/122	M(130)	14	12.5	6.00	753	1600/1500	110	5.25
215/75R17.5	135/133	J(100)	16	12.5	6.00	767	2180/2060	125	6.75
245/70R19.5	143/141	J(100)	18	12.5	7.50	839	2725/2575	127	6.75
12R22.5	152/149	M(130)	18	16.5	9.00	1084	3550/3250	135	8.25
295/80R22.5	154/151	M(130)	18	16.5	9.00	1044	3750/3450	130	8.25



## Anexo 3. Neumático usado para pirolisis – ficha técnica 2

### **MICHELIN 295/80 R22.5 X<sup>o</sup> MULTI™ Z+**

#### INFORMACIONES TÉCNICAS

DIMENSION	295/80 R 22.5
ANCHO (mm)	295
SERIE	80
ÍNDICE DE CARGA/ VELOCIDAD	152/148 L
CARGA POR EJE - SIMPLE (Kg)	7.100
CARGA POR EJE - GEMELADO (Kg)	12.600
RIN INDICADA (POL.)	8.25 x 22.5
PESO (Kg) - Aproximado	63,32
DIAMETRO LIBRE (mm)	1.054
PROFUNDIDAD DE ESCULTURA (mm)	15,5
PROFUNDIDAD DE REESCULTURADO (mm)	3,0



#### OFERTA DE REENCAUCHE

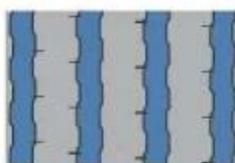
Los rodajes carcasa MICHELIN poseen una excelente reencauchabilidad, MICHELIN dispone de una amplia oferta de bandas de rodaje MICHELIN y Recamic en las esculturas toda posición (Z), tractiva (D) y para portador (T) desarrollados especialmente para el transporte de carga y pasajeros, de acuerdo con la tabla:

DIMENSION	OFERTA MICHELIN			OFERTA RECAMIC			
	Banda de Rodaje			Banda de Rodaje			
	X Multiway XZE	X Multi D	XTE2 B	XZE2	XDE2	XTE B	XTE 250 B LIGHT
295/80 R22.5 X <sup>o</sup> MULTI™ Z+	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓

✓ Oferta já disponible

#### REESCULTURADO

El reesculturado debe ser realizado de acuerdo con el manual de orientaciones técnicas MICHELIN:



Dimensión	295/80 R22.5 X <sup>o</sup> MULTI™ Z+
Profundidad de reesculturado	3 mm
Ancho	4 a 6 mm
Lamina	R3

Nota: Al realizar el reesculturado, nunca olvide de mantener los indicadores de desgaste (TWI), evitando pasar la lamina en los indicadores originales. Después del reesculturado del neumático, reducir la altura de los indicadores originales dejándolos con 1.6 mm en relación al fondo de la escultura. Esto evitará problemas con la fiscalización, ya que los indicadores de desgaste son obligatorios por ley, para cualquier neumático.

## Anexo 4. Informe de ensayo de Marconsult del % de azufre en combustible líquido obtenido.



### INFORME DE ENSAYO N° 0179 - 2023

Cliente:	Universidad Nacional de Ingeniería		
Contacto:	Carlin Mendoza Asencios		
Información del contacto:	<a href="mailto:certipetro@fip.uni.edu.pe">certipetro@fip.uni.edu.pe</a>		
Dirección:	Av. Tupac Amaru 210 - Rimac		
Fecha de recepción de la muestra:	2023-04-10	Estado y Condición de la muestra:	Líquido a temperatura ambiente
Fecha de ingreso de la muestra:	2023-04-10	Plan de muestreo:	No específica
Fecha de ejecución del ensayo:	2023-04-11	Tipo de muestra:	No específica
Lugar de ejecución del ensayo:	Av. Santa Rosa N° 797 La Perla - Callao	Fecha de muestreo:	No específica
Solicitud N°:	0047 - 2023	Precinto(s):	No específica
Nombre comercial (ID del cliente):	<b>COMBUSTIBLE ALTERNATIVO</b>	Identificación de la muestra: (1)	NFU-500-C-0%
Producto (Nombre genérico):	<b>COMBUSTIBLE ALTERNATIVO</b>	Observaciones referentes a la muestra:	-
Procedencia de la muestra:	Proporcionado por el cliente		
Presentación de la muestra:	Envase de vidrio		
Cantidad:	50 ml. aprox.		
Notas: -			

MÉTODO	ENSAYO	RESULTADO	UNIDAD
ASTM D 4294 - 21	Contenido de Azufre	1,11	% masa
-----Fin de Resultados-----			
<p>(1) Información obtenida de la etiqueta de la muestra.</p> <p>Los resultados del presente documento solo son válidos para la muestra analizada.</p> <p>La adulteración o uso indebido del presente Informe de Ensayo constituye delito contra la fe pública y se regula por las disposiciones penales y civiles en la materia.</p> <p>Los resultados del presente Informe de Ensayo no deben ser utilizados como una Certificación de Conformidad con las normas del producto o como Certificado del Sistema de Calidad de la entidad que lo produce.</p> <p>Prohibida la reproducción parcial o total de este Informe de Ensayo, sin la aprobación de MARINE CONSULTANTS S.A.C. - División Laboratorio.</p> <p>El cliente o ente certificador podrá evaluar los resultados respecto a las especificaciones para este producto.</p>			

Callao, 11 de abril de 2023

Autorizado por:



Original: Cliente  
Copia 1: Laboratorio

Página 1 de 1

-----Fin del Informe de Ensayo-----

## Anexo 5. Informe de ensayo de Marconsult del % de azufre en combustible líquido optimo obtenido.



### INFORME DE ENSAYO N° 0178 - 2023

Cliente:	Universidad Nacional de Ingeniería		
Contacto:	Carlin Mendoza Asencios		
Información del contacto:	<a href="mailto:certipetro@fip.uni.edu.pe">certipetro@fip.uni.edu.pe</a>		
Dirección:	Av. Tupac Amaru 210 - Rimac		
Fecha de recepción de la muestra:	2023-04-10	Estado y Condición de la muestra:	Líquido a temperatura ambiente
Fecha de ingreso de la muestra:	2023-04-10	Plan de muestreo:	No especifica
Fecha de ejecución del ensayo:	2023-04-11	Tipo de muestra:	No especifica
Lugar de ejecución del ensayo:	Av. Santa Rosa N° 797 La Perla - Callao	Fecha de muestreo:	No especifica
Solicitud N°:	0047 - 2023	Precinto(s):	No especifica
Nombre comercial (ID del cliente):	COMBUSTIBLE ALTERNATIVO	Identificación de la muestra: (1)	NFU-T=500-17.69%
Producto (Nombre genérico):	COMBUSTIBLE ALTERNATIVO	Observaciones referentes a la muestra:	-
Procedencia de la muestra:	Proporcionado por el cliente		
Presentación de la muestra:	Envase de vidrio		
Cantidad:	50 ml. aprox.		

Notas: -

MÉTODO	ENSAYO	RESULTADO	UNIDAD
ASTM D 4294 - 21	Contenido de Azufre	1,11	% masa
-----Fin de Resultados-----			

(1) Información obtenida de la etiqueta de la muestra.

Los resultados del presente documento solo son válidos para la muestra analizada.

La adulteración o uso indebido del presente Informe de Ensayo constituye delito contra la fe pública y se regula por las disposiciones penales y civiles en la materia.

Los resultados del presente Informe de Ensayo no deben ser utilizados como una Certificación de Conformidad con las normas del producto o como Certificado del Sistema de Calidad de la entidad que lo produce.

Prohibida la reproducción parcial o total de este Informe de Ensayo, sin la aprobación de MARINE CONSULTANTS S.A.C.- División Laboratorio.

El cliente o ente certificador podrá evaluar los resultados respecto a las especificaciones para este producto.

Callao, 11 de abril de 2023

Autorizado por:

  
Ing. Elizabeth Pérez  
Gerente de Laboratorio  
C.I.P. 92746



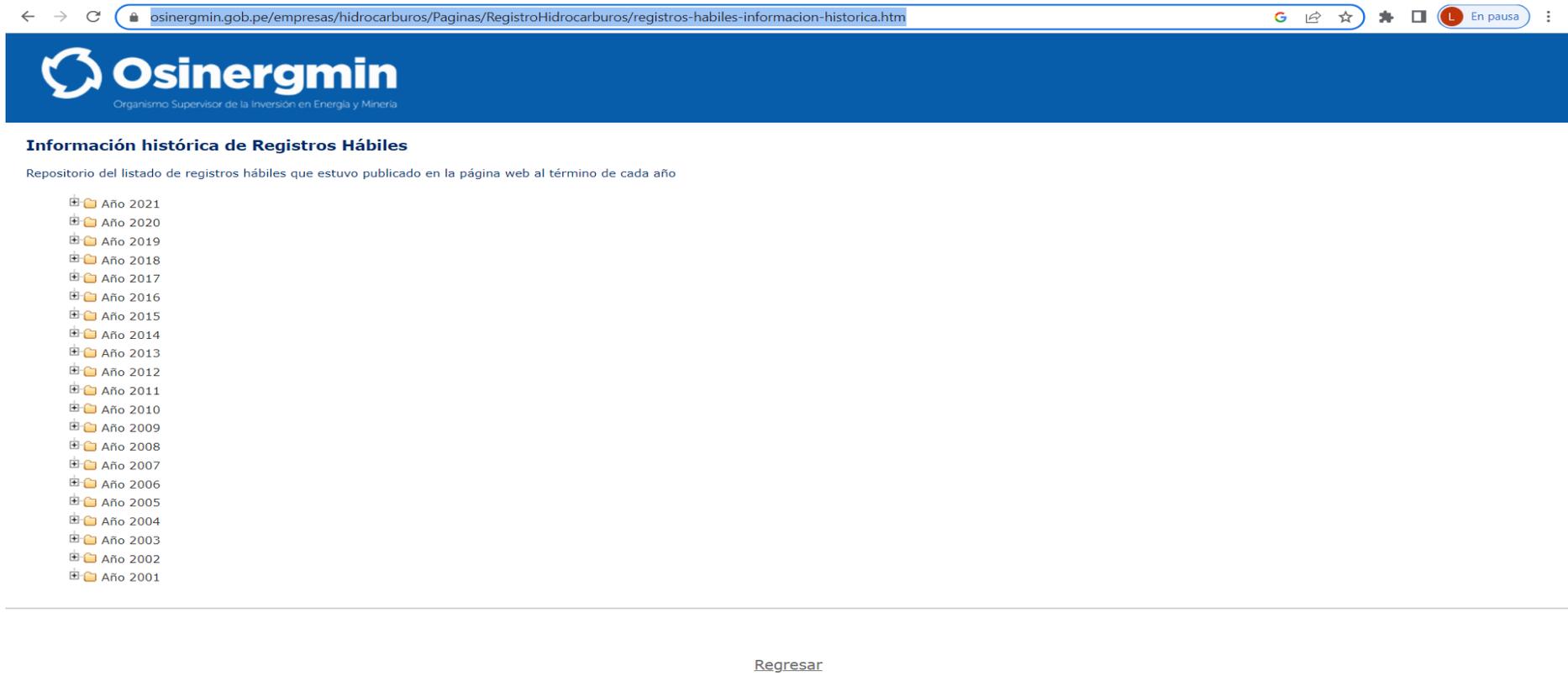
Original: Cliente  
Copia 1: Laboratorio

Página 1 de 1

-----Fin del Informe de Ensayo-----

## Anexo 6. Data de Osirnerming Registros hábiles de cisternas en el Perú.

- Se utiliza para la estimación del numero unidades de neumáticos de camiones cisternas que llevan combustibles habilitados en Cusco.



The screenshot shows a web browser displaying the Osinergmin website. The address bar shows the URL: [osinergmin.gob.pe/empresas/hidrocarburos/Paginas/RegistroHidrocarburos/registros-habiles-informacion-historica.htm](https://osinergmin.gob.pe/empresas/hidrocarburos/Paginas/RegistroHidrocarburos/registros-habiles-informacion-historica.htm). The page header features the Osinergmin logo and the text "Organismo Supervisor de la Inversión en Energía y Minería". Below the header, the section is titled "Información histórica de Registros Hábiles". A sub-header reads: "Repositorio del listado de registros hábiles que estuvo publicado en la página web al término de cada año". A list of years from 2001 to 2021 is displayed, each preceded by a folder icon and a small grid icon. At the bottom of the page, there is a "Regresar" button.

**Osinergmin**  
Organismo Supervisor de la Inversión en Energía y Minería

### Información histórica de Registros Hábiles

Repositorio del listado de registros hábiles que estuvo publicado en la página web al término de cada año

- Año 2021
- Año 2020
- Año 2019
- Año 2018
- Año 2017
- Año 2016
- Año 2015
- Año 2014
- Año 2013
- Año 2012
- Año 2011
- Año 2010
- Año 2009
- Año 2008
- Año 2007
- Año 2006
- Año 2005
- Año 2004
- Año 2003
- Año 2002
- Año 2001

[Regresar](#)

## Anexo 7. Especificaciones del Diesel -Petroperú

Petróleos del Perú - PETROPERÚ S.A.



## ESPECIFICACIONES TÉCNICAS PETROPERÚ

CLASE DE PRODUCTO		COMBUSTIBLE		Fecha efectiva: Enero 2019	
TIPO DE PRODUCTO		DESTILADO MEDIO ULTRA BAJO AZUFRE + 5% BIODIESEL B100		Reemplaza edición de: Enero 2014	
NOMBRE DE PRODUCTO		DIESEL B5 S-50			
ENSAYOS	ESPECIFICACIONES (a)		MÉTODO		
	MÍN.	MÁX.	ASTM	OTROS	
<b>APARIENCIA</b>	Clara y brillante, libre de agua y partículas en suspensión				Visual
Color ASTM (b)		3.0	D1500, D6045		Visual
<b>VOLATILIDAD</b>					
Gravedad API a 60 °F		Reportar	D1298, D4052		
Destilación, °C (a 760 mmHg)			D86, D2887, D7344, D7345		ISO 3405
Punto inicial de ebullición		Reportar			
5 %V recuperado		Reportar			
10 %V recuperado		Reportar			
20 %V recuperado		Reportar			
50 %V recuperado		Reportar			
90 %V recuperado	282	360			
95 %V recuperado		Reportar			
Punto final de ebullición		Reportar			
Punto de inflamación, °C	52		D93, D3828, D7094		ISO 2719
<b>FLUIDEZ</b>					
Viscosidad cinemática a 40°C, cSt (c)	1.9	4.1	D-445		ISO 3104
Punto de escurrimiento, °C (d)		+4	D97, D5949, D5950		ISO 3016
<b>COMBUSTIÓN</b>					
Número de cetano (e)	45		D613		ISO 5165
Índice de cetano (f)	40		D4737, D976		ISO 4264
<b>COMPOSICIÓN</b>					
Cenizas, % masa		0.01	D482		ISO 6245
Residuo de carbón, 10% residuo destilación, % masa		0.35	D4530, D189, D524		ISO 6615
Azufre total, mg/Kg		50	D5453, D2622, D7039, D7220		ISO 20846, ISO 14596
<b>CORROSIVIDAD</b>					
Corrosión lámina de cobre, 3h, 50°C, N°		3	D130		ISO 2160
<b>CONTAMINANTES</b>					
Agua y Sedimentos, %V		0.05	D2709		
<b>ESTABILIDAD A LA OXIDACIÓN</b>					
Estabilidad a la oxidación, mg/100mL		Reportar	D2274, D7545		
<b>LUBRICIDAD</b>					
Lubricidad, diámetro rasgado de uso corregido, HFRR a 60°C, micras		520	D6079, D7688		ISO 12156-1
<b>REQUERIMIENTOS DE OPERATIVIDAD</b>					
Punto de Obstrucción del Filtro, Flujo en Frío, (CFPP ó POFF), °C		-8	D6371		UNE-EN-116
<b>CONDUCTIVIDAD</b>					
Conductividad, pS/m	25		D2624, D4308		
<b>BIODIESEL 100 (B100)</b>					
Contenido, % Vol.		5	D7371		UNE EN 14078
<b>OBSERVACIONES:</b>					
(a) De conformidad con el D.S. N° 092-2009-EM y su Fe de Erratas.					
(b) Se aplicará colorante verde en las Plantas de Ventas, según decisión de la Gerencia Comercial.					
(c) La viscosidad cinemática a 40°C puede ser 1.7 cSt., si el Punto de Nube especificado es menor a -12°C para los meses fríos.					
(d) Cuando el cliente lo requiera, se determinará el Punto de Nube por el método ASTM D-2500.					
(e) De no contar con el equipo del método ASTM D-613 (Número de Cetano), se calculará el Índice de Cetano con el método ASTM D-4737.					
(f) El método ASTM D-976, se usará únicamente para combustibles Diesel de rango de N° Cetano entre 56.5 a 60.0.					

## Anexo 8. Especificaciones del Diesel N°2-Usos militares-Petroperú

Petróleos del Perú - PETROPERÚ S.A.



### ESPECIFICACIONES TÉCNICAS PETROPERÚ

CLASE DE PRODUCTO		<b>COMBUSTIBLE</b>		Fecha efectiva: Enero 2019	
TIPO DE PRODUCTO		<b>DESTILADO MEDIO</b>		Reemplaza edición de: Enero 2014	
NOMBRE DE PRODUCTO					
<b>DIESEL N°2 - USO MILITAR</b>					
ENSAYOS	ESPECIFICACIONES (a)		MÉTODO		
	MÍN.	MÁX.	ASTM	OTROS	
<b>APARIENCIA</b>	Clara y brillante; libre de partículas en suspensión		D-4176	Visual	
Color ASTM	3		D-1500, D-6045		
<b>VOLATILIDAD</b>					
Destilación, °C (a 760 mm Hg)			D-86, D-2887		
Punto inicial de ebullición					
10%V recuperado	Reportar				
50%V recuperado	Reportar				
90%V recuperado	357				
Punto final de ebullición	385				
Residuo + pérdida, %V	3.0				
Punto de inflamación, °C	60.0		D-93, D-6450, D-3828		
Densidad a 15°C, Kg/m <sup>3</sup>	800	876	D-1298, D-4052, D-7777		
<b>FLUIDEZ</b>					
Viscosidad cinemática a 40 °C, cSt	1.7	4.3	D-445		
Punto de escurrimiento, °C			-6	D-97, D-5949, D-5950, D-5985	
Punto de nube, °C			-1	D-2500, D-5771, D-5772 D-5773	
<b>CALIDAD DE IGNICIÓN</b>					
Número de cetano ó	42		D-613		
Índice de cetano	43		D-976, D-4737		
<b>COMPOSICIÓN</b>					
Número de acidez, mg KOH/Kg	0.30		D-974, D-664		
Azufre total, mg/Kg	50		D-5453, D-2622, D-7039, D-7220		
Cenizas, % masa	0.005		D-482		
Residuo carbón, 10% fondos, %masa (b)	0.20		D-524		
	0.14		D-4530, D-189		
Contenido de Hidrógeno, % masa	12.5		D-4808, D-5291, D-7171		
<b>CORROSIVIDAD</b>					
Corrosión lámina de cobre, 3h, 100°C, N°			1	D-130	
<b>ESTABILIDAD A LA OXIDACIÓN</b>					
Total insolubles, mg/100 mL	3.0		D-5304		
	1.5		D-2274		
<b>CONTAMINANTES</b>					
Partículas contaminantes, mg/L	10		D-6217, D-5452		
<b>Trazas de metales:</b>					
Vanadio, mg/Kg	0.5		D-7111, D-3605		
Sodio + potasio, mg/Kg	1.0		D-7111, D-3605		
Calcio, mg/Kg	1.0		D-7111, D-3605		
Plomo, mg/Kg	0.5		D-7111, D-3605		
<b>LUBRICIDAD, a 60°C, µm</b>	460		D-6079, D7688		
<b>DEMULSIFICACIÓN, a 25°C, minutos</b>	10		D-1401		
<b>OBSERVACIONES:</b>					
(a) En concordancia con la Norma Militar MIL-DTL-16884 y con la Norma Técnica Peruana NTP 321.135.					
(b) De no contar con el equipo, calcular usando el Apéndice X2 del método ASTM D-524 a partir de los datos obtenidos con el ASTM D-189					

## Anexo 9. Especificaciones técnicas del Diésel B5 - Diésel B5(S-50)

DIESEL B5



PRODUCTO	MÉTODOS ASTM	DIESEL B5 (DS 041 - 2005)		DIESEL B5 (S-50) (DS 092 - 2009) <sup>84</sup>	
		VALOR MÍNIMO	VALOR MÁXIMO	VALOR MÍNIMO	VALOR MÁXIMO
<b>VOLATILIDAD</b>					
Densidad a 15°C, kg / m <sup>3</sup>	D 1298	Reportar		Reportar	
Punto de inflamación, °C	D 93	52		52	
Destilación (a 760 mm Hg)	D 86				
90% recuperado, °C		282	360	282	360
<b>FLUIDEZ</b>					
Punto de fluidez, °C	D 97		+ 4		+ 4
Viscosidad cinemática a 40°C, cSt	D 445	1,7	4,1	1,9	4,1
<b>CORROSIVIDAD</b>					
Corrosión lámina de cobre 3 h a 50°C	D 130		Nº 3		Nº 3
<b>COMBUSTIÓN</b>					
Residuo de carbón Ramsbottom 10% fondos, %m	D 524		0,35		0,35
Índice de Cetano	D 4737	40		40	
<b>COMPOSICIÓN</b>					
Azufre total, % m (ppm)	D 4294		0,5 (5000)		0,005 (50)
<b>CONTAMINANTES</b>					
Agua y Sedimentos, % V	D 2709		0,05		0,05
Cenizas, % peso	D 482		0,01		0,01
<b>LUBRICIDAD</b>					
Lubricidad, HFRR a 60°C, micrones	D 6079		---		520
<b>REQUERIMIENTOS DE OPERATIVIDAD</b>					
CFPP (POFF), °C	D 6371 / EN 116		---		-8
<b>CONDUCTIVIDAD</b>					
Conductividad, pS / m	D 2624		---		
<b>BIODIESEL 100 (B100)</b>					
Contenido de B100, % Vol	D 7371	5,0		5,0	

## Anexo 10. Parámetros de los crudos peruanos

Parámetro	Crudo Talara <sup>a</sup>		Crudo Selva <sup>a</sup>	
	Mínimo	Máximo	Mínimo	Máximo
Contenido de Azufre (% m/m)	0.0403	0.394	0.0666	1.85
Viscosidad a 40°C (cSt)	2.791	30.6	16.86	371
Densidad (g/mL)	nd	nd	0.8967	0.9054
Punto de Inflamación (°C)	62.5	62.5	nd	nd
Poder Calorífico Superior (MJ/kg)	41.717	46.213	42.869	44.601
Contenido de agua (% v/v)	nd	3.9	0.05	1.1
Cenizas (% m/m)	0.001	0.13	0.009	0.021
Punto de Fluidez (°C)	-21	21	-24	-3