UNIVERSIDAD NACIONAL DE SAN ANTONIO ABAD DEL CUSCO

FACULTAD DE INGENIERÍA DE PROCESOS

ESCUELA PROFESIONAL DE INGENIERÍA QUÍMICA

TESIS

EVALUACION DEL RENDIMIENTO DEL REACTOR DE PIROLISIS DE LECHO FIJO, PARA LA OBTENCION DE COMBUSTIBLES A PARTIR DE NEUMATICOS FUERA DE USO

PRESENTADO POR:

Br. JEYNER HAROLD ALTAMIRANO QUIO

Br. ALEXIS GENARO PRO MAMANI

PARA OPTAR AL TÍTULO PROFESIONAL DE INGENIERO QUÍMICO

ASESOR:

Mgt. WASHINGTON JULIO LECHUGA CANAL

CUSCO - PERÚ

2023

INFORME DE ORIGINALIDAD

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

El que suscribe, asesor del trabajo de investigación/tesis titulado:...EVALUACIÓN DEL RENDIMIENTO DEL REACTOR DE PIRÓLISIS DE LECHO FIJO, PARA LA OBTENCIÓN DE COMBUSTIBLES A PARTIR DE NEUMÁTICOS FUERA DE USO.....

presentado por: ...ALTAMIRANO QUIO, JEYNER HAROLD y PRO MAMANI, ALEXIS GENARO.....

con Nro. de DNI: ....48637659 y 72752464....., para optar el título profesional/grado académico de Ingeniero Químico

Informo que el trabajo de investigación ha sido sometido a revisión por....01..... 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....02%.....

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 hoja del reporte del Sistema Antiplagio.

Cusco,....19 de....diciembre..... de 20.23.....

.....
Firma

Post firma....Washington Julio Lechuga Canal

Nro. de DNI....23801349.....

ORCID del Asesor....0000-0003-1967-1720.....

Se adjunta:

1. Reporte generado por el Sistema Antiplagio.
2. Enlace del Reporte Generado por el Sistema Antiplagio: oid:27259:299864300

NOMBRE DEL TRABAJO

TESIS Evaluacion reactor pirolisis para obtencion combustibles a partir de neumaticos fuera de uso -

AUTOR

Altamirano Quio y Pro Mamani

RECUENTO DE PALABRAS

32915 Words

RECUENTO DE CARACTERES

169755 Characters

RECUENTO DE PÁGINAS

170 Pages

TAMAÑO DEL ARCHIVO

7.3MB

FECHA DE ENTREGA

Dec 19, 2023 8:53 AM GMT-5

FECHA DEL INFORME

Dec 19, 2023 8:56 AM GMT-5

2% de similitud general

El total combinado de todas las coincidencias, incluidas las fuentes superpuestas, para cada base d

- 2% Base de datos de Internet
- Base de datos de Crossref
- 1% Base de datos de trabajos entregados
- 0% Base de datos de publicaciones
- Base de datos de contenido publicado de Crossr

Excluir del Reporte de Similitud

- Material bibliográfico
- Coincidencia baja (menos de 20 palabras)
- Material citado
- Bloques de texto excluidos manualmente

PRESENTACIÓN

Señor Decano y docentes de la Escuela Profesional de Ingeniería de Química

Señores Miembros del Jurado.

De conformidad y cumpliendo lo estipulado en el Reglamento de Grados y Títulos de la Facultad de Ingeniería Química, de la Universidad Nacional de San Antonio Abad del Cusco, para optar al Título Profesional de Ingeniero Químico, ponemos a vuestra consideración la reciente investigación intitulada:

"EVALUACION DEL RENDIMIENTO DEL REACTOR DE PIROLISIS DE LECHO FIJO, PARA LA OBTENCION DE COMBUSTIBLES A PARTIR DE NEUMATICOS FUERA DE USO".

(Trabajo de Investigación)

El trabajo de investigación está orientado al estudio de la evaluación del rendimiento del reactor de pirólisis de lecho fijo, para la obtención de combustibles a partir de los neumáticos fuera de uso, como material precursor, ensayos que se realizaron en los Laboratorios de Hidrocarburo y Control de la Contaminación Ambiental, en la Escuela Profesional de Ingeniería Química de la Universidad Nacional de San Antonio Abad del Cusco.

Cuya información presentada en nuestro trabajo corresponda de referencia para posteriores investigaciones.

AGRADECIMIENTO

A Dios, por darnos la fuerza, salud y la energía necesaria para culminar el presente trabajo de investigación.

A nuestros padres y familiares, por el apoyo incondicional que siempre nos acompañaron a lo largo de todo este proceso.

Nuestro agradecimiento al Asesor**,** Mgt. Washington Julio Lechuga Canal, por su apoyo infinito el cual contribuyó al desarrollo y culminación del presente proyecto.

A Industrias Cachimayo, por la labor del montaje del reactor de pirólisis.

A nuestros amigos, María Fernanda Corazao, Kerén Orosco, Daniel Ayme, Yaneth Hurtado y Dax Valenzuela, quienes fueron parte del proceso, gracias por vuestra disponibilidad y cálida amistad.

Finalmente, el agradecimiento a nuestras maravillosas madres, sin vuestro apoyo y motivación no hubiera sido posible llegar hasta aquí, las queremos mucho y estaremos siempre agradecido infinitamente con todos ustedes.

Alexis Genaro Pro Mamani

Jeyner Harold Altamirano Quio

DEDICATORIA

Esta Tesis de Investigación está dedicada a Dios, por ser mi guía espiritual. A mi maravillosa madre, Victoria Mamani e Isaías Pro, a mis hermanos; Ronal, Víctor, Rafael, Isaías, Henry, Abraham, Liseth y José, quienes contribuyeron en todo momento a seguir adelante y alcanzar mis metas.

Alexis Genaro Pro Mamani

Dedico con todo mi corazón mi Tesis de Investigación a mi madre Dina Quío, a mi padre Edgar Zúñiga, a mi hermana N. Beky y a mi abuela Nicolasa que a lo largo de su vida me protegieron y me enseñaron a luchar por mis sueños y a no rendirme con las adversidades de la vida. Para ellos todo mi esfuerzo y dedicación.

Jeyner Harold Altamirano Quío

TABLA DE CONTENIDO

PRESENTACIÓN ..... **ii**

AGRADECIMIENTO ..... **iii**

DEDICATORIA ..... **iv**

TABLA DE CONTENIDO ..... **v**

ÍNDICE DE TABLAS ..... **ix**

ÍNDICE DE FIGURA ..... **xi**

ABREVIATURA ..... **xiii**

RESUMEN ..... **xiv**

ABSTRACT ..... **xv**

INTRODUCCIÓN **1**

CAPÍTULO I **3**

GENERALIDADES **3**

1.1. Planteamiento del problema 3

1.2. Formulación del problema 5

1.2.1. Problema general 5

1.2.2. Problemas específicos 6

1.3. Justificación 6

1.4. Objetivos de la investigación 8

1.4.1. Objetivo general 8

1.4.2. Objetivos específicos 8

CAPÍTULO II **9**

FUNDAMENTOS TEÓRICOS 9

2.1 Antecedentes de investigación 9

2.1.1. Antecedentes Internacionales 10

2.1.2. Antecedentes Nacionales..... 11

2.2 Bases Teóricas.....12

2.3 Variables.....15

2.3.1 Variables independientes 15

2.3.2 Variables dependientes 15

2.3.3 Variables intervinientes 15

2.4 Operacionalización de variables.....16

2.5 Materia Prima: Neumáticos fuera de uso (NFU) 17

2.5.1 Composición del neumático 17

2.5.2 El caucho 21

2.5.3 Tipos de caucho 21

2.5.3.1 Caucho natural (isómero cis-1,4-poliisopreno) 21

2.5.3.2 Caucho sintético 23

2.5.4 Valorización de neumáticos fuera de uso 25

2.6 Pirólisis.....28

2.6.1 Proceso de pirólisis 28

2.6.2 Tipos de pirólisis 30

2.6.2.1 Pirólisis convencional (lenta) 30

2.6.2.2 Pirólisis rápida 31

2.6.2.3 Pirólisis catalítica..... 31

2.6.2.4 Pirólisis flash o pirólisis ultrarrápida..... 32

2.6.2.5 Proceso de pirólisis al vacío 33

2.6.2.6 Proceso de Hidropirólisis..... 34

2.6.3 Tipos de reactores para el proceso de pirólisis 35

2.6.3.1 Reactor de lecho fijo (FB) 35

2.6.3.2 Reactor de lecho fluidizado (FLB) 35

2.6.3.3 Reactor de tanque agitado contínuo (CSTR)..... 35

2.6.3.4 Reactor de horno rotatorio (RK)..... 36

2.6.3.5 Reactor de lecho con pico cónico 36

2.6.4 Productos del proceso de pirólisis 39

2.6.5 Aplicación industrial del proceso de pirólisis..... 42

2.6.6 Proceso de pirólisis de neumáticos fuera de uso (NFU)..... 42

2.6.7 Cinética del proceso de pirólisis para neumáticos fuera de uso 44

2.6.8 Modelo cinético basado en experiencias 45

2.6.9 Desarrollo del perfil de temperatura del proceso de pirólisis de NFU 47

2.6.10 Destilación al vacío de combustibles líquido procedente de pirólisis de NFU 48

CAPÍTULO III.....50

MATERIALES Y MÉTODOS.....50

3.1 Diseño experimental.....50

3.2 Materiales, equipos e insumo.....54

3.2.1 Características del prototipo del reactor de pirólisis de lecho fijo . 55

3.3 Procedimiento experimental del proceso de pirólisis del reactor del lecho fijo 58

CAPÍTULO IV 62

RESULTADOS Y DISCUSIÓN 62

4.3.1 Rendimiento de los productos líquidos 65

4.3.2 Rendimiento del producto sólido (Char) 74

4.3.3 Rendimiento del producto gaseoso..... 82

4.4 Propiedades fisicoquímicas del producto líquido de pirólisis de NFU 90

CONCLUSIONES.....104

RECOMENDACIONES.....106

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....107

APÉNDICE.....119

ANEXOS.....153

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1 Matriz de operacionalización de variables..... 16

Tabla 2 Composición del neumático con base a sus materias primas 19

Tabla 3 Composición elemental de los NFU 20

Tabla 4 Clasificación de las propiedades del caucho natural 22

Tabla 5 Valorización material y energética de los neumáticos fuera de uso 26

Tabla 6 Tipos de proceso de pirólisis 34

Tabla 7 Dimensiones de reactores de lecho fijo en pruebas experimentales de pirólisis ... 37

Tabla 8 Tecnologías de valorización de pirólisis..... 38

Tabla 9 Diseño experimental 51

Tabla 10 Diseño experimental del proceso de pirólisis 52

Tabla 11 Composición química del neumático fuera de uso 63

Tabla 12 Rendimiento del combustible líquido de cada réplica 66

Tabla 13 Efectos de las variables sobre el rendimiento del combustible líquido 68

Tabla 14 Análisis de varianza del rendimiento líquido 70

Tabla 15 Coeficientes de regresión del modelo matemático para el rendimiento del producto líquido 71

Tabla 16 Rendimiento del producto sólido (char) 75

Tabla 17 Efectos de las variables sobre el rendimiento del producto sólido (char) 76

Tabla 18 Análisis de varianza del rendimiento sólido (char) 78

Tabla 19 Coeficiente de regresión para el rendimiento del sólido (char) 79

Tabla 20 Rendimiento del gas de síntesis 83

Tabla 21 Efectos de las variables sobre el rendimiento del gas de síntesis 84

Tabla 22 Análisis de varianza para el rendimiento gas de síntesis 86

Tabla 23 Coeficiente de regresión para el rendimiento del gas de síntesis 87

Tabla 24 Balance de materia del proceso de pirólisis de NFU 90

Tabla 25 Propiedades fisicoquímicas del producto líquido para cada experiencia 91

Tabla 26 Fracciones de destilado del crudo de petróleo pesado ASTM D2892 95

Tabla 27 Caracterización fisicoquímica por cortes de destilación al vacío ASTM D1160 96

Tabla 28 Propiedades físicas del producto sólido de pirólisis de NFU 98

Tabla 29 Contenido de metales en el producto sólido (char)..... 99

ÍNDICE DE FIGURA

Figura 1 Neumáticos fuera de uso, fuente de Contaminación Ambiental 4

Figura 2 Crecimiento vehicular en la región del Cusco en los últimos años..... 4

Figura 3 Esquema de componentes estructurales de un neumático..... 18

Figura 4 Gránulos de NFU en distintos tamaños utilizados para el proceso de pirólisis.... 20

Figura 5 Unidad estructural repetitiva del caucho natural..... 21

Figura 6 Caucho estireno butadieno-SBR..... 24

Figura 7 Unidad de pirólisis de NFU de lecho fijo..... 29

Figura 8 Posiciones de craqueo de la molécula de caucho durante un proceso de descomposición..... 32

Figura 9 Modelos de reactores de pirólisis 37

Figura 10 Productos obtenidos del proceso de pirólisis de NFU..... 42

Figura 11 Representación del proceso de pirólisis de neumáticos fuera de uso..... 44

Figura 12 Mapa de reacción del proceso de pirólisis en los NFU 46

Figura 13 Efecto de la temperatura de pirólisis en los diferentes compuestos 46

Figura 14 Perfil de temperatura del proceso de pirólisis de NFU..... 48

Figura 15 Diagrama de bloques del proceso de pirólisis de NFU 53

Figura 16 Características del sistema de pirólisis de NFU 56

Figura 17 Reactor de pirólisis de lecho fijo..... 56

Figura 18 Dimensiones del reactor de pirólisis de lecho fijo..... 57

Figura 19 Muestra de neumáticos fuera de uso, extraída del taller de trituración RECRUZ S.A.C..... 57

Figura 20 Muestras de granulometría de neumáticos fuera de uso..... 58

Figura 21 Productos obtenidos del proceso de pirólisis del reactor de lecho fijo..... 60

Figura 22 Diagrama de flujo del proceso de pirólisis de NFU 61

Figura 23 Efecto de pirólisis térmica y granulometría del NFU de 0.5 a 1.0 mm..... 64

Figura 24 Gráfica de efectos principales en el rendimiento de combustible líquido..... 69

Figura 25 Diagrama de pareto de los efectos de las variables en el rendimiento del combustible líquido..... 69

Figura 26 Gráfico de contorno temperatura vs tamaño de partícula..... 72

Figura 27 Gráfico de contorno: Tamaño de partícula vs Gradiente de calentamiento 74

Figura 28 Gráfica de efectos principales en el rendimiento del sólido (char) 77

Figura 29 Diagrama de pareto de efectos de las variables para el rendimiento del producto sólido (char) 77

Figura 30 Gráfico de contorno: Temperatura vs Tamaño de partícula..... 80

Figura 31 Gráfico de contorno: Gradiente de calentamiento vs Tamaño de partícula 81

Figura 32 Gráfica de efectos principales en el rendimiento de gas de síntesis..... 85

Figura 33 Diagrama de pareto para el rendimiento del gas 85

Figura 34 Gráfico de contorno: Temperatura vs Tamaño de partícula..... 88

Figura 35 Proceso de destilación al vacío ASTM D1160..... 92

Figura 36 Producto de la destilación al vacío ASTM D1160 92

Figura 37 Curva de destilación al vacío ASTM D1160 de combustibles líquidos de pirólisis de NFU..... 93

Figura 38 Curva de destilación al vacío ASTM D1160 de combustibles líquidos de pirólisis de NFU..... 94

Figura 39 Máximos rendimientos alcanzados durante el proceso de pirólisis para cada producto 101

Figura 40 Máximos rendimientos alcanzados de los combustibles en la destilación ASTM D1160..... 102

ABREVIATURA

- **ASTM**: American Society for Testing and Materials
- **AET:** Temperatura Atmosférica Equivalente (°C)
- **BR:** Polibutadieno
- **CS:** Caucho sintético
- **CN:** Caucho natural
- **CB:** Negro de Carbón o de humo
- **CO**: Monóxido de carbono
- **CO_2**: Dióxido de carbono
- **CV:** Valor calorífico
- **FLB**: Cama o lecho fluidizado
- **FB:** Lecho fijo
- **HZSM-5:** Zeolita
- **H_2S:** Sulfuro de hidrógeno
- **N_2**: Nitrógeno
- **NFU:** Neumáticos fuera de uso
- **NO_x**: Óxido de nitrógeno
- **SBR:** Estireno butadieno
- **ST:** Descomposición térmica
- **STP:** Neumáticos de desecho
- **TGA**: Análisis termogravimétrico
- **TBP:** Puntos verdaderos de Ebullición
- **USP:** Pirólisis de pulverización ultrasónica
- **RS:** Caucho sintético

RESUMEN

El presente trabajo de investigación tuvo como objetivo, evaluar el rendimiento del reactor (Batch) de pirólisis de lecho fijo para la obtención de combustibles a partir de los neumáticos fuera de uso (NFU); utilizando una muestra triturada de mezcla de diferentes neumáticos. Este proceso inició con la separación del NFU por tamaño de partícula y pesado de la muestra. En la evaluación del rendimiento del reactor de pirólisis se utilizó un diseño factorial 2^3 con tres réplicas, realizándose 24 ensayos para el estudio de los efectos de las variables independientes: Gradiente de calentamiento (15 y 25 °C/min), temperatura de operación (500 y 600 °C) y tamaño de partícula en mallas Tyler N°18 y 40 (0.5 y 1.0 mm) sobre la variable dependiente que es el rendimiento de las fracciones (líquido, sólido y gas). Todos los ensayos de llevaron a presión absoluta de 2.034 atm. Las condiciones óptimas de operación del reactor de lecho fijo fueron de 15°C/min, 500 °C, y 0.5 mm que produjo el máximo rendimiento de la fracción líquida que alcanzó el 52.87 %, así mismo a condiciones de 25 °C/min, 600 °C y 0.5 mm el rendimiento del producto sólido alcanzó un máximo de 43.05 % y el mayor rendimiento del producto gaseoso que alcanzó fue 11.60 % a condiciones de 25 °C/min, 600 °C y 1.0 mm. Los combustibles líquidos obtenidos en el proceso de pirólisis se sometieron a la destilación al vacío ASTM D1160 para la caracterización fisicoquímica de los combustibles por cortes según la norma ASTM, el cual se encontró presencia de nafta ligera, nafta pesada, kerosene y gasoil (diésel). La fracción sólida (char) se caracterizó su composición química elemental mediante el analizador XRF Vanta.

Palabras clave: Pirólisis de lecho fijo, neumáticos fuera de uso (NFU), combustibles y rendimiento.

ABSTRACT

The objective of this research work was to evaluate the performance of the fixed bed pyrolysis reactor (Batch) for obtaining fuel from end-of-life tires (NFU); using a crushed sample of mixture of different tires. This process began with the separation of the NFU by particle size and weight of the sample. In the evaluation of the performance of the pyrolysis reactor, a 2^3 factorial design with three replications was used, carrying out 24 tests to study the effects of the independent variables: Heating gradient (15 and 25 °C/min), operating temperature (500 and 600 °C) and particle size in Tyler meshes N°18 and 40 (0.5 and 1.0 mm) on the dependent variable which is the yield of the fractions (liquid, solid and gas). All tests were carried out at an absolute pressure of 2,034 atm. The optimal operating conditions of the fixed bed reactor were 15°C/min, 500 °C, and 0.5 mm, which produced the maximum yield of the liquid fraction that reached 52.87%, also at conditions of 25 °C/min., 600 °C and 0.5 mm, the solid product yield reached a maximum of 43.05 % and the highest gas product yield reached was 11.60 % at conditions of 25 °C/min, 600 °C and 1.0 mm. The liquid fuels obtained in the pyrolysis process were subjected to ASTM D1160 vacuum distillation for the physicochemical characterization of the fuels by cuts according to the ASTM standard, which found the presence of light naphtha, heavy naphtha, kerosene and diesel (diesel). The solid fraction (char) was characterized for its elemental chemical composition using the Vanta XRF analyzer.

Keywords: Fixed bed pyrolysis, end-of-life tires (NFU), fuels and performance.

INTRODUCCIÓN

La presente investigación busca una alternativa de solución a los residuos que se producen a partir de los neumáticos fuera de uso, mediante la aplicación de un proceso de degradación térmica como es el proceso de pirólisis, con la finalidad de reducir el impacto ambiental generado por estos desechos. El principal enfoque de nuestra investigación es la evaluación del rendimiento del reactor de pirólisis de lecho fijo, para la obtención de combustibles a partir de los neumáticos fuera de uso (NFU), caracterizarlos fisicoquímicamente y aplicarlos en el uso industrial. El proceso de pirólisis brinda una diversidad de productos con un alto valor económico y capacidad calorífica alta. Arabiourrutia y Lopez (2007).

En los últimos años se incrementó la circulación de vehículos en la región del Cusco, esto generó mayor consumo de todo tipo de neumáticos, como consecuencia generó el aumento de los desechos de neumáticos fuera de uso en nuestra ciudad y los problemas ambientales por la carencia de alternativas para su disposición final, ocasionando un “impacto negativo en la salud pública y la degradación del ecosistema”. MINAN (2021).

Para este problema, se ha optado recurrir a nuevas alternativas de reutilización de los neumáticos fuera de uso, debido a que, al ser usados como combustibles sin un previo tratamiento, generan gases que contienen compuestos nocivos para el ser humano y el medio ambiente, como óxidos de plomo, dióxido de carbono, óxidos de zinc, monóxido de carbono, benceno, fenoles, óxidos de nitrógeno, que se disipan en el aire. Ramírez Garzón, (2012).

La disminución progresiva de los combustibles fósiles, suman al consumo exponencial de energía en el mundo, que crea una necesidad inminente de hallar nuevas

alternativas de combustibles que sean factibles, amigables con el medio ambiente y puedan sustituir a los derivados del petróleo Kumaravel y Murugesan (2016).

Para ello se muestra una alternativa de solución mediante el uso del proceso de pirólisis para el tratamiento de estos desechos; éste permite tratar los residuos siendo una opción significativa para el reciclaje, y la obtención de productos que se pueden volver a reutilizarse. Martínez (2013).

CAPÍTULO I

GENERALIDADES

1.1. Planteamiento del problema

La producción de los neumáticos a nivel mundial ha generado diversos problemas ambientales como: La deforestación ambiental para la producción del caucho natural y la contaminación del medio ambiente por la explotación y uso de los recursos fósiles para la producción del caucho sintético, lo cual ha generado que a nivel mundial se desechen millones de neumáticos como se muestra en la Figura 1, que son potenciales fuentes de contaminación Flores (2020).

En el 2014, ingresaron 55 673 toneladas de llantas, mientras en el 2018 se incrementó a 92 659 toneladas, las cuales posteriormente a su uso, se convierten en NFU. Debido a la necesidad de recambio del parque vehicular existente, ya sea en carretera o fuera de ella, y posterior a su uso, se convirtieron en residuos sólidos. Por esta razón se requiere de un manejo diferenciado en el marco del principio de responsabilidades extendida del productor (REP), a fin de evitar, que por la inadecuada disposición se emitan gases tóxicos y posibles efectos dañinos a la salud de las personas y del medio.

Tan solo el 38.7% de resíduos son dispuestos en 1724 áreas degradadas. Agenda del Ministerio del Ambiente para el año 2021 (D.S. N° 024-2021- MINAM).

Laresgoiti M. (2010) reportó que los NFU son fuente potencial como materia prima para el proceso de pirólisis, debido a que el caucho vulcanizado que se encuentra en la estructura del neumático hace posible la obtención de combustibles (líquido, sólido y gas), estos productos poseen un elevado poder calorífico que permiten recuperar energía.

Figura 1

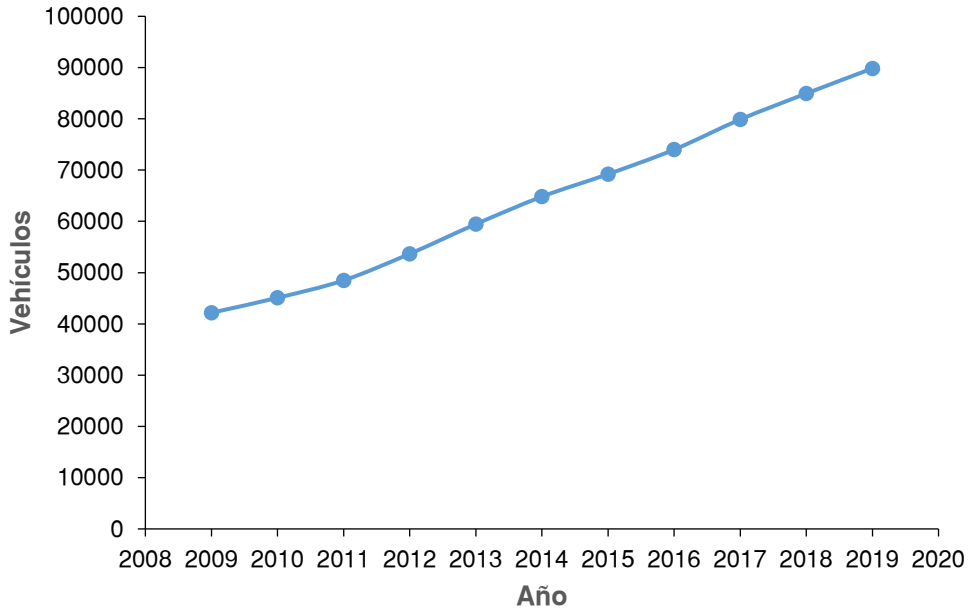
Neumáticos fuera de uso, fuente de Contaminación Ambiental

Nota: *Los NFU, generan un impacto negativo en el medio ambiente. Adaptado de TresPM (2020).*

En la Figura 2 se muestra el crecimiento del parque automotor en la región del Cusco, el cual incrementó durante los últimos años.

Figura 2

Crecimiento vehicular en la región del Cusco en los últimos años



Nota: Parque Vehicular Estimado por Años, Según Departamento o Región: 2009-2019. *Adaptado de: Oficina de Estadística–Superintendencia Nacional de los Registros Públicos (SUNARP) Ministerio de Transportes y Comunicaciones.*

Los impactos ambientales generados por los residuos de NFU en la región del Cusco han ido en aumento, un ejemplo del mal uso de los NFUs que se puede observar es como combustible sin previo tratamiento en la industria ladrillera artesanal del distrito de San Jerónimo, esto por falta de desarrollo de técnicas para su tratamiento. El mayor impacto que se genera, es la producción gases tóxicos como: Óxidos de carbono (CO_x), óxidos de azufre (SO_x) y óxidos de nitrógeno (NO_x), estos gases afectan al medio ambiente y generan daños sobre la salud.

Llanos *et al*., (2017) sostienen que es necesario tener en consideración que una llanta puede tardar aproximadamente 500 años en degradarse en el ambiente además que muchas de estas luego de ser usadas son almacenadas (en depósitos y/o basurales) o incineradas a campo abierto.

Magallanes y Guillen (2014) sostienen que NFU generalmente se depositan acopiándolos a la intemperie o enterrándolos bajo desechos, en diversos botaderos de material estéril y/o reencauchados. Estos crean de refugio a diversas plagas, insectos y/o roedores, muchos de los cuales son vectores de enfermedades que ponen riesgo a la salud.

Ko, Mui *et al*., (2004) describieron que la disposición final de los NFU representa uno de los mayores problemas ambientales alrededor del mundo; ya que son prácticamente inmunes a la degradación biológica.

1.2. Formulación del problema

1.2.1. Problema general

- ¿Cuál es el rendimiento del reactor de pirólisis de lecho fijo, para la obtención de combustibles a partir de los Neumáticos Fuera de Uso?

1.2.2. Problemas específicos

- ¿Cuál es el grado de relación entre efecto de gradiente de calentamiento de la materia prima y el rendimiento de los productos obtenidos a partir del proceso de pirólisis?
- ¿Cuál es el grado de relación entre el efecto de la temperatura y el rendimiento de los productos obtenidos a partir del proceso de pirólisis?
- ¿Cuál es el grado de relación entre el tamaño de la partícula y el rendimiento de los productos obtenido a partir del proceso de pirólisis?

1.3. Justificación

Álvarez Arredondo (2014), mencionó que en el mercado peruano anualmente se comercializan 3 millones de neumáticos para camionetas, buses, autos, cústeres y camiones. La venta de neumáticos tiene una tendencia de crecimiento estimado del 5% anual, y el mayor porcentaje se convierten en NFU.

En las regiones del Perú gran parte de los NFU se desperdician por la carencia de una planta industrial dedicada al manejo y procesamiento, al desconocer de maquinaria y tecnología necesaria para su tratamiento Olivares (2016).

Los NFUs son materia prima para la obtención de agregados industriales como: Caucho granulado, harina de caucho, combustible, char, acero y fibra textil que son utilizados en industrias de vulcanizados, fundición, producción de asfaltos y para la obtención de combustible de uso industrial.

El almacenamiento de los NFU en la actualidad es un problema técnico, económico, ambiental, de salud pública, y entonces es de vital importancia realizar investigaciones sobre la diversidad de productos industriales que se pueden obtener al ser

procesados los NFUs. El uso más apropiado es la tecnología para el proceso de tratamiento de los NFU, donde se genera combustibles y solventes con un alto valor agregado.

- **Conveniencia**

Es conveniente realizar este trabajo de investigación sobre la evaluación del rendimiento del reactor de pirólisis de lecho fijo, para la obtención de combustibles a partir de NFU, debido a la gran cantidad de materia prima existente en el país y al mejoramiento de la tecnología del proceso de pirólisis, que permite la recuperación de los NFU para la obtención de productos agregados como: Combustibles, solventes orgánicos y char, que tienen un alto valor comercial y son fuente de energía.

- **Relevancia social**

En el Perú, las investigaciones sobre el tratamiento de NFU son escasas, debido a ello, se propone desarrollar la tecnología para la mejora del proceso de pirólisis con el uso del reactor de pirólisis de lecho fijo. Esta investigación pretende dar una alternativa de solución para el tratamiento de NFU y a partir de su aplicación obtener combustibles de alto valor agregado que pueden ser usados como fuente de energía en la sociedad. Los beneficios que traerá la aplicación de este método serán: La disminución de las emisiones de gases de efecto de efecto invernadero ocasionados por la quema directa de los neumáticos, la reducción de micropartículas de NFU generados por la degradación a la intemperie y recuperación de áreas de terreno.

- **Valor teórico**

La investigación sobre la evaluación del reactor de pirólisis de lecho fijo, pretende obtener resultados favorables para obtener productos como: Combustible líquido, gaseoso y char, de valor agregado que beneficiarán a las diferentes áreas para el tratamiento de residuos. El char producido en el proceso de pirólisis de NFU puede ser utilizado en la obtención de carbón activado para la aplicación en el área de tratamiento de aguas y el

combustible líquido como fuente de energía en la industria ladrillera de nuestra región. Esta técnica contribuirá al desarrollo y mejor conocimiento para la aplicación del proceso de pirólisis a escala industrial del tratamiento del neumático.

- **Utilidad metodológica**

Con la evaluación del rendimiento del reactor de pirólisis de lecho fijo, se incrementará el desarrollo el conocimiento para el tratamiento de los residuos sólidos orgánicos de los NFU en nuestra región, debido a su gran potencial para obtener combustibles a partir de estos residuos y darle un valor comercial.

- **Viabilidad o factibilidad**

La investigación es viable debido al fácil acceso de la materia prima y de contar con el equipo de reactor de pirólisis. Donde se determinará el rendimiento de los productos del proceso de pirólisis de NFU.

1.4. Objetivos de la investigación

1.4.1. Objetivo general

- Evaluar el rendimiento del reactor de pirólisis de lecho fijo, para la obtención de combustibles a partir de los neumáticos fuera de uso.

1.4.2. Objetivos específicos

- Determinar el efecto de la temperatura sobre el rendimiento de los productos obtenidos a partir del proceso de pirólisis.
- Evaluar la influencia entre el gradiente de calentamiento de la materia prima y el rendimiento de los productos obtenidos a partir del proceso de pirólisis.
- Determinar el grado de dependencia entre el tamaño de la partícula y el rendimiento de los productos obtenido a partir del proceso pirólisis.

CAPÍTULO II

FUNDAMENTOS TEÓRICOS

2.1 Antecedentes de investigación

La generación de neumáticos usados superó en el año 2005, los 2.5 (miles de millones en TM) en Norteamérica y Europa, de 0.5-1.0 de TM en Japón, lo que corresponde a 6 kg (el peso medio aprox. de un neumático) por habitante al año Larsen (2006). El proceso de pirólisis es una alternativa de mitigación a gran escala e integrable para el tratamiento de NFU, con la valorización de productos obtenidos a partir del proceso Arabiourrutia *et al.*, (2007).

El proceso de pirólisis es una técnica en desarrollo para extraer combustible a partir del neumático de desecho mediante su conversión en productos útiles, es decir, aceite de pirólisis de neumáticos (TPO), gas de síntesis y carbón sólido con alto valor energético. El TPO, un líquido de color marrón oscuro/negro, se utiliza como combustible en motores de encendido por compresión (CI), hornos industriales y centrales eléctricas, etc. El TPO contiene compuestos de diferentes hidrocarburos que van desde C_5 a C_{20} y se puede utilizar como fuente alternativa. de energía que pueda contribuir a reducir el consumo de combustibles derivados del petróleo y su tendencia al alza en los precios. Saksham *et al.*, (2020).

El proceso de pirólisis es un “proceso termoquímico de descomposición mediante la utilización de altas temperaturas en ausencia de oxígeno. Donde se obtiene productos como, hidrocarburos líquidos, componentes gaseosos y residuos sólido Luz *et al.*, (2008).

En investigaciones previas, se han demostrado que el líquido pirolítico que se produce a partir de este tratamiento, puede ser utilizado directamente como fuel oíl y como materia prima en procesos petroquímicos. El gas puede ser utilizado como combustible, y

el carbón puede ser empleado como negro de carbón en procesos de gasificación y como materia prima para la producción de carbón activado. Pretell *et al.*, (2021)

La presente investigación tiene como objetivo desarrollar la evaluación sobre el rendimiento del reactor de pirólisis de lecho fijo, para la obtención de combustibles a partir de neumáticos fuera de uso, es darle un segundo tratamiento a los NFU, para su empleo inmediato como combustibles en diferentes productos componentes como son: Gasolina de bajo octanaje, kerosene, tolueno, benceno, etc. Es así que a partir de los resultados obtenidos de las diferentes fuentes investigación servirá para impulsar el uso de esta tecnología en nuestro país.

2.1.1. Antecedentes Internacionales

En el trabajo de investigación realizado por Vásquez Morales (2018), "Diseño de planta piloto para pirólisis con reactor tipo Spouted bed de neumáticos usados", el objetivo general es "Valorizar y transformar en sustancias de mayor valor agregado y aprovechar energéticamente". La investigación está enmarcada en el enfoque cuantitativo y experimental. Para el diseño de la planta piloto de pirólisis se toma un flujo másico de 120 kg/h, concluye que los siguientes parámetros óptimos para el dimensionamiento del reactor R-100 tipo Conical Spouted bed son: El diámetro fue de 0.94 m, altura total de 1.85 m, diámetro de entrada del gas de 0.12 m y un diámetro de 0.145 m en fondo del cono, con una altura mínima del lecho de 0.12 m, y el flujo de calor necesario es de 54.5 kW. Los rendimientos obtenidos de los productos de pirólisis fueron: 9% de gas de pirólisis, 30% de chart y 61% en peso de líquido pirolítico.

En el trabajo de investigación realizado por Mohammad Abdulet *et al.,* (2018), titulado "Diseño, fabricación y prueba de rendimiento de una planta de pirólisis discontinua de lecho fijo con llantas de desecho en Bangladesh", cuyo objetivo general es " diseño y construcción de un reactor de pirólisis discontinua de lecho fijo. La

investigación está enmarcada en el enfoque cuantitativo y experimental, en su trabajo se concluye que los efectos sobre el rendimiento de los productos obtenidos, depende en su mayoría de las variables que son: El resultado muestra que el reactor produce un piroaceite máximo de 42% en peso a una temperatura de 400 °C con un tamaño de alimentación de 15 cm^3. Este producto tiene una viscosidad más alta de 4.5 cSt y un poder calorífico de 42.5 MJ/kg. Por lo tanto, el piroaceite no se puede utilizar directamente en el funcionamiento del motor, sino como aceite de horno o combustible en el funcionamiento de la caldera. El carbón vegetal tiene potencial para su uso como fertilizante, producción de cintas transportadoras y calzado.

En el trabajo de investigación realizado por Dzuhairy Ab *et al.*, (2020) sobre la "Perspectivas sobre la pirólisis de llantas de desecho en un reactor de lecho fijo: Comportamiento térmico". La investigación es de tipo cuantitativa y experimental, el objetivo general que plantea dentro su trabajo es "El análisis sobre el proceso de pirólisis de neumáticos fuera de uso en un reactor de lecho fijo y su comportamiento térmico". Concluye que los resultados más óptimos de las variables de operación que empleó dentro de la experimentación fue: Tamaño de partícula entre (0.4 mm y 1.0 mm), temperatura de 300 y 700 °C, el cual determinó el grado de rendimiento de los productos 41% sólido, 32% líquido, 27% gas y un flujo de gas inerte (N_2) de 5 l/min.

2.1.2. Antecedentes Nacionales

En la investigación realizada por Vargas Vilca (2019), donde se realizó la "Evaluación del proceso de pirólisis térmica y catalítica, usando zeolitas volcánicas como catalizador de desechos plásticos", las zeolitas Z1 y Z2 sintetizados a partir de la ceniza volcánica. La zeolita Z2 al 1% fue la que generó un mayor rendimiento de gases pirolíticos 51.52 % con un rango de temperatura de 440 a 500 °C, la zeolita Z1 al 2% generó el mayor rendimiento de ceras pirolíticas 21.69 % y la Z1 al 1% generó el mayor rendimiento de

líquidos pirolíticos 36.48%. Con la zeolita Z2 a un 1% usando los desechos de plásticos se obtuvo un 50.29 % de gases pirolíticos. Se caracterizó los líquidos y ceras pirolíticas a través del análisis de espectroscopía infrarroja, y no se observó diferencias significativas en los espectros excepto al usar la zeolita sintética.

El artículo de investigación realizado por Pretell *et al.*, (2021) se estudió el rendimiento y calidad de los combustibles líquidos obtenidas al efectuar la pirólisis al vacío de los NFU, la evaluación del efecto de la presión de vacío, temperatura y tamaño de la partícula sobre los rendimientos de las fracciones líquidas.

Se realizaron experimentos a escala de laboratorio y piloto donde el máximo rendimiento de producto líquido fue de 550 °C y 30.52 kPa de presión y variación granulométrica de 25x25 mm. En estas condiciones el rendimiento del producto líquido fue 54.32 %, el rendimiento del producto sólido fue 39.87 % y el rendimiento del gas fue del 5.81 %. El sólido es un producto carbonoso de baja humedad con un poder calorífico superior de 23.49 MJ/kg, que está clasificado como carbono tipo B según la norma ASTM D388. A escala piloto se obtuvo 35.88 % de producto líquido, 42.42 % de sólido y 21.70 % de producto gaseoso.

2.2 Bases Teóricas

- **Gradiente de calentamiento**

- La velocidad de calentamiento o gradiente de calentamiento, es una variable que influye directamente sobre el rendimiento, densidad y viscosidad de los productos, durante el proceso de pirólisis (Batch, rápida, catalítica o flash). La gradiente de calentamiento es alta, cuando esta se encuentra dentro del rango de 100 – 250 °C/min, esto incrementa el rendimiento en el producto gaseoso 15-26 %, y una disminución en el rendimiento del líquido con 28-35 %, además de un menor

tiempo de residencia en el reactor Wang (2017).

- Para un proceso de pirólisis convencional (lenta) que tiene una gradiente de calentamiento dentro del rango de 5 – 50 °C/min el rendimiento será mayor en los productos líquidos 40 – 55 % debido al craqueo lento de las partículas de los neumáticos durante el proceso, el rendimiento del producto gaseoso 8-15 %, una de las desventajas durante el proceso es el mayor tiempo de residencia de la materia prima (NFU) dentro del reactor Fernandez-Colino *et al.*, (2008).

➢ **Tamaño de partícula (granulometría)**

- Dzuhairy Ab *et al.*, (2020) mencionó que el tamaño de partícula es una variable que influye directamente sobre el rendimiento de los productos durante el proceso de pirólisis (rápida o convencional), para un tamaño de partícula dentro del rango 0.5 – 1.0 mm de diámetro, este incrementa el rendimiento del producto líquido si el tiempo de residencia está en el rango de 30 – 60 min, para un tiempo mayor a este beneficia al incremento del rendimiento del producto gaseoso. En el caso que el tamaño de partícula se encuentra en el rango de 1 – 2.5 mm y un tiempo de residencia de 30 -60 min se obtiene un mayor rendimiento en el producto líquido, cuando el tiempo de residencia es mayor a los 60 min, se incrementa el rendimiento del producto líquido y en un menor porcentaje el producto gaseoso.

➢ **Temperatura**

- Una de las variables más importantes y que hace posible el proceso de pirólisis convencional es la temperatura debido a su influencia directa sobre el rendimiento, las propiedades físicas y químicas de los productos que se obtendrán durante el proceso. Para obtener un mayor rendimiento del producto líquido de 40 – 55 % la temperatura de operación debe estar dentro del rango de 400 – 600 °C para un tiempo de residencia de 30 – 60 min, para un rango de temperatura de 600 – 1000

°C el rendimiento del producto liquido será de 28 – 35 %, habrá un incremento sobre el rendimiento del producto gaseoso Mohammad Abdul *et al.,* (2018).

- **Rendimiento del combustible líquido, sólido y gaseoso (x_i, y_i, z_i)**

- Chun, Rongcheng *et al.* (2020), reportó que el rendimiento de producto líquido optimizado se obtuvo a una temperatura de pirólisis de 500 °C, con un caudal de gas portador de 5 l/m. A medida que sube la temperatura, el rendimiento de líquido incrementa significativamente hasta 500 °C con un rendimiento del 32 %. A la temperatura de 600 y 700 °C el rendimiento líquido comenzó a disminuir en un 22 y 21 %. El rendimiento en sólidos (carbón) a una temperatura de 300-500 °C se redujo del 86 al 41 %, que luego se mantuvo constante. El rendimiento del gas de síntesis a 300 ºC fue del 8% y a 700 ºC aumentó hasta un 39 %.
- En su estudio Mohammad Abdul e*t al.,* (2018), señaló que el aumento de aceite pirolítico hasta un tamaño de alimentación de partículas de 15 cm^3, el rendimiento máximo de aceite pirotécnico es de 42 % en peso para un tamaño de alimentación de 15 cm^3, con la formación de 44 % en peso de carbón y 14 % en peso de gas.
- Fernandez-Colino *et al.,* (2008), señaló que obtuvo una producción de líquido considerable superior al 50 % en el reactor de lecho fijo.

  Se puede observar que los rendimientos del combustible líquido son de 43.2 %, y el rendimiento gaseoso aumenta 17.1 %. Este hecho se puede atribuir a la mayor velocidad de calentamiento y al mayor tiempo de residencia del gas en el reactor de lecho móvil donde se produce un craqueo más severo de los productos de pirólisis.

2.3 Variables

2.3.1 Variables independientes

- Gradiente de calentamiento (°C/min)
- Tamaño de partícula (mm)
- Temperatura (°C)

2.3.2 Variables dependientes

- Rendimiento de los productos en las fases de líquido, sólido y gas (y_i, x_i, z_i)

2.3.3 Variables intervinientes

- Temperatura ambiente (°C)
- Presión atmosférica (atm)

En la Tabla 1, se observa la matriz de Operacionalización de variables para la evaluación de rendimiento del reactor (Batch) de pirólisis de lecho fijo, para la obtención de combustibles.

2.4 Operacionalización de variables

Tabla 1

Matriz de operacionalización de variables

“EVALUACIÓN DEL RENDIMIENTO DEL REACTOR DE PIRÓLISIS DE LECHO FIJO, PARA LA OBTENCIÓN DE COMBUSTIBLES A PARTIR DE NEUMÁTICOS FUERA DE USO”

Variable	Definición conceptual	Dimensiones	Indicadores
Variable independiente -Temperatura	Es una magnitud de medida de la intensidad o cantidad de calor que posee un cuerpo y determina la dirección en la cual fluye el calor	(°C)	Rango de operación 500 a 600°C
- Gradiente de calentamiento	Describe el calentamiento constante de la materia prima dentro reactor, para obtener un máximo rendimiento de los productos de pirólisis.	(°C/min)	Gradiente de calentamiento 15-25 °C/min
-Tamaño de partícula **(**granulometría)	Se define como el tamaño relativo de los granos NFU representadas en una muestra.	(mm)	0.5mm -1mm de granulometría
Variable dependiente -Rendimiento de los productos obtenidos en las fases líquidas, sólidas y gaseoso (y_i, x_i, z_s).	Viene hacer el producto con mayor porcentaje óptimo, frente a otros productos.	(%)	Rendimiento: Sólido: 42-50% Líquido: 40-43% Gas: 7-15%
Variable interviniente -Temperatura Ambiente	Es la temperatura que se manifiesta en el aire y en los cuerpos en forma de calor, que fluctúa entre dos extremos que, se denominan: Caliente y frio. Se mide en grados Celsius, Fahrenheit, Kelvin o Rankine.	(°C)	15-25
-Presión Atmosférica	Es la presión que ejerce la atmósfera que rodea la tierra. La presión atmosférica cambia con la altura respecto al nivel del mar	(atm)	512 mmHg

2.5 Materia Prima: Neumáticos fuera de uso (NFU)

Murcia *et al.*, (2016) mencionaron que los neumáticos son elementos básicos para la movilidad de cualquier vehículo automotor, debido a que están fabricados principalmente por caucho que posee la resistencia y solidez para soportar aire a alta presión, y de resistir cargas dinámicas que se produce en la aceleración y frenado, para así amortiguar los impactos.

Su principal componente es el caucho natural o sintético, lo cual representa el 80% de su peso Castro G. (2016). “El caucho natural proporciona elasticidad al neumático, mientras que el sintético aporta estabilidad térmica. El negro de humo, obtenido por descomposición térmica parcial de gases naturales, permite obtener mezclas más resistentes a la abrasión y rotura, lo cual le da el color negro característico a la llanta” Olivares (2016).

2.5.1 Composición del neumático

Beecham (2014) reportó que los NFU están compuestas por diferentes compuestos que le brinda resistencia a la carga, posibilidad de operación a alta presión y adherencia. Los NFU “resisten a muchos procesos de degradación química o microbiológica debido al proceso de vulcanización que estuvo sometido para su fabricación, que consiste en polímeros de cadena larga (isopreno, butadieno y estireno-butadieno) que se unen con enlaces de azufre, y están protegidos además por antioxidantes y antiozonantes”. En la Tabla 2 se muestra la composición de los NFUs.

El Ministerio del Ambiente 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 MINAN (2021). El proceso de fabricación de los neumáticos es bastante complejo que 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 facilitarán su construcción, ver la Figura 3. Grados (2018) en definitiva, la combinación de todos estos insumos y materias primas servirá como resultado un producto resistente a temperaturas altas, a la fricción con diferentes suelos y diferentes climas, debido a esta resistencia de los materiales ensamblados que componen el neumático. Al final de su vida útil se estima que el neumático se degradará en varios siglos.

Figura 3

Esquema de componentes estructurales de un neumático

Fuente: *Recuperado de Meza (2014) y Mejía, Upegi (2021).*

Velarde *et al.,* (2018) un neumático es una estructura muy compleja, su ingrediente principal es el caucho, que supone la mitad de su peso 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. Obtenido por combustión o pirólisis parcial de gas natural o de hidrocarburos pesados, el negro de humo permite obtener compuestos más resistentes a la rotura y al desgaste y confiere a las llantas 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 neumático fuera de uso (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 2. Olivares (2016) mencionó que los neumáticos están compuestos principalmente por cauchos naturales y sintéticos los cuales son cadenas largas de carbonos e hidrógenos esto se puede observar en la composición química como se ve en la Tabla 3.

Los NFU para ser utilizados como materia prima en los distintos tipos de procesos de pirólisis, antes son sometidos a un proceso de triturado para así obtener los gránulos NFU como se muestra en la Figura 4, que luego son cargados al reactor de pirólisis de lecho fijo.

En la Tabla 2, se muestra la composición porcentual que tiene los neumáticos en base a sus materias primas.

Tabla 2

Composición del neumático con base a sus materias primas

Referencia	Chen	US [EPA]	Kar
Nombre [Compuesto]	Porcentaje Masa [%p]		
Caucho Natural	29.59	-	19.53
Caucho Estireno	29.59	46.78	43.50
Negro de Humo	29.59	45.59	32.60
Ácido Esteárico	0.59	0.94	-
Óxido de Zinc	2.96	1.40	1.10
Azufre	0.89	1.17	1.10
Resina Fenólica	2.37	-	-
Aceite Aromático	2.37	1.74	2.17
Aditivos y antioxidantes	2.05	2.38	-

Fuente: *Tomado de Quek (2013). Liquefaction of waste tyres by pyrolysis for Oil and chemicals. Kar (2011)**,** Environmental Protection Agency (EPA), (2017)* ***y*** *Chen (2002)**.***

Figura 4

Gránulos de NFU en distintos tamaños utilizados para el proceso de pirólisis

Fuente: *Recuperado de Anh Tuan Hoang (2020).*

En la Tabla 3 podemos observar las propiedades físicas y químicas del neumático**.**

Tabla 3

Composición elemental de los NFU

Composición química	Porcentaje [%]
Carbono	70 - 80
Hidrógeno	7.5
Azufre	1.2 - 1.9
Cloro	0.2 - 0.6
Hierro	15
Óxido de Zinc	2
Dióxido de Silicio	5
Cromo	97 ppm
Níquel	77 ppm
Plomo	60 - 760 ppm
Cadmio	5 - 10 ppm

Fuente*: Mejía et al., (2021) y Meza (2014).*

2.5.2 El caucho

El caucho o elastómeros es un material polimérico, se lo define como una sustancia natural o sintética, que tiene como características de elasticidad, impermeabilidad y resistencia eléctrica, Bustamante B *et al*., (1993). Esto se ve reflejado en la aplicación de la industria automotriz, de construcción y en productos de calzado, etc.

2.5.3 Tipos de caucho

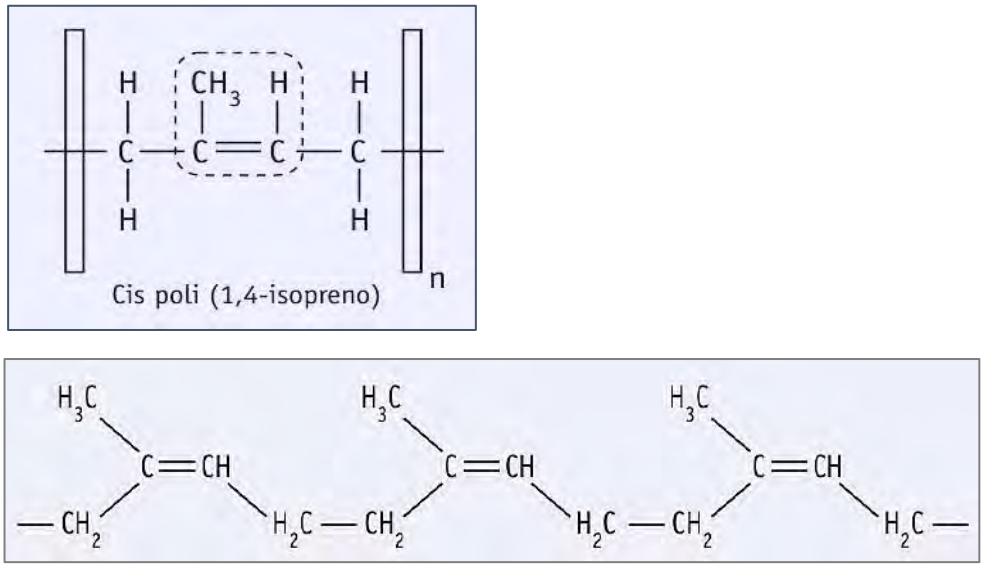
2.5.3.1 Caucho natural (isómero cis-1,4-poliisopreno)

Es un producto obtenido por medio de la coagulación del látex vegetal, éste se obtiene a partir de la especie *Hevea Brasiliensis.* Martínez Covaleda (2005) describe que el caucho natural es un hidrocarburo de naturaleza olefina, pues su estructura está formada por átomos de hidrógeno compuestos básicos de la química orgánica.

En la Figura 5 se observa una cadena larga de polímero natural

Figura 5

Unidad estructural repetitiva del caucho natural



***Fuente**: Serrano (2007).*

En la Tabla 4 se observa la clasificación de las propiedades físicas y químicas del caucho natural.

Tabla 4

Clasificación de las propiedades del caucho natural

Propiedades Físicas	Propiedades Químicas
A temperaturas bajas el caucho se vuelve rígido, y cuando se congela en estado de extensión adquiere estructura fibrosa.	La solubilidad del caucho bruto en sus disolventes más comunes no es muy elevada.
El caucho a temperaturas por encima de 100 ºC, se ablanda y sufre alteraciones permanentes.	Los disolventes más usados son el benceno, la nafta, cloroformo, tolueno, xileno, keroseno y éter. El caucho se hincha primero poco a poco hasta las consistencias de gel y después éste se dispersa formando una solución.
El caucho adquiere una deformación permanente debido a su naturaleza plástica.	
Su plasticidad es variable y puede modificarse dentro de ciertos límites por la acción de productos químicos.	La viscosidad de la solución del caucho bruto es grande.
La densidad del caucho a 0 ºC. es de 0.950 a 20 ºC. es de 0.934.	El caucho bruto calentado hasta 200 ºC. se ablanda y sus soluciones tienen menor viscosidad, pero el número de dobles enlaces se conserva sin alteración.
El caucho tiene el fenómeno de estiramiento permanente.	Cuando la temperatura se eleva hasta 250 ºC., los enlaces dobles se separan y tiene lugar la formación de anillos, y éste eleva la densidad y la solubilidad, el producto obtenido es una dura y frágil resina.
Cuando el caucho bruto ha sido estirado y deformado durante algún tiempo, no vuelve completamente a su estado original.	
El poder de absorción de agua del caucho purificado es muy bajo.	El caucho bruto aumenta de 10 a 40 veces su propio peso en disolventes,

***Fuente**: Cano Serrano et al., (2007).*

2.5.3.2 Caucho sintético

Es un copolímero, elaborado artificialmente mediante reacciones químicas, conocidas como condensación o polimerización, a partir de determinados hidrocarburos insaturados. Los cauchos sintéticos, técnicamente conocidos como elastómeros por sus propiedades elásticas y durabilidad, se preparan a partir de hidrocarburos insaturados provenientes del exceso de petróleo.

Se obtiene artificialmente por reacciones químicas que condensan o polimerizan hidrocarburos insaturados Reyes (2015). Los compuestos básicos del caucho sintético llamados monómeros, tienen una masa molecular relativamente baja y forman moléculas gigantes denominadas polímeros Castro G. (2008), como ejemplo tenemos los siguientes compuestos:

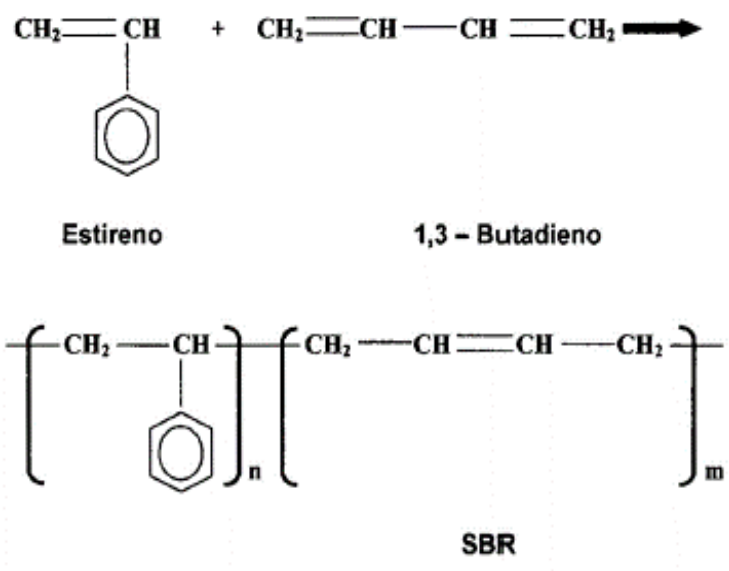
- **SBR (Estireno butadieno). -** El SBR es un elastómero sintético que está compuesto por 25 % de estireno el cual están dispersas al azar entre el 75 % de las unidades de butadieno en las cadenas moleculares.

  El caucho de estireno butadieno fue fabricado por primera vez en 1929 por el químico Walter Bock en el país de Alemania. La vulcanización es más lenta en el SBR que en el caucho natural y se requiere por lo tanto de aceleradores más poderosos. Alrededor 70 % del SBR es utilizado por la industria llantera, este tipo de caucho es el que más se emplea, así como el 60 % de la producción de caucho consumido ya sea natural o sintético Beliczky (2007).

En la Figura 6 se puede observar el SRB (polímero de estireno) y butadieno, el cual se trata de un elastómero polimerizado en emulsión y de naturaleza amorfa.

Figura 6

Caucho estireno butadieno-SBR



***Fuente**: Flores (2020), Adaptado de Friedenthal, Esteban tecnología del Caucho.*

- **Polibutadieno (BR)**, tiene una flexibilidad muy alta, es el único caucho sintético con una flexibilidad mayor incluso que al del hule natural, al mismo tiempo, la resistencia a la abrasión es sobresaliente y la flexibilidad a baja temperatura es excelente Bosques (2014). El BR tiene limitaciones como: Menor adhesividad, bajo tensión y resistencia al desgarre.

  Este material es excelente para la producción de llantas por su mínimo generación de calor y su resistencia a la abrasión.

- **Caucho isopreno** (2-Metil-1,3-butadieno), es un compuesto orgánico cuya fórmula molecular es C_5H_8. Representa la base estructural del caucho natural, con las que se sintetizan enzimáticamente los terpenos. El isopreno, se puede mezclarse con otros polímeros, como los cauchos de estireno-butadieno, para producir materiales de gran resistencia.

- **Butadieno.** Los primordiales usos de este producto es el caucho sintético (SBR, SBS), caucho de goma (elastómero), etc.; es un producto muy versátil para la producción de neumáticos y suelas para los zapatos, así como en la industria de automoción, adhesivos y sellantes, alteración de asfaltos, transformación de polímeros y compuestos para una infinidad de aplicaciones.

2.5.4 Valorización de neumáticos fuera de uso

La valorización energética es una posibilidad que actualmente se maneja para eliminar o reducir la cantidad de NFUs y al mismo tiempo limitar el consumo de combustibles fósiles para su producción. Serrano (2007).

En la Tabla 5, podemos observar las diferentes tecnologías que existen para la valorización energética a partir del NFU.

Tabla 5

Valorización material y energética de los neumáticos fuera de uso

Tecnología	Características	Ventajas	Desventajas
Recauchutado	Sustitución de la goma vieja del neumático y reconstrucción de la estructura original. Aplicable a neumáticos que mantengan intacta su estructura de acero.	Menos cantidad de crudo usada que neumático nuevo. Reduce costo de fabricación	Número limitado de reproceso. Características ligeramente disminuidas
Reciclaje	Reuso sin alteración de su forma y sus propiedades físicas: usos ornamentales, elementos de seguridad de circulación, arrecifes artificiales y rompeolas.	Sin tratamiento previo Coste nulo	Tiempo de vida limitado por exposición a condiciones ambientales
Tratamientos mecánicos	Trituración para reducción de tamaño	Reducción de volumen Facilita molienda u otros tratamientos.	Pocos avances en investigación de la técnica
Tecnologías de reducción de tamaño	Molienda a temperatura ambiente	Reducción de tamaño desde 500 mm hasta 500 μm.	Coste elevado de mantenimiento de maquinaria. Sensibilidad a agentes atmosféricos
	Molienda criogénica (mediante N_2) Molienda húmeda (chorro de agua)	Partículas de menor tamaño, superficie suave y menor oxidación superficial	Coste adicional por el precio del N_2 y la fase adicional de secado
		Más empleada	Lixiviado de ZnO

Continuación de la tabla 5.

Tecnologías de regeneración	Desvulcanización: Rotura selectiva de enlace químico S-S. Recuperación: recuperar el caucho vulcanizado por despolimerización.	Descomposición de los componentes del neumático. Reutilización del caucho de los NFU como materia prima.	Caucho de propiedades físicas inferiores al original. Se debe seleccionar materia prima y condiciones de proceso.
Combustión	Su combustión genera grandes cantidades de energía (poder calorífico 33 MJ/Kg) comparada con los combustibles tradicionales.	Generación de vapor y accionamiento de turbina o aprovechar el calor de gases de combustión.	Generación de sustancias tóxicas
Pirólisis	Calentamiento del granulado de NFU de 673 K-1073 K, en ausencia de oxígeno o con una cantidad limitada del mismo.	Descomposición de componentes en fracciones de alto valor económico y energético.	Características de productos altamente dependiente de condiciones de proceso

***Fuente**: Adaptado de Serrano (2007).*

2.6 Pirólisis

Uno de los mayores problemas que afronta el país es la gestión de residuos sólidos, éstos se convierten en un riesgo para la salud y el medioambiente. Los neumáticos fuera de uso (NFU) son residuos que están ocasionando diversos problemas ambientales de orden técnico, económico y de riesgo para la salud pública, durante estos últimos años los problemas han ido incrementado debido a la demanda del parque automotor.

Para una adecuada revalorización de los residuos de NFU, estos deben ser clasificados según sus características químicas y físicas, para luego ser una fuente de materia prima para otro proceso, sea de tipo mecánico, químico o termoquímico, con el objetivo de generar productos de mayor valor agregado, y que puedan ser aprovechadas energéticamente Serrano (2007).

El reporte de la investigación de Serrano (2007) sobre la revalorización de los NFU, indica que el mejor proceso para el tratamiento de este problema es el proceso de pirólisis, siendo este un proceso termoquímico y versátil, debido que puede trabajar con residuos orgánicos o residuos derivados del petróleo como son: Polímeros (plásticos), caucho sintético, etc. El proceso de pirólisis ha demostrado tener un gran rendimiento para la obtención de combustibles de gran capacidad calorífica y otros compuestos químicos de gran valor económico (solventes, gasolina, naftas, etc).

2.6.1 Proceso de pirólisis

El proceso de pirólisis, es el tratamiento termoquímico irreversible de sustancias químicas sólidas o fluidas complejas a temperaturas elevadas en una atmósfera inerte o libre de oxígeno (anaerobio), donde el rendimiento del proceso de pirólisis depende de la temperatura. Durante este proceso, las moléculas son sometidas a temperaturas altas, lo que genera vibraciones moleculares y donde las moléculas se estiran y sacuden hasta tal

punto que comienzan a descomponerse en moléculas más pequeñas Raghuram *et al.*, (2018).

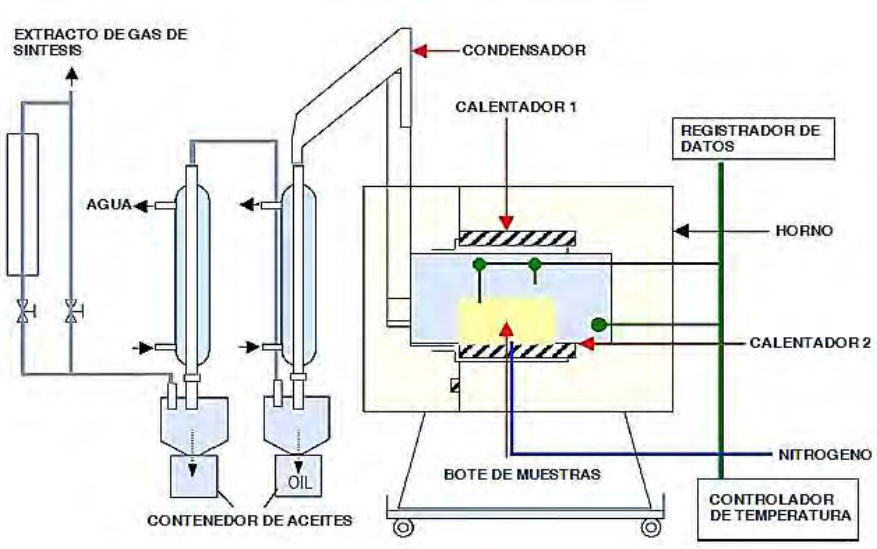
Semánticamente, termólisis es preferible a pirólisis porque piro, la palabra latina para fuego, implica la presencia de oxígeno y por lo tanto, de intermediarios reactivos y portadores de oxígeno. Pirólisis, también conocida como destilación térmica, es un tratamiento térmico químico que rompe los enlaces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

Los productos finales obtenidos del proceso de pirólisis son: Sólidos (char), gases no condensables y líquidos conocidos como aceite pirolítico (bioaceite o alquitrán). El tipo de producto y los rendimientos de los productos de pirólisis dependen en su mayor parte del tipo de material tratado (vegetales, plásticos o neumáticos fuera de uso). Sebastián y Urrego (2019).

En la Figura 7, se muestra el esquema del proceso de pirólisis de NFU de lecho fijo.

Figura 7

Unidad de pirólisis de NFU de lecho fijo



Fuente: *Dzuhairy Ab., y otros.(2020).*

Las reacciones de pirólisis ocurren típicamente a temperaturas de operación entre 300 y 800 °C. A medida que cambia la temperatura, la distribución del producto puede verse alterada, la temperatura de pirólisis más bajas suele producir más productos líquidos y char, mientras que las temperaturas más altas favorecen la producción de gases como resultado de reacciones de craqueo térmico más potentes Golshan *et al.*, (2009).

Éste tiene un efecto significativo sobre las propiedades de los productos de pirólisis, el poder calorífico del aceite u combustible pirolítica (TPO) aumenta especialmente con el incremento de la temperatura. Golshan *et al.*, (2009).

2.6.2 Tipos de pirólisis

El proceso de pirólisis, es la degradación térmica de los componentes orgánicos, esto se lleva a cabo a temperaturas altas en ausencia de oxígeno y este inicia a la temperatura de 300 °C. En el proceso de pirólisis las moléculas se descomponen en polímeros más grandes en otras más pequeñas mediante reacciones químicas de craqueo térmico, la termólisis y la despolimerización Nguyen, Anh Tuan *et al.*, (2020).

Prabir (2010) mencionó que el proceso de pirólisis ocurre diferentes reacciones químicas dependiendo de las condiciones de operación tales como: Gradiente de calentamiento, tiempo de retención, temperatura máxima alcanzada, el uso o no de catalizadores, velocidad de enfriamiento, temperatura del proceso, y el tipo de reactor a utilizar.

2.6.2.1 Pirólisis convencional (lenta)

Este tipo de pirólisis generalmente se usa junto con reactores de lecho fijo (FB) operados bajo un proceso semicontinuo donde los neumáticos de desecho (ST) se descompone a bajas temperaturas, para este tipo de pirólisis el tiempo de residencia es relativamente larga, tanto para la fase sólida como para la fase de vapor (puede llevar

horas), la gradiente de calentamiento utilizada tiene que estar en el rango de 5 - 30 °C/min Nguyen, Anh Tuan *et al*., (2020). Este proceso tiene una rapidez de calentamiento pausada, logrando una temperatura operación óptima de 500 a 600 ºC. En estas condiciones se obtienen tres productos en proporciones significativas: Líquido, sólido y gas Baray (2016). Avsenik (2016), mencionó que este tipo de pirólisis se le denomina también como carbonización; este proceso es lento y es óptimo para la producción de char.

2.6.2.2 Pirólisis rápida

Es el proceso por el cual el material se calienta rápidamente en ausencia de oxígeno y a temperaturas altas (650ºC). Se utiliza por primera vez para la producción de bioaceite, ya que el rendimiento en peso de esta fracción es muy superior al obtenido en la pirólisis convencional. La alta gradiente de calentamiento y el rápido enfriamiento dan como resultado la condensación de la fracción líquida sin reacciones de craqueo con compuestos moleculares grandes que se vuelven parte del gas no condensable. Baray 2016).

A diferencia del proceso de pirólisis lenta, el proceso de pirólisis rápida se conoce con una descomposición térmica a temperaturas más altas y una velocidad de calentamiento más rápida con el objetivo de lograr una descomposición rápida y un tiempo de residencia corto que tienen el beneficio para la formación de líquido. El proceso de pirólisis rápida de (ST), se reconoce como una solución altamente efectiva para convertir (ST) en combustible líquido con mayor valor calorífico (CV), y otros productos químicos valiosos (50 - 60 % en peso) Wang (2017).

2.6.2.3 Pirólisis catalítica

Contiene catalizador dentro del reactor con el objetivo de mejorar el rendimiento del producto gaseoso y afectar la composición o las propiedades de ciertos productos. En el proceso de pirólisis catalítica se emplea zeolitas para generar compuestos monoaromáticos

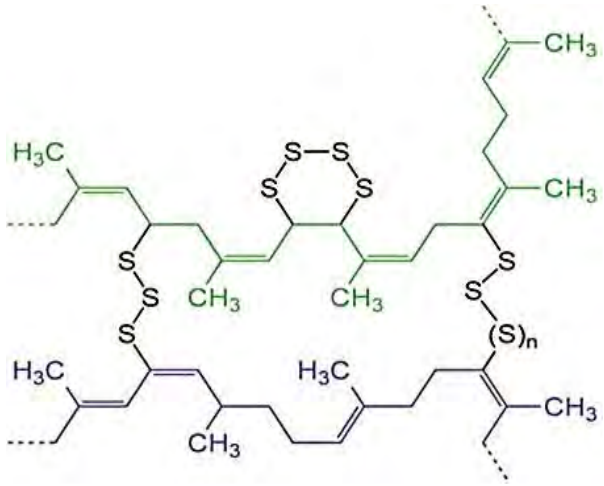
(xileno, benceno y tolueno), utilizando zeolitas HZSM-5 y HY en el rango de temperatura de 430 a 600 °C. Williams P (2002) y Martínez *et al.*, (2013). La adición de un catalizador en la pirólisis permite reducir la temperatura de descomposición y aumenta la selectividad de ciertos productos, mediante la elección correcta del catalizador se puede optimizar la distribución de productos obtenido como por ejemplo tener combustibles de mayor calidad Navarro Martínez (2007).

En la actualidad gran parte de estos catalizadores son también utilizados en el refinamiento de hidrocarburos en la industria del petróleo, uno de los catalizadores más utilizados son las zeolitas. Poblete (2013).

En la figura 8 se muestra las posiciones de craqueo de la molécula de caucho durante un proceso de descomposición térmica

Figura 8

Posiciones de craqueo de la molécula de caucho durante un proceso de descomposición térmica



Fuente: *Nguyen (2020)*

2.6.2.4 Pirólisis flash o pirólisis ultrarrápida

Cuando la temperatura del proceso es más elevada 1000 ºC y los tiempos de residencias son aún más cortos, la pirólisis se denomina ultrarrápida. En este caso, el

mayor rendimiento corresponde a los gases. Sin embargo, el proceso de pirólisis flash es una vía prometedora en lo que respecta a la producción de bioaceite.

La conversión de la biomasa en aceite crudo puede tener un rendimiento de hasta el 70 %. Los aceites pueden ser usados en turbinas y motores, aunque existen problemas en su uso debido a las propiedades fisicoquímicas intrínsecas de los aceites; una baja estabilidad térmica, corrosividad y bajo poder calorífico.

En los procesos de flash de pirólisis, las condiciones de operación se pueden variar, para favorecer la producción de gas (flash-gas) o de líquidos (flash-líquidos). En la Tabla 3 compara los rendimientos típicos de las fracciones obtenidas en los diferentes tipos de pirólisis Özbay N. (2008).

La pirólisis es un proceso flexible, que permite el uso de la tecnología adecuada, el cual favorece la producción de gases o aceites y biocarbones Özbay N. (2008).

2.6.2.5 Proceso de pirólisis al vacío

En este proceso de pirólisis el material orgánico se calienta en el vacío para reducir el punto de ebullición y evitar reacciones químicas adversas. La degradación térmica al vacío reside en un craqueo vertiginoso de las complicadas distribuciones poliméricas de materia prima en lignocelulósicos lo cual origina altos niveles en rendimientos de combustible primarios. Lo inverso a las tecnologías de pirólisis rápida, en el proceso de pirólisis al vacío el calentamiento es pausado de 2 a 4 °C/min, con una temperatura de 520 a 540 °C a una presión de 5 a 15 kPa. Martínez *et al.*, (2013).

La pirólisis al vacío 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 y tipo redox. Si se produce el enfriamiento rápido de los productos en fase de vapor, el

rendimiento de líquidos orgánicos como los aceites de pirólisis aumenta a expensas de los residuos sólidos y los gases Pretell *et al.*, (2021).

2.6.2.6 Proceso de Hidropirólisis

Este es un proceso de desintegración térmica que sucede cuando, los combinados del material orgánico de alta complejidad química y de mayor peso molecular son llevados a temperaturas altas en presencia de agua y en un sistema cerrado. El proceso de hidropirólisis es la degradación térmica de la materia orgánica en ausencia parcial del oxígeno, y este comprende una serie de reacciones químicas y procesos físicos que se produce a presiones de hasta 17.01 atm y una temperatura de 250-550 °C.

Tabla 6

Tipos de proceso de pirólisis

Proceso	Tiempo de residencia	Velocidad de calentamiento	Temperatura [°C]	Productos	Poder calórico [MJ/kg]
Carbonización	días	muy lenta	400	Biochar	30
Convencional	60-240 min	5-30 °C/min	400-600	Char, aceite pirolítico y gas	30
Rápida	0.5-5 s	30 °C/min	< 650	Char, aceite pirolítico y gas	20
Flash (líquidos)	< 1 s	rápida	<650	Aceite pirolítico y gas	20
Flash (gas)	< 1 s	rápida	<650	Gas y aceite pirolítico	30
Ultrarrápida	<0.5 s	muy rápida	1000	Gas y solventes	30
Vacío	2-30 s	rápida	400	Bioaceites	30
Hidropirólisis	< 10 s	rápida	<550	Aceite pirolítico y gas	30
Metano-Pirólisis	< 10 s	rápida	<700	Aceite pirolítico y gas	30

Fuente: *Mckendry (2002) y Prabir (2010).*

2.6.3 Tipos de reactores para el proceso de pirólisis

Raghuram, Hemanth *et al.*, (2018) describen los tipos de reactores más comunes y utilizados para los procesos de pirólisis de neumáticos.

2.6.3.1 Reactor de lecho fijo (FB)

En los reactores de lecho fijo (FB), el catalizador se mezcla con el material reactivo o se coloca sobre el reactivo en forma de lecho. En este tipo de reactores, el lecho del catalizador no tiene ningún movimiento. Existen varias configuraciones en las que se pueden colocar los catalizadores dentro del reactor dependiendo de las condiciones a mantener. Este reactor es el más simple de todos los tipos de reactores en construcción, y es el reactor más utilizado en las industrias para la producción de diversos productos químicos. Campos y Arrazola (2017).

2.6.3.2 Reactor de lecho fluidizado (FLB)

Los reactores de lecho fluidizado también se incluyen en los reactores catalíticos heterogéneos. En este reactor el catalizador se fluidiza, es decir, se hace pasar un gas presurizado a través del lecho del catalizador, que hace que el catalizador quede suspendido y que se comporte como un fluido. Esto permite una mezcla extensa en todas las direcciones, lo que da como resultado una excelente estabilidad de la temperatura, una mayor transferencia de masa y velocidades de reacción. Estos reactores son capaces de operar en grandes cantidades de alimentación y catalizador. Este reactor se utiliza comúnmente en procesos de craqueo catalítico, sus principales desventajas son los altos costos de construcción y mantenimiento Campos y Arrazola (2017).

2.6.3.3 Reactor de tanque agitado contínuo (CSTR)

Existe un flujo Contínuo dentro del reactor y de los productos. Tiene una capacidad de 50 ml a 100 ml. En el reactor está presente un agitador que es controlado

hidráulicamente o controlado por un motor. Este agitador mezcla continuamente el contenido, manteniendo así una condición homogénea en todo momento. Se utilizan a menudo en las plantas de tratamiento de agua. Campos y Arrazola (2017).

2.6.3.4 Reactor de horno rotatorio (RK)

El reactor de horno rotatorio consiste en un cilindro ligeramente inclinado con respecto al plano horizontal, se alimenta desde el extremo superior del cilindro, mientras se procesa, llega al extremo inferior del cilindro y se mezcla. Por lo general, se emplea una llama o un horno de calentamiento externo para la reacción de pirólisis.

2.6.3.5 Reactor de lecho con pico cónico

El reactor de lecho cónico con pico ayuda en el proceso de pirólisis rápida, y es un reemplazo apto para el reactor de lecho fluidizado. El movimiento cíclico de las partículas asegura que haya mayores tasas de transferencia de calor y masa entre las fases.

La ventaja que tiene el reactor de lecho cónico sobre el lecho fluidizado, es que el tamaño de las partículas puede variar mucho, y puede ser de dimensiones más grandes. Opera partículas con textura irregular y de aglomeración, tiene características únicas para transferir calor a la materia prima, los productos del proceso de pirólisis dependen del diseño del reactor. Campos y Arrazola (2017).

En la Tabla 7 se muestra las dimensiones de diferentes rectores de pirólisis utilizados en prueba de laboratorio

En la Tabla 8 se observa las tecnologías de valorización.

Tabla 7

Dimensiones de reactores de lecho fijo en pruebas experimentales de pirólisis

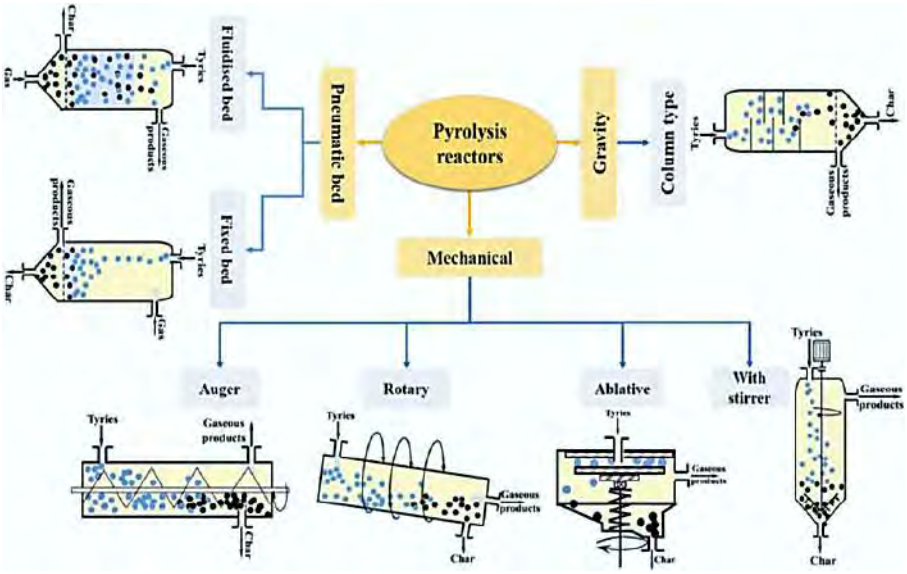
N°	Masa de NFU [kg]	Diámetro [cm]	Altura [cm]	Gradiente de calentamiento [°C/min]	Tiempo reacción [min]	Referencia
1	20.00	100.0	50	18	30	Mohammad Abdul et al., (2018)
2	0.75	10.0	30	10	50	M. Rofiquil et al., (2008)
3	1.50	10.0	20	10	40	Chun, Rongcheng et al., (2020)
4	0.13	5.0	18	15	60	Golshan , Fatola et al., (2009)
5	0.30	7.0	38	15	60	Dzuhairy Ab., y otros. (2020)
6	0.065	2.5	30	5	30	Fernandez-Colino, y otros. (2008)

Nota: *En la Tabla 7 se observa que los reactores trabajan en un rango de temperatura de 500-600°C, a una presión atmosférica, con un flujo de nitrógeno para mantener una atmósfera inerte.*

En la Figura 9, se observa los modelos de reactores de pirólisis que proporciona un mayor rendimiento de líquidos con un rango de 44.5 – 55.0 % en comparación a los otros.

Figura 9

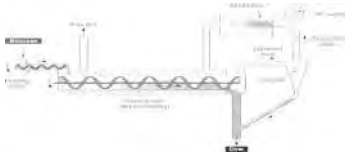
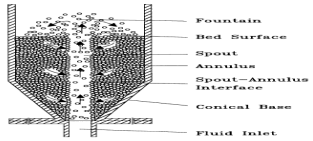
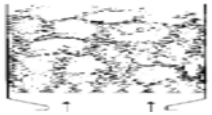
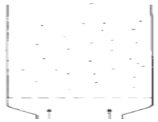
Modelos de reactores de pirólisis



Fuente: *Anh Tuan Hoang (2020)*

Tabla 8

Tecnologías de valorización de pirólisis

Tipo de reactor	Modo de calentamiento	Ventaja	Gráfico
Ablativo	95% conducción 4 % convección 1 % radiación	Acepta materiales de gran tamaño; abrasión mecánica muy alta de los carbones procedentes de la biomasa; diseño compacto; problema de suministro de calor; gas de transferencia de calor no requerido; el gas de transporte de partículas no siempre es necesario.	Reactor Ablativo 
Lecho fluidizado movible	80% conducción 19%convección, 1% radiación	Reactor de lecho fluidizado cuenta con mayor contacto entre el catalizador y la materia prima. Su temperatura constante y de transferencia de calor, utilizado procesos continuos Campos, Arrazola (2017). El lecho fluidizado actúa como un agente de transferencia de calor, dispersando el plástico fundido en capas delgadas".	Reactor de lecho en surtidor 
Lecho fluidizado	90% conducción 9% convección, 1% radiación	Grandes parámetros transferencia de calor; abastecimiento de calor al gas, al lecho; abrasión restringida del carbón; optima mezcla de sólidos; tamaño de partícula 2 mm en la dimensión más pequeña; configuración simple del reactor."	Fluidización turbulenta (gas) 
Transporte de flujo	4% conducción, 95% convección 1% radiación	Caudal para la entrada, bajas tasas de transferencia de calor; límite de tamaño de partícula 2 mm; gas limitad, mezcla sólida.	Lecho fluidizado de neumático  Líquido o gás a alta velocidad

Fuente: Bridgwanter (1999).

2.6.4 Productos del proceso de pirólisis

De los diferentes tipos de pirólisis se obtiene 3 productos entre líquidos, sólidos y gases, 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_2, CO_2, 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).

Su gama de productos y su estado físico lo clasifica en tres tipos principales:

- Fase sólida- residuo sólido (carbonilla, negro de humo o char).
- Fase líquida- combustible líquido (alquitrán e hidrocarburos).
- Fase gaseosa- gas (gases condensables y no condensables).

Fonseca (2010), mencionó que los productos de pirólisis tienen un alto poder calorífico de 30 a 40 MJ/kg, esto los hace económicamente comercial.

- **Líquidos pirolíticos (fuel oíl)** La fase líquida es el producto más importante del proceso de pirólisis de neumáticos descritos por Rodriguez *et al.*, (2001), presenta una caracterización detallada de todos los líquidos de pirólisis obtenidos a una temperatura de 300, 400, 500, 600 y 700 °C a su vez, informa que los líquidos derivados de los neumáticos son una mezcla compleja de compuestos orgánicos C_6-C_{24}, y que contienen una gran cantidad de compuestos aromáticos (53.40 - 74.80 %), compuestos nitrogenados (2.47-3.50 %) y compuestos oxigenados (2.29-

4.85 %)” como son:

- Alcanos: Decano, undecano, dodecano, tridecano, octadecano y eicosano.
- Alquenos: Propileno, butadieno, 1-penteno, 1,4-pentadieno y octeno.
- Aromáticos: Benceno, tolueno, etilbenceno, xileno, estireno, naftaleno, fenantreno y antraceno. Sánchez (2017).

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).

- **El gas**. El agente principal es el butadieno, etileno y metano. Otros gases generados son alcanos y alquenos C_2-C_5, así como el monóxido, dióxido de carbono y sulfuro de hidrógeno Arya *et al.*, (2020).

  El gas que queda después de la recuperación del líquido, llamado gas pirolítico o gas de síntesis, generalmente se compone de parafinas y compuestos de olefinas con números de carbono de uno a cinco. Los 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) y 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). En esta fase se utiliza 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 hidrógeno, a través de las cuales generará electricidad con eficiencia de muy alta energía en el medio Bonilla (2019).

- **El char.** Su uso es como negro de humo de baja calidad, y como combustible sólido, puede ser mejorado a carbón activado o puede utilizarse como fuente de energía para el reactor pirolizador Abbas *et al.*, (2016). La mayor cantidad de azufre se conserva en el carbón (Char), y en otros casos están en la fracción de nafta ligera. Los componentes nitrogenados, tenemos lo siguiente: Aminas alifáticas, nitrilos, piridina, derivados de alquilo, anilina, quinonas benzotiazoles.

  La pirólisis ofrece la posibilidad de convertir los neumáticos usados en un sólido rico en carbono (char) o CB pirolítica. La composición del carbón depende de las condiciones de pirólisis y la composición del neumático, su calidad y rendimiento influyen en gran medida en la viabilidad económica de pirólisis además de la fracción líquida. El CB pirolítico representa aproximadamente un 35–40 % en peso (carbono 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).

En la Figura 10 se observa el producto líquido (aceite pirolítico) y sólido (biochar) del proceso de pirólisis.

Figura 10

Productos obtenidos del proceso de pirólisis de NFU

Fuente: *Anh Tuan Hoang (2020).*

2.6.5 Aplicación industrial del proceso de pirólisis

Los procesos de pirólisis incluyen diferentes métodos para el tratamiento de NFU como son: La pirólisis catalítica, no catalítica, pirólisis hidratado, pirólisis al vacío, pirólisis lento, torrefacción, pirólisis rápida, pirólisis en lecho fluidizado, pirólisis flash, pirólisis inducida por microondas, pirólisis por plasma, pirólisis en tubo vacío, pirólisis en línea y pirólisis por pulverización ultrasónica (USP).

López F *et al*., (2015) comentaron que en otros procesos de pirólisis incluyen la descomposición térmica, la destilación seca y destructiva, la carbonización, para el reciclaje de los neumáticos fuera de uso. El proceso de pirólisis es considerado uno de los métodos más factibles para valorizar NFU con provecho económico a gran escala; los productos obtenidos son de fácil manipulación, almacenamiento y transporte.

2.6.6 Proceso de pirólisis de neumáticos fuera de uso (NFU)

De acuerdo a Fernandez-Colino *et al.,* (2008) el proceso de pirólisis ocurre dentro de un reactor de acero inoxidable, esto con la finalidad de mejorar el rendimiento de la reacción, este proceso ocurre en un rango de temperatura de operación de 400 a 800 ºC en ausencia de oxígeno, donde las partículas de los NFU son alimentadas con un rango de

tamaño que va entre los 0.5 a 2.0 mm y un flujo de gas inerte (N_2) para el retiro de los gases formados durante el proceso de pirólisis.

Según la investigación de Golshan *et al.*, (2009), explicaron que la degradación térmica del material produce una descomposición de los elementos orgánicos volátiles, principalmente las cadenas de los compuestos orgánicos presentes en el caucho se descomponen en gases, líquidos y elementos inorgánicos, como es el negro de carbono (no volátil), que permanece como residuo sólido dentro del reactor.

Laresgoiti *et al.*, (2004) señala que los gases pirolíticos obtenidos durante el proceso están compuestos por metano, butenos y butano juntos con otros hidrocarburos ligeros, que están en proporciones bajas como el CO, CO_2 y H_2S. Los gases pirolíticos tienen un gran poder calorífico de 80 MJ/m^3 aproximadamente. Los sólidos pirolíticos se descomponen fácilmente en polvo de carbono, cordones de acero y filamentos etc.

Este proceso de pirólisis puede estar representado en la siguiente reacción genérica (1), en cual los subíndices simbolizan el número de átomos de cada elemento que constituye la cantidad la materia prima disponible como los productos obtenidos".

Reacción genérica de pirólisis

$$C_n\,H_m O_p(Materia\ Orgánica) \rightarrow \sum_{Liquido} C_x\,H_y O_z + \sum_{Gas} C_a\,H_b c + H_2O + C(ceniza) \qquad \text{Rx. (1)}$$

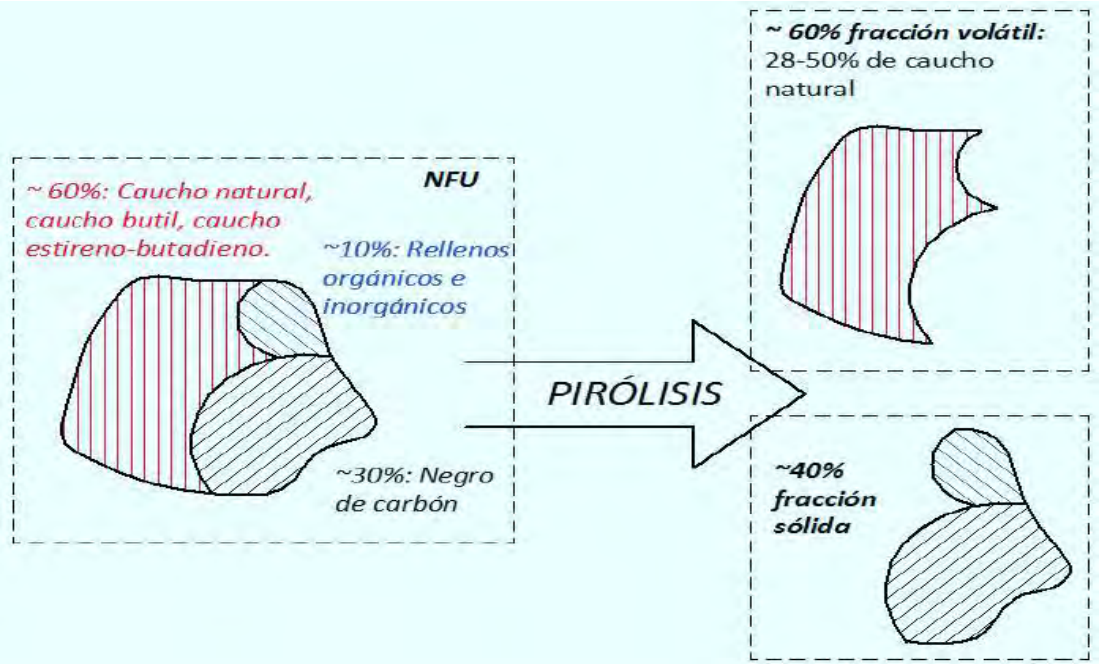
Por estas razones, el proceso de pirólisis de NFU permite obtener compuestos versátiles y de alto valor energético, y con menores impactos ambientales.

En la actualidad el proceso de degradación térmica de NFU, para que este proceso de operación refleje beneficioso es ineludible estimar tanto las líneas de corriente de gas como las líneas de combustible recuperables; el mejor beneficio está en el negro de humo de pirólisis.

En la Figura 11, podemos observar que el potencial energético tanto de la fracción líquida como gaseosa se debe a que ambas fracciones están formadas por compuestos producidos en la descomposición del caucho sintético y caucho natural (biomasa), entre un 40-50 wt. %. Por otro lado, la fracción sólida se compone de negro de carbono usado en la manufactura del neumático de 20 – 40 % e inorgánicos.

Figura 11

Representación del proceso de pirólisis de neumáticos fuera de uso



Fuente: *Tomado de Laresgoiti, y otros (2004).*

2.6.7 Cinética del proceso de pirólisis para neumáticos fuera de uso

El estudio de la cinética del proceso de pirólisis o descomposición térmica del NFU es muy complejo, debido a la cantidad de compuestos intermedios que se forman durante el proceso, para una mejor explicación del proceso de cinética se abordó dos métodos: Una cinética basada en modelos matemáticos como explica Golshan *et al.*, (2009), en su investigación y una cinética sin modelos basado en experiencias realizadas en laboratorio por Menares, Romero *et al.*, (2019).

2.6.8 Modelo cinético basado en experiencias

En las experiencias realizados por Menares, Romero *et al.,* (2019), se tomaron ciclos de tiempo de residencia de 20 - 25 min y una gradiente de calentamiento de 20 °C/min, con un rango de temperatura de 400 a 800 °C. Se realizó el análisis termogravimétrico (TGA) de las muestras obtenidas en las experiencias, a un calentamiento continuo de 5 °C/min, 10 °C/min, 20 °C/min y 30 °C/min y se empleó N_2 como gas portador de flujo de 50 ml/min.

Este modelo explica la formación de compuestos líquidos como: Limoneno, benceno, tolueno y xileno que son muy valiosos industrialmente, además, se obtuvieron gas de síntesis y carbón. Se observó que los diferentes polímeros (caucho natural, caucho de butadieno y caucho de estireno-butadieno) que conforman la estructura de los NFU, se descomponen por una serie de reacciones de condensación, polimerización, despropagación, hidrogenación y aromatización.

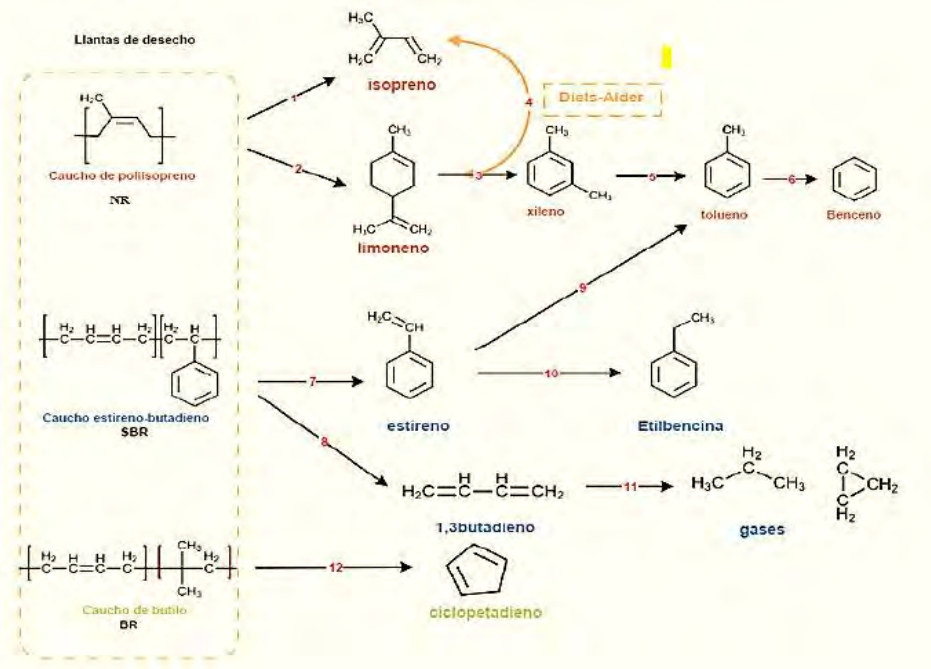
Menares, Romero *et al.,* (2019) reportaron que el rendimiento y la composición de los tres productos obtenidos en el proceso de pirólisis depende en gran medida de la temperatura del proceso que controla la cinética de reacción, el tamaño de las partículas y el mecanismo de transferencia de calor (diseño del reactor).

El mecanismo presentado en la Figura 12 cumple con las observaciones experimentales; sin embargo, es difícil afirmar que esta es una regla general, ya que las rutas de reacción para el proceso de pirólisis de los NFU son muy sensibles a la composición del material, el tamaño de las partículas, el régimen térmico (transferencia de calor o control cinético), por tanto, al sistema experimental.

En la Figura 12 se muestra la selectividad que tienen algunos compuestos frente al efecto de la temperatura de operación durante el proceso de pirólisis.

Figura 12

Mapa de reacción del proceso de pirólisis en los NFU

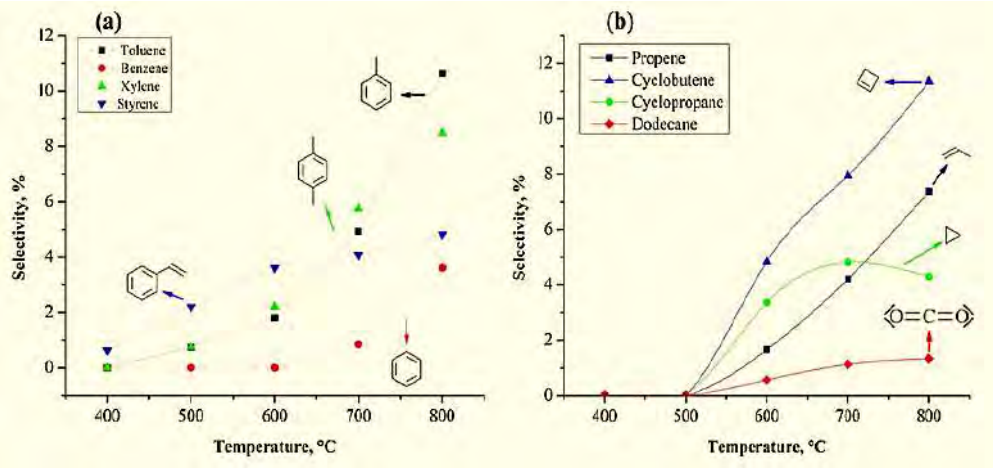


Nota. *El mapa de reacciones se realizó mediante las observaciones en un Análisis Termogravimétrico (TGA-P) para un rango de temperatura de 400- 800 °C. Este esquema incluye la reacción retro Diels-Alder como un paso de equilibrio que conduce a la formación de limoneno-isopreno. Fuente* Menares, Romero et al., *(2019).*

En la Figura 13, se puede observar el efecto de la temperatura. En (a) compuestos aromáticos, (b) producción de gas durante el proceso de pirólisis de los NFU; este análisis se realizó mediante un análisis termogravimétrico.

Figura 13

Efecto de la temperatura de pirólisis en los diferentes compuestos



Fuente: *Menares y Romero et al., (2019)*

2.6.9 Desarrollo del perfil de temperatura del proceso de pirólisis de NFU

Para mantener el control adecuado del proceso de pirólisis durante cada experiencia se inició con el desarrollo del perfil de temperatura de proceso (temperatura vs tiempo), a partir de las siguientes ecuaciones:

$$t_1 = \frac{T_i - T_a}{\nabla C} \qquad \text{Ec. (1)}$$

La ecuación 1, nos permite determinar el tiempo que demora el sistema en alcanzar el set point; para la equivalencia de los datos experimentales se utilizó la ecuación 2.

$$y = mx + b \qquad \text{Ec. (2)}$$

Donde:

$y=T_i$; $m=\nabla C$; $x=t$; $T_a=b$

Para el cálculo del rendimiento de los productos provenientes de pirólisis se utiliza la ecuación 3:

$$R = \frac{w_i}{w_0}\ x\ 100\ \% \qquad \text{Ec. (3)}$$

Donde:

t :Tiempo de calentamiento (min)

y, Ti: Temperatura de operación (500 o 600 °C)

b, T_a: Temperatura ambiente (°C)

m, ∇C: Gradiente de calentamiento (°C/min)

R: Rendimiento (%)

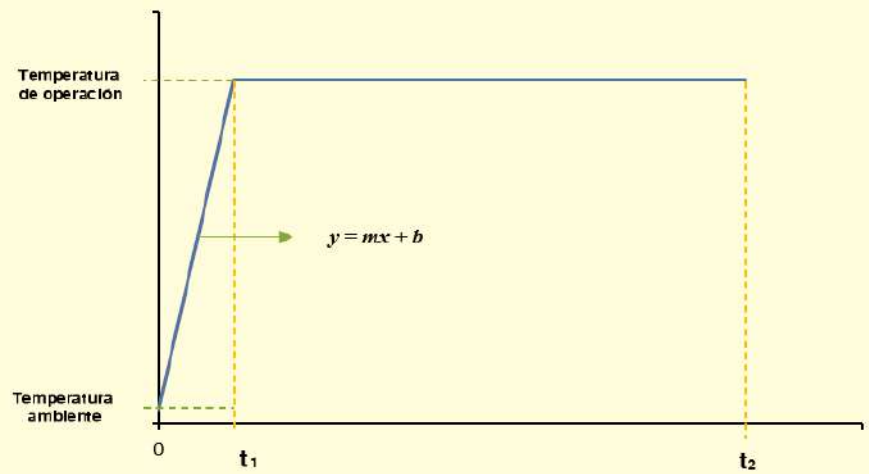
w_i: Masa del producto (g)

w_0: Masa de NFU (g)

En la Figura 14 se muestra el perfil de temperatura del proceso de pirólisis de NFU, esto con la finalidad de tener un mayor control de gradiente calentamiento. Menares y Romero et al., (2019).

Figura 14

Perfil de temperatura del proceso de pirólisis de NFU



La Ecuación 2, es válida para el rango de temperatura de operación de 500 °C a 600°C, y una gradiente de calentamiento de 15 a 25 °C/min, cuando la temperatura alcance el set point, este se mantiene constante hasta el término del proceso de pirólisis.

2.6.10 Destilación al vacío de combustibles líquido procedente de pirólisis de NFU

Para la lectura de las fracciones del destilado y resíduo (alquitrán) en el proceso de destilación al vacío ASTM D1160, los valores de la temperatura experimental se deben convertir a su equivalente atmosférico a través de la Ecuación 4, que está descrita en la norma ASTM D1160 según Batistella, y otros, (2015).

$$A = \frac{(5.9991972 - (0.9774472 * \log P))}{(2663.126 - (95.76 * \log P))} \qquad \text{Ec. (4)}$$

$$AET = \frac{748.1 * A}{\frac{1}{T} + 0.3861 * A - 0.00051606} - 273.1 \qquad \text{Ec. (5)}$$

Donde:

A: Correlación de presión

AET: Temperatura atmosférica equivalente (°C)

T: Temperatura experimental (K)

P: Presión experimental del sistema (mmHg)

En la caracterización del producto líquido de pirólisis de NFU, se determina el grado °API (American Petroleum Institute) de las muestras, para determinar si, el destilado es un combustible liviano o pesado; lo cual se realiza una comparación con el crudo de petróleo pesado.

Para determinar los °API, se utiliza la Ecuación 6.

$$°API = \frac{141.5}{GE} - 131.5 \qquad \text{Ec. (6)}$$

Para determinar la GE se utiliza la Ecuación 7, este se calcula a temperatura de 15.6 °C.

$$GE = \frac{\rho_L}{\rho_{agua}} \qquad \text{Ec. (7)}$$

Donde:

G.E: Gravedad específica del fluido a 15.6 °C

°API: Grados API

ρ_L: Densidad del líquido de pirólisis (g/cm^3) a 15.6 °C

ρ_{agua}: Densidad del agua (g/cm^3) a 15.6 °C.

CAPÍTULO III

MATERIALES Y MÉTODOS

El trabajo de investigación se realizó en la Facultad de Ingeniería de Procesos, en las instalaciones del laboratorio de Control de la Contaminación Ambiental y de Hidrocarburos, ubicados en el campus de la Universidad Nacional de San Antonio Abad del Cusco. La presente investigación se desarrolla en cuatro etapas:

- En la recolección de información sobre el proceso de pirólisis de NFU
- El diseño y montaje del reactor de pirólisis de lecho fijo
- Preparación de la muestra de NFU
- Experimentación, recolección de datos y análisis de resultados

Dentro del análisis de resultados, se realizará la caracterización fisicoquímica de los combustibles obtenidos en el proceso de pirólisis mediante la destilación al vacío ASTM D1160 y para el producto sólido (char), se realizará el análisis en el equipo XRF Vanta.

3.1 Diseño experimental

La presente investigación es del tipo explicativo, descriptivo, debido a que se centra en el análisis, de investigación e interpretación del proceso de pirólisis en el reactor de lecho fijo aplicado a los neumáticos. Arias Gonzales (2020) menciona que la investigación de tipo descriptivo, explicativo, que busca determinar el comportamiento, características y propiedades en determinadas variables, el enfoque que se presenta es de tipo cuantitativo donde se utiliza la recolección y análisis de datos para objetar preguntas de investigación.

El diseño experimental propuesto es de tipo factorial 2^3, donde las variables del proceso son: Gradiente de calentamiento, temperatura de operación y el tamaño de

partícula (granulometría), estas afectan las propiedades físicas y químicas de los combustibles obtenidos. En consecuencia, las variables del proceso son las siguientes.

- **Variables independientes:** Gradiente de calentamiento, temperatura y tamaño de partícula (granulometría).
- **Variables dependientes:** Rendimiento de los productos obtenidos en fase líquido, sólido y gaseoso (x_i, y_i, z_i).

En la Tabla 9 se observa los grados de libertad para el diseño experimental.

Tabla 9

Diseño experimental

Efecto	Grados libertad
Tamaño de partícula (A)	A-1 = 1
Temperatura (B)	B-1 = 1
Interacción AB	(A-1) (B-1) = 1
Gradiente de calentamiento (C)	C-1 = 1
Interacción AC	(A-1) (C-1) = 1
Interacción BC	(B-1) (C-1) = 1
Interacción ABC	(A-1) (B-1) (C-1) = 1
Error	(ABC)(n-1) = 16
Total	(ABC)(n)-1= 23

Parámetros: Tiempo de pirólisis (150 min), masa de NFU (200 g), presión (1.36 atm)

Para el diseño experimental descrito por Cáceres Huambo (2009), se tomó en cuenta la elaboración de la matriz de diseño y el estudio del efecto de cada variable sobre el proceso.

En la Tabla 10 se muestra los rangos de operación de cada variable, para cada caso se tiene:

- Gradiente de calentamiento (°C/min): Para un rango (-1; +1), (15-25)
- Temperatura de operación (°C): Para un rango (-1; +1), (500-600)
- Tamaño de partícula (granulometría) (mm): Para un rango (-1; +1), (0.5-1.0)

  Para la experimentación se tomó en cuenta los datos óptimos de la investigación realizada por Dzuhairy Ab., y otros, (2020), para fines comparativos, los valores de las variables son: Gradiente de calentamiento de 15 (°C/min), temperatura de operación 600 °C y tamaño de partícula (granulometría) de 0.5 mm, un tiempo de residencia de 150 minutos y un flujo de N_2 de 5 (l/min).

El diseño experimental consta de 2 niveles de cada variable independiente (A, B y C), siendo el número de variables independientes tres y el número de pruebas que comprende el diseño experimental es de 8, este se da por el diseño factorial 2^k para k=3, se propone 3 repeticiones para corroborar los resultados obtenidos.

Tabla 10

Diseño experimental del proceso de pirólisis

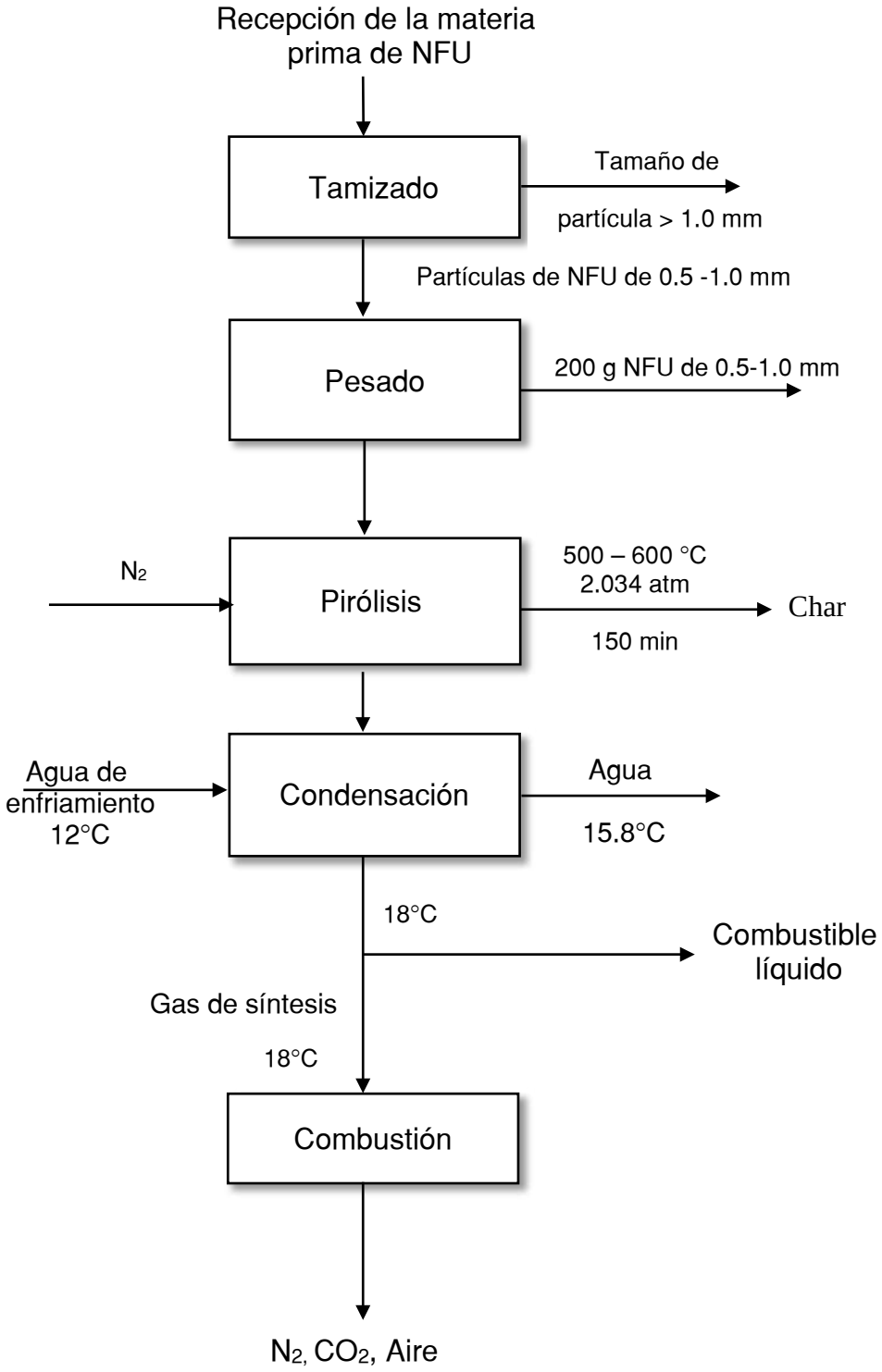
N° Experiencia	Variables independientes			Variable dependiente
	Tamaño de partícula (A)	Temperatura (B)	Gradiente de calentamiento (C)	Rendimiento (R)
1	0.5	500	15	-
2	1.0	500	15	-
3	0.5	600	15	-
4	1.0	600	15	-
5	0.5	500	25	-
6	1.0	500	25	-
7	0.5	600	25	-
8	1.0	600	25	-

Nota: *Para fines de comparación con la bibliografía se toma un punto de referencia (PC) que toma los valores de: A= 0.5 mm; B=600 °C; C=15 °C/min.* ***Fuente****: Dzuhairy Ab., y otros. (2020).*

En la Figura 15 presenta el diagrama de bloques para el proceso de pirólisis en el reactor de lecho fijo, donde se indica las condiciones para su operación.

Figura 15

Diagrama de bloques del proceso de pirólisis de NFU



3.2 Materiales, equipos e insumo

- **Materiales**
    - Embudo de laboratorio de 50 mm y 100 mm
    - Tubos de ensayo 16x150 mm con tapa
    - Probeta de 25 ml, 50 ml y 100 ml
    - Pipeta graduada de 10 ml
    - Vasos precipitados de 50 ml y 100 ml
    - Mallas Tyler N° 14, 18 y 40
- **Equipos**
    - **Prototipo de reactor de pirólisis de Lecho Fijo:** Construido en acero inoxidable tipo 316, con tapas tipo bridas removible que tiene un tubo de salida para la extracción de los productos del proceso de pirólisis y pozos de temperatura.
    - **Balanza digital OHAUS (ES-500HA)** de 500 g con una precisión de 0.001g
    - **Termocupla tipo K:** con rangos de trabajo de 0 a 1000 °C.
    - **Reguladores de presión**, dos manómetros (0 a 13.61 atm) o (0 a 200 Psi)
    - **Sistema de regulador de amperaje** (dimmer), controlador de voltaje de 220 voltios, para una resistencia eléctrica de 4000 Watts, con fusible.
    - **Sistema de atmósfera inerte:** Balón nitrógeno gaseoso, con regulador de baja presión de grado industrial.
    - **Tablero de control eléctrico** (on/off), WATTCO INC
    - **Controlador de temperatura**, termómetro digital PCE-T 800 de entrada múltiple.
    - **Sistema de enfriamiento:** Intercambiador de calor de tubo concéntrico en

flujo contracorriente de área 797.96 cm^2.

- **Sistema de quema de gases incondensables**: Mechero bunsen.
- **Centrífuga de laboratorio MPW MED** Instruments-Universal.
- **Prueba de punto de inflamación**: Copa cerrada Pensky-Martens PMA-4, modelo Petrotest ASTM D93
- **Stabinger Viscometer SVM 3000**- ANTON PAAR
- **Aparato de destilación al vacío ASTM D1160,** B/R Instruments, modelo semiautomático- Manualmente Operado
- **Analizador de humedad** PMB 53 AE-ADAM
- **Refractómetro portátil-**Modelo Mettler Toledo 30PX
- **Analizador XRF,** Olympus modelo Vanta VMR-CX-G2-U-OTHER

➢ **Insumos**

- 10 kg de muestra de NFU de (0.5 y 1.0 mm)
- Nitrógeno (N_2)

3.2.1 Características del prototipo del reactor de pirólisis de lecho fijo

- La geometría del reactor de pirólisis consta de un tubo cilíndrico vertical ensamblado de acero inoxidable con tapas tipo bridas y pozos de temperatura; la dimensión del reactor tiene 40 cm de altura, por 5.08 cm de diámetro interno, con dos sensores de temperatura tipo k como se muestra en la Figura 17 y consta de una de tubería de entrada de diámetro 0.635 cm para el paso de nitrógeno y una tubería de salida de 0.635 cm para el gas de síntesis.
- El reactor de pirólisis de lecho fijo tiene una capacidad de carga máxima de 300 g de NFU y opera en el rango de temperatura de operación de 400 a

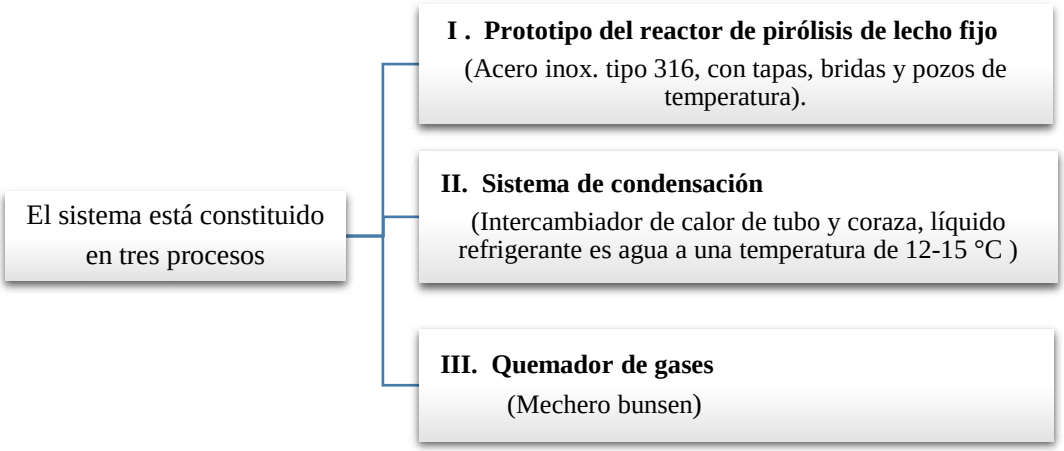
800°C.

- Para la generación de calor en el reactor de pirólisis de lecho fijo, se utiliza ocho resistencias eléctricas variables de 2000 watt. Recubierta por un aislante térmico de fibra de vidrio.

En el Apéndice 6 se muestra el esquema del sistema de pirólisis de NFU.

Figura 16

Características del sistema de pirólisis de NFU



En la Figura 17 se muestra el reactor de pirólisis de lecho fijo con sus accesorios

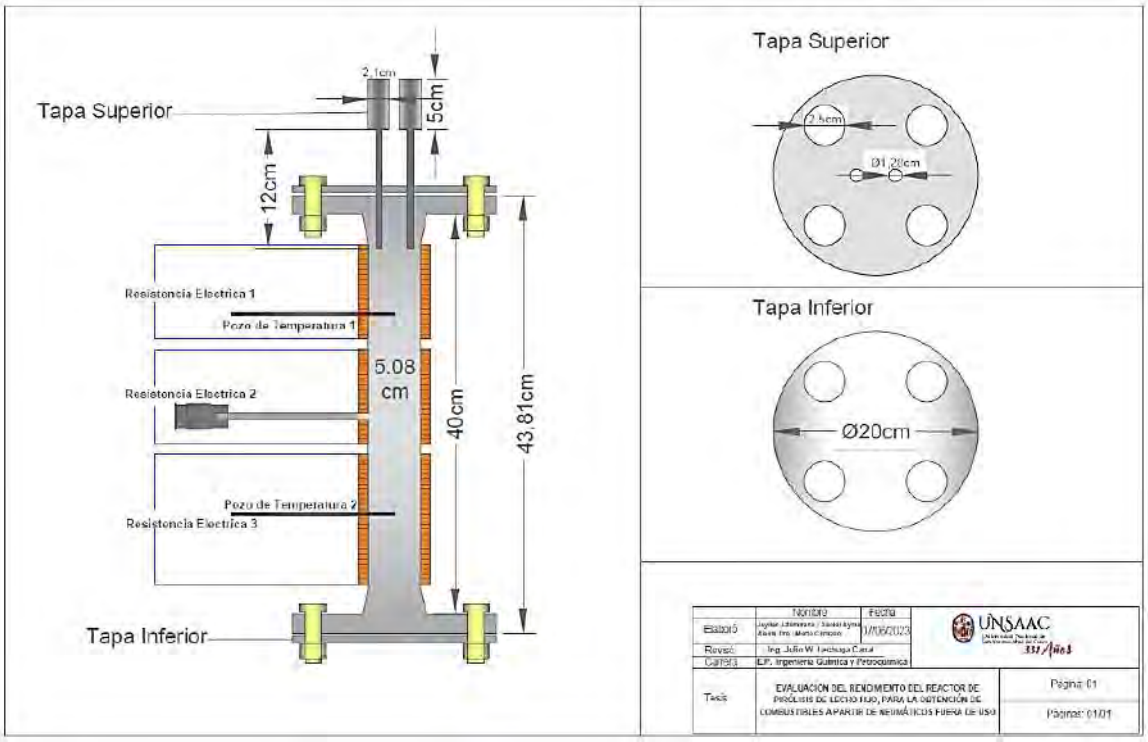
Figura 17

Reactor de pirólisis de lecho fijo

En la Figura 18 se presenta las dimensiones del reactor (Batch) de pirólisis de lecho fijo

Figura 18

Dimensiones del reactor de pirólisis de lecho fijo



En la Figura 19 se observa la muestra de NFU.

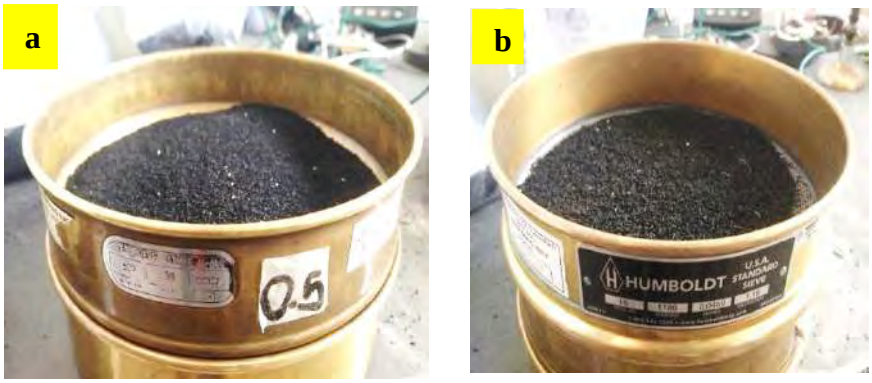
Figura 19

Muestra de neumáticos fuera de uso, extraída del taller de trituración RECRUZ S.A.C.

En la Figura 20, presenta diferentes tamaños de granulometría de NFU (mm)

Figura 20

Muestras de granulometría de neumáticos fuera de uso



Nota: *Se observa en la figura 20.a granulometría de NFU de 0.5 mm y 20.b granulometría de 1.0 mm***.**

3.3 Procedimiento experimental del proceso de pirólisis del reactor del lecho fijo

El procedimiento del proceso de pirólisis de NFU:

- Se cargaron 200 g de la muestra NFU (0.5 o 1.0 mm) dentro del reactor de pirólisis de lecho fijo, según el número de experiencia a realizar como se muestra en la Tabla 10.
- Se procedió a cerrar el reactor correctamente con el asbesto ferolite 333 y silicona mega grey, para evitar fuga de los productos durante el proceso.
- Se inyecta N_2 al reactor con un flujo de 5 l/min a presión de 2.72 atm durante 15 s, esta operación se realizó con la finalidad de purgar el aire y dejar un ambiente libre de oxígeno.
- Realizar una prueba de estanqueidad y abrir la válvula de salida del producto para una descompresión hasta alcanzar 1.36 atm dentro del reactor.
- Se da inicio con la experimentación de pirólisis, prendiendo el tablero de control (on/off). Para lograr el calentamiento del reactor (Batch) se utiliza ocho resistencias eléctricas variables, que suministran el calor necesario para lograr

el calentamiento adecuado.

- Para mantener una gradiente de calentamiento de 15 (°C/min), se inicia con una intensidad de corriente 0.9A, hasta llegar a 1.40A. Para una gradiente de calentamiento de 25 °C/min, se inicia con una intensidad de corriente 1.3A, hasta llegar a 1.8A, con el fin de obtener un calentamiento homogéneo dentro del reactor (batch).
- Tomar lectura de datos del termómetro de data logger para controlar el calentamiento del reactor, hasta que finalice el tiempo de pirólisis de NFU.
- Una vez que el reactor de pirólisis haya alcanzado la temperatura de operación (500 o 600 °C), esta debe mantenerse estacionario por un periodo de 150 minutos, hasta que finalice la pirólisis.
- El proceso de pirólisis trabaja a una presión constante de 1.36 atm dentro del reactor y cada incremento de presión, se procede de abrir la válvula para liberar los gases. Esto se repetirá hasta haber degradado el material neumático en su totalidad, produciendo como productos de fracción líquida, gas y sólido (char).
- El sistema de condensación debe ser refrigerado con agua a una temperatura de 12-15°C, para obtener una recuperación óptima de productos líquidos (combustible) del proceso y así evitar pérdidas.
- La fracción líquida obtenida durante esta etapa es llevada al pesaje en una balanza digital, los líquidos pirolíticos son almacenados en recipientes de vidrio y rotulados respectivamente con el número de experiencia.
- Dejar enfriar el reactor por convección natural para poder destapar y proceder a retirar la fracción sólida (carbón). Luego pesar los productos obtenidos de cada experiencia y rotular, así mismo se procede a determinar el

rendimiento del producto.

- Culminado el proceso de pirólisis, se realiza una limpieza del equipo y demás materiales con paños y thinner para su posterior experimento.
- Finalmente, los productos obtenidos durante el proceso de pirólisis de NFU, son llevados para su análisis y caracterización fisicoquímica mediante el uso espectrometría de fluorescencia de rayos X (XRF) para el producto sólido, y la destilación al vacío-ASTM D1160 para el combustible líquido.

En la Figura 21 se muestra los productos obtenidos en el reactor de pirólisis de lecho fijo de NFU.

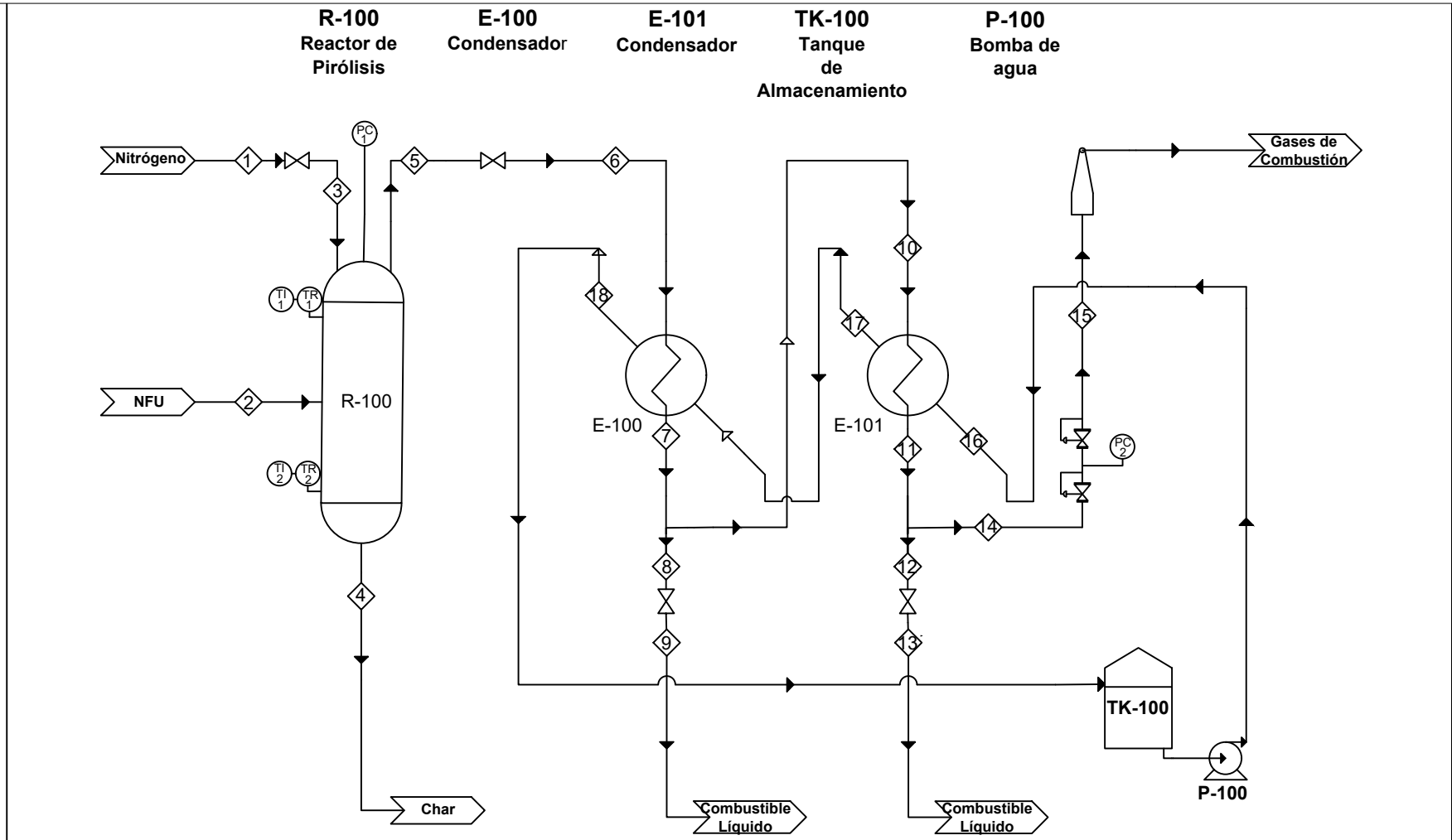
Figura 21

Productos obtenidos del proceso de pirólisis del reactor de lecho fijo

En la Figura 22 se observa la unidad de pirólisis de NFU de lecho fijo, y el balance de materia que se realizó para las condiciones de operación de 15 °C/min, 500 °C y 0.5 mm.

Figura 22

Diagrama de flujo del proceso de pirólisis de NFU



Número de corriente	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15
Presión (atm)	0.674	0.674	1.361	0.674	1.361	1.000	1.000	1.000	0.674	1.000	1.000	1.000	0.674	1.000	0.674
Temperatura °C	10	18	10	18	500	480	20	18	18	18	17	17	17	17	17
Fracción de vapor	1	0	1	0	1	1	0.101	0	0	1	0.83	0	0	1	1
Flujo másico (g/min)	3.991	1.33	3.991	-	0.779	0.779	0.779	0.700	0.700	0.079	0.079	0.013	0.013	0.066	0.066
Flujo másico del componente (g/lote)															
NFU	0	200	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Nitrógeno	0.998	0	0.143	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Char	0	0	0	83.090	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Combustible Líquido	0	0	0	0	0	0	0	105	105	0	0	2	2	9.910	9.910
Combustible Gaseoso	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0

	Nombre	Fecha
Elaboró	Jeyner Altamirano Q. Alexis Pro M.	07/06/2023
Revisó	Ing. Julio W. Lechuga Canal	
Carrera	E.P. Ingeniería Química	
Tesis	EVALUACIÓN DEL RENDIMIENTO DEL REACTOR DE PIRÓLISIS DE LECHO FIJO, PARA LA OBTENCIÓN DE COMBUSTIBLES A PARTIR DE NEUMÁTICOS FUERA DE USO	Página: 01 Páginas: 01/01

UNSAAC Universidad Nacional de San Antonio Abad del Cusco 331 Años

CAPÍTULO IV

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

4.1 Preparación de la muestra de NFU

La muestra de NFU que se utilizó fue de 10 kg, este se extrajo del taller de trituración RECRUZ S.A.C, esta empresa se dedica a la trituración de neumáticos de las distintas marcas que se encuentran en el mercado. El taller mecánico está ubicado en el distrito de Miraflores ciudad de Arequipa.

El proceso de separación y selección de la muestra triturada de NFU, se realizó en el laboratorio de Ingeniera de Control de Contaminación Ambiental de la Escuela Profesional de Ingeniería de Química. La separación de la muestra triturada de NFU inició con el tamizado en tres mallas (Tyler) diferentes conectadas en serie, primero se encuentra la malla N°14 que separó los gránulos de mayor tamaño (p>1.0 mm), seguido de la malla N°18 la cual separó gránulos de diámetro promedio a 1.0 mm, y finalmente está la malla N°40, donde se obtuvo gránulos de diámetro promedio de 0.5 mm, luego es seleccionada por tamaños de partícula requerido para la experimentación, al finalizar el proceso de separación se obtuvo 2.4 kg de NFU (1.0 mm) y 2.8 kg de NFU (0.5 mm).

La Tabla 11 muestra el análisis de NFU que Mejía *et al.*,(2021), realizaron para caracterización química de una mezcla triturada de neumáticos de carga pesada y liviana, donde se observa el alto contenido en carbono y la presencia de metales pesados, similar valor reportó Meza (2014), para el neumático de carga pesada.

Tabla 11

Composición química del neumático fuera de uso

Composición Química	Porcentaje [%]
Carbono	70 – 80
Hidrógeno	7.5
Azufre	1.2 - 1.9
Cloro	0.2 - 0.6
Hierro	15
Óxido de Zinc	2
Dióxido de Silicio	5
Cromo	97 ppm
Níquel	77 ppm
Plomo	60-760 ppm
Cadmio	5-10 ppm

***Fuente**: Meza (2014) y Mejía & Upegi (2021).*

4.2 Proceso de pirólisis de NFU

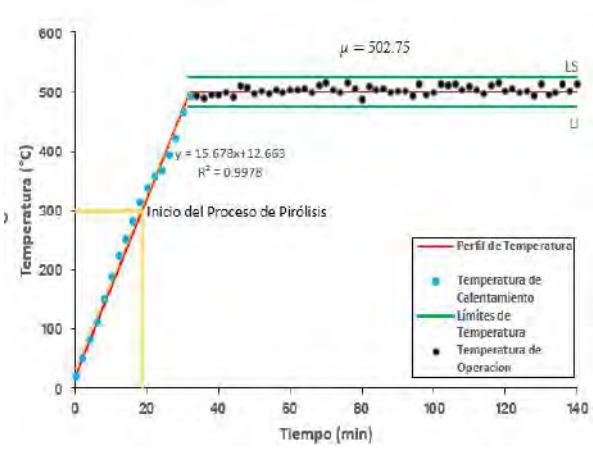
El proceso de pirólisis de NFU en el reactor de lecho fijo, consta de 5 etapas: Tamizado (1), pesado (2), reactor de pirólisis de NFU (3), condensación (4) y combustión (5). Hasta obtener los productos deseados como se muestra en la Figura 15 del diagrama de bloques del proceso de pirólisis de NFU.

4.3 Resultados del diseño experimental del proceso de pirólisis

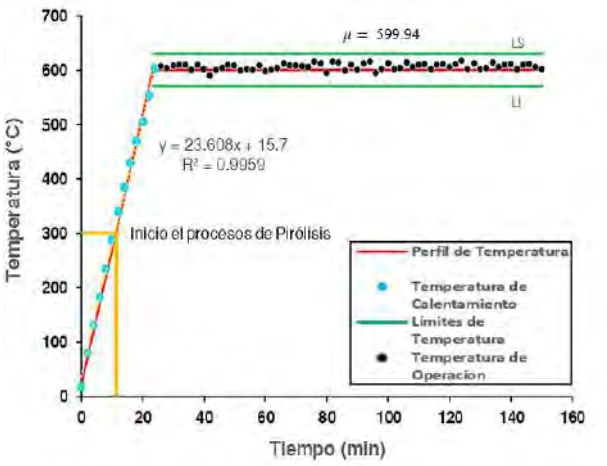
En la Figura 23 se observa el perfil de temperatura en el proceso de pirólisis de NFU : Temperatura (°C) vs tiempo (min).

Figura 23

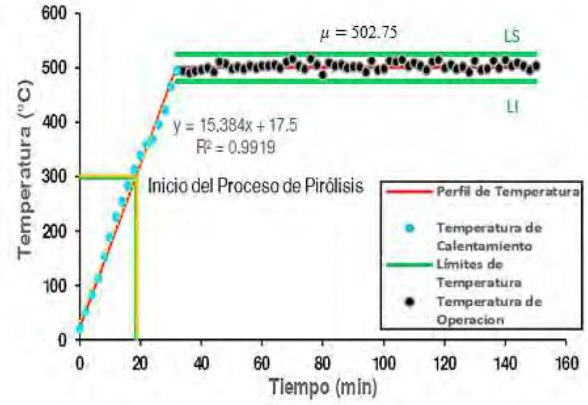
Efecto de pirólisis térmica y granulometría del NFU de 0.5 a 1.0 mm



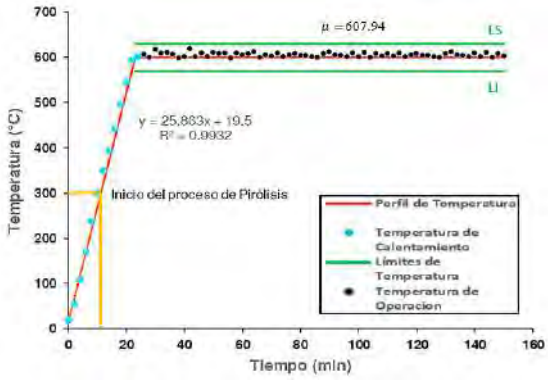
23.a) A=0.5; B= 500 °C/min; C= 15°C/min



23.b) A=0.5; B= 600 °C/min; C= 25°C/min



23.c) A= 1.0; B= 500°C/min; C= 15°C/min



23.d) A=1.0; B= 600 °C/min; C= 25°C/min

***Nota**: A= Tamaño de partícula, B= Temperatura, C=Gradiente de calentamiento.*

Para mantener el control adecuado del proceso de pirólisis en el reactor de lecho fijo, inicialmente se realizó la medición de la temperatura ambiente y el cálculo del perfil teórico de temperatura del proceso de pirólisis; que se obtiene a partir de las Ecuaciones 1 y 2, lo cual se realizó con la finalidad de mantener un calentamiento homogéneo y constante dentro del reactor, hasta alcanzar el punto de operación deseada.

Este control permitió obtener datos confiables de la variable respuesta sin variaciones de cambio significativos en el rendimiento de los productos.

En la Figura (23.a), las condiciones de operación teórica de las variables independientes fueron de 15 °C/min, 500 °C y 0.5 mm esto permitió graficar la curva de del proceso de pirólisis de NFU, a partir de esta curva se determinó el tiempo de calentamiento que demora la temperatura en alcanzar el punto de operación dentro del reactor, siendo de 32 minutos aproximado, este tiempo también es equivalente para las condiciones de la Figura (23.c) de 15°C/min, 500°C y 1.0 mm, donde el único cambio es el tamaño de partícula.

Para las condiciones de trabajo de las experiencias 3 y 4 de la Tabla 10, donde el punto de operación es de 600 °C y el tiempo de calentamiento es mayor, siendo este de 39 minutos aproximadamente, el tiempo de pirólisis en todas las experiencias fue de 150 minutos.

Al trabajar a las condiciones de la Figura (23.b) de y 25 °C/min, 600 °C y 0.5 mm, la curva de proceso tuvo una mayor pendiente de calentamiento, lo que permitió alcanzar el punto de operación de la temperatura en menos tiempo, siendo este de 24 minutos, este tiempo también es equivalente para las condiciones de la Figura (23.d) de 25 °C/min, 600 °C y 1.0 mm,

En el caso de las experiencias 5 y 6 de la Tabla 10, donde la temperatura de operación fue de 500 °C, el tiempo de calentamiento es de 19.5 min.

4.3.1 Rendimiento de los productos líquidos

Durante la experimentación del proceso de pirólisis de NFU se tomaron datos de peso, volumen del combustible líquido y el cálculo del rendimiento obtenido al término de cada experiencia.

En la Tabla 12 muestra el resumen de los rendimientos obtenidos para cada réplica, según el diseño experimental.

Tabla 12

Rendimiento del combustible líquido de cada réplica

Tamaño de partícula [mm]	Temperatura [°C]	Gradiente de calentamiento [°C/min]	Rendimiento [%]		
			Réplica		
			I	II	III
0.5	500	15	53.50	52.23	52.89
1.0	500	15	50.28	49.68	50.12
0.5	600	15	47.40	48.10	47.96
1.0	600	15	49.66	49.23	48.89
0.5	500	25	51.63	50.86	50.91
1.0	500	25	46.92	47.29	47.27
0.5	600	25	45.17	45.31	45.84
1.0	600	25	46.45	46.73	46.31

La primera experiencia de la Tabla 12 muestra que la combinación de las variables independientes de 15 °C/min (gradiente de calentamiento), 500 °C (temperatura de operación) y 0.5 mm (tamaño de partícula), es donde se obtuvo el mayor rendimiento del combustible líquido en la experimentación del proceso de pirólisis, el cual alcanzó un máximo del 53.50 %. Semejante valor reportó Golshan *et al.*,(2009), al trabajar a condiciones de 10 °C/min, 550 °C y 0.5 mm, donde el rendimiento de combustible líquido que obtuvo fue 50.6 %, en comparación con Wei-Cheng *et al.*, (2016), donde las condiciones de trabajo fueron de 13 °C/min, 450 °C y 0.59 mm (malla 30), el rendimiento del combustible líquido alcanzado fue 57.2 %.

Por lo tanto, las condiciones de la experiencia 1 son favorables para obtener un alto rendimiento del combustible líquido durante el proceso de pirólisis en el reactor (Batch) de lecho fijo.

Las condiciones de operación de la segunda experiencia mostro buenos resultados en la obtención del combustible líquido, donde se trabajó a 15 °C/min, 500 °C y 1.0 mm, donde el rendimiento de combustible líquido promedio que se obtuvo fue del 50.03 %, similar valor reporto Ochoa y Mahecha (2018), sobre el rendimiento del combustible el cual alcanzó el 40.75 % al trabajar a condiciones de y 10 °C/min, 500 °C y 1.0 mm.

Finalmente, las condiciones de la quinta experiencia mostraron resultados favorables para la obtención de un alto rendimiento de combustible líquido donde se alcanzó un promedio del 51.63 % al trabajar a 25 °C/min, 500 °C y 0.5 mm, semejante valor reporto Antoniou y Zabaniotou (2015), al trabajar en un reactor de horno rotatorio a condiciones de 20 °C/min, 600 °C y 15 mm, donde el rendimiento del combustible líquido que alcanzó fue de 51.14 %.

Caso contrario ocurre con la séptima experiencia donde las condiciones de operación fueron de 25 °C/min, 600 °C y 0.5 mm el rendimiento de combustible líquido que se obtuvo es el mínimo con el 45.17 %, similar valor reportó Li, Yao *et al.*, (2004), al trabajar a condiciones de 25 °C/min, 600 °C y 13 mm, donde el el rendimiento del combustible alcanzado fue 42.7 %.

4.3.1.1 Efectos estimados para el rendimiento de combustible líquido

El análisis estadístico de los datos experimentales se desarrolló en el software Minitab, donde se estudió el efecto de las variables y sus interacciones durante el proceso de pirólisis, el gráfico de contorno, el análisis de varianza y por último el modelo matemático de predicción.

De acuerdo a los datos experimentales obtenidos durante la etapa del proceso, se realizó una evaluación de los efectos estimados de cada variable, como se muestra en la Tabla 13.

La Tabla 13 muestra los efectos de las interacciones de las variables, en el caso de la interacción Tamaño de partícula – Temperatura (AB) el efecto es positivo, ya que el rendimiento del combustible líquido incrementa en promedio el 2.329 %. Por otro lado, el efecto de la interacción tamaño de partícula - Gradiente de calentamiento (AC) es negativa debido que el rendimiento disminuye en promedio 0.377 %.

Tabla 13

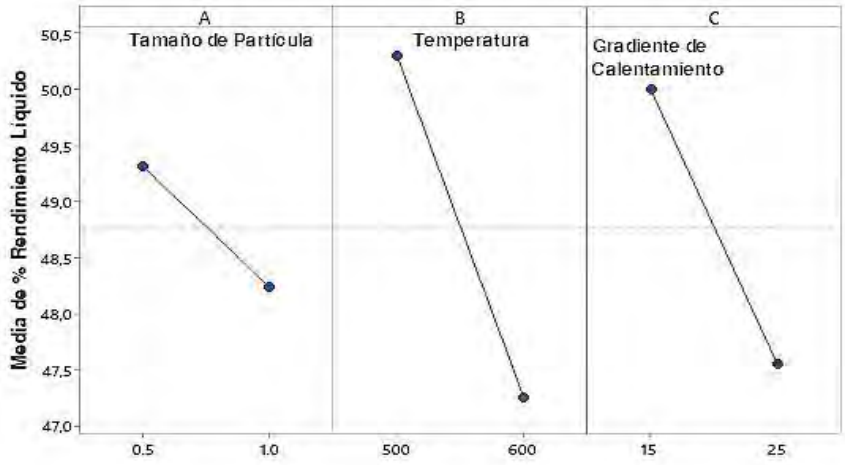
Efectos de las variables sobre el rendimiento del combustible líquido

Factores	Efecto
A : Tamaño de partícula	-1.081
B: Temperatura	-3.044
C: Gradiente de calentamiento	-2.437
A*B	2.329
A*C	-0.377

En la Tabla 13 se observa que el efecto del tamaño de partícula es negativo, esto se debe al incrementar el tamaño de partícula de 0.5 a 1.0 mm el rendimiento del combustible líquido disminuirá en promedio el 1.081 %, en caso de la temperatura el efecto de esta variable es negativo esto se debe que al incrementar la temperatura de operación de 500 a 600 °C el rendimiento disminuye en promedio 3.044 % y finalmente el efecto de la variable el gradiente de calentamiento es negativo ya que al incrementar de 15 a 25 °C/min el rendimiento disminuye en promedio un 2.437 %, como se aprecia en la Figura 24.

Figura 24

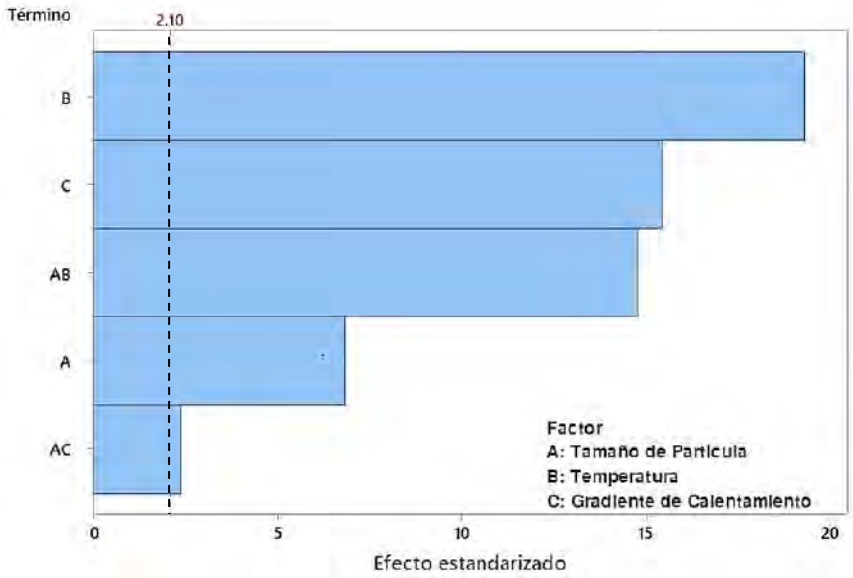
Gráfica de efectos principales en el rendimiento de combustible líquido



En la Figura 25 se muestra el diagrama de Pareto, el cual permite conocer el orden de importancia de las variables de estudio (tamaño de partícula – temperatura – gradiente de calentamiento).

Figura 25

Diagrama de pareto de los efectos de las variables en el rendimiento del combustible líquido



El diagrama de Pareto muestra los efectos estándares en orden decreciente de importancia de las variables de estudio: Tamaño de partícula, temperatura y gradiente de

calentamiento del proceso de pirólisis, siendo estos significantes, debido a que sobrepasan el límite critico de significancia de 2.10. En caso de las interacciones de las variables AB y AC también son significantes debido a que sobrepasan límite crítico de significancia, en el caso de la interacción doble BC y triple ABC no son significantes debido a que no sobrepasan el límite critico de significancia.

El estudio se realizó con un nivel de significancia del 95 %, esto se corroboró con el análisis de varianza (sección 4.3.1.2).

4.3.1.2 Análisis de varianza para el rendimiento del combustible líquido

Para la determinación del nivel de significancia de las variables independientes y sus interacciones se realiza el análisis de varianza (ANOVA) como se muestra en la Tabla 14.

Tabla 14

Análisis de varianza del rendimiento líquido

Fuente	GL	Sumatoria de Cuadrado	Cuadrado Medio	Valor F	Valor p
Modelo	7	131.980	18.8542	127.220	0.000
A : Tamaño de partícula	1	7.009	7.0092	47.290	0.000
B: Temperatura	1	55.602	55.6017	375.170	0.000
C: Gradiente de temperatura	1	35.648	35.6484	240.540	0.000
A*B	1	32.550	32.5501	219.630	0.000
A*C	1	0.855	0.8550	5.770	0.029
Error	16	2.371	0.1482		
Total	23	134.351			

Nota: *Donde AB es la interacción Tamaño de partícula – Temperatura y AC es la interacción de Tamaño de partícula -Gradiente de calentamiento.*

En la Tabla 14 se observa que la variable de mayor influencia sobre el rendimiento del combustible líquido del proceso de pirólisis es la temperatura, con una confiabilidad del 99.99 %, seguido de la gradiente de calentamiento con 99.98 % y el tamaño de partícula NFU con el 99.96 %, estos datos están dados con un nivel de significancia del 95 %.

4.3.1.3 Modelo matemático estimado para el rendimiento del combustible líquido

La ecuación 8 muestra el modelo estadístico ajustado a los datos experimentales, el cual presenta un coeficiente de determinación R^2 de 0.9746, para este modelo propuesto se consideró la interacción entre las variables independientes (A, B, C).

En la Tabla 15 se muestra las estimaciones de los coeficientes del modelo matemático estadístico ajustado (Ec. 8) para cada factor y sus interacciones.

Tabla 15

Coeficientes de regresión del modelo matemático para el rendimiento del producto líquido

Factores	Coeficiente
Constante	48.776
A : Tamaño de partícula	-0.540
B: Temperatura	-1.522
C: Gradiente de temperatura	-1.218
A*B	1.164
A*C	-0.188

Ecuación del modelo ajustado con interacciones de las variables independientes es:

$$R_{liq} = 48.776 - 0.540A - 1.522B - 1.218C + 1.164AB - 0.188AC \qquad \text{Ec. (8)}$$

Este modelo es válido para el rango de temperatura de operación de 500 a 600 °C, con una gradiente de calentamiento de 15 a 25 °C/min y tamaño de partícula de 0.5 a 1.0 mm.

Donde:

A: Tamaño de partícula (mm)

B: Temperatura (°C)

C: Gradiente de calentamiento (°C/min)

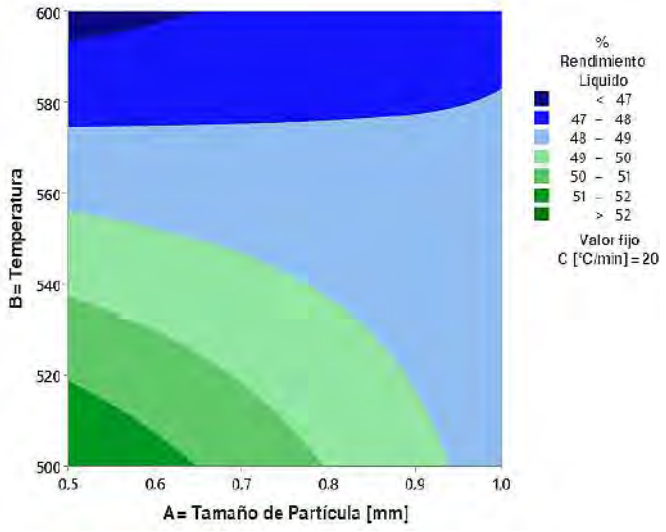
R_{liq}: Rendimiento del combustible líquido (%)

4.3.1.4 Gráfico contorno para el rendimiento del combustible líquido

En la Figura 26 se muestra el gráfico de contorno para él rendimiento del combustible líquido el cual presenta un comportamiento no lineal según el modelo matemático con interacciones, donde la relación de las variables (tamaño de partícula; temperatura) con la variable respuesta R_{liq} es inversamente proporcional. En el gráfico de contorno se observó que, al trabajar a menor temperatura, gradiente de calentamiento y tamaño de partícula se obtiene mayor rendimiento del combustible líquido donde se logró alcanzar el 53.5 % al trabajar a condiciones de 15 °C/min, 500 °C y 0.5 mm.

Figura 26

Gráfico de contorno temperatura vs tamaño de partícula



El gráfico de contorno está desarrollado mediante el uso de un modelo matemático estadístico no lineal, considerando las interacciones entre las variables.

Semejante valor del rendimiento de combustible líquido reportó en su trabajo en su trabajo investigación, Golshan *et al.*, (2009) sonbre “Modelado cinético de pirólisis de

de desecho”, este alcanzó el 50 %, al trabajar a condiciones de 10 °C/min, 500 °C y 0.5 mm, el cual describe que la temperatura tiene el mayor grado de efecto sobre el rendimiento del combustible líquido durante el proceso de pirólisis debido que al incrementar la temperatura de operación el rendimiento irá disminuyendo de forma no lineal.

En la investigación que realizó Aydin y IIkilic (2012), sobre la pirólisis de llantas en desuso sin acero ni tela, en un reactor de lecho fijo, el cual trabajó en un rango de temperatura de 400 a 700 °C, reporta que el mayor rendimiento de combustible líquido obtenido fue del 40 % en peso a 500 °C, en comparación con los valores del rendimiento líquido que se obtuvo en el reactor (Batch) de lecho fijo, durante el proceso de pirólisis fueron mayores a este como se muestra en la Tabla 12.

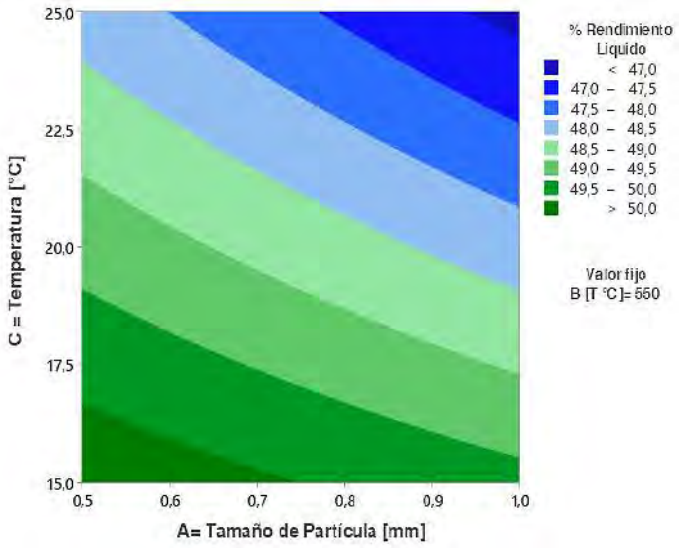
Se observa que, durante la experimentación, el rendimiento del combustible líquido disminuye al trabajar a mayor temperatura de operación (600 °C), así mismo, hubo incrementó en la producción de gas durante el proceso de pirólisis. Esto indica que la relación de las variables independientes con la variable respuesta son inversamente proporcional.

En la Figura 27 se muestra el gráfico de contorno para la interacción de las variables (gradiente de calentamiento y tamaño de partícula) según el modelo de la Ec. 8, se observa que estas variables tienen un efecto negativo sobre el rendimiento del combustible líquido, donde al trabajar a mayor gradiente de calentamiento y tamaño de partícula el rendimiento obtenido disminuye.

Ochoa y Mahecha (2018), mencionaron en su investigación de “Evaluación del proceso de pirólisis para la obtención de combustibles a partir de llantas usadas”, que el tamaño de partícula menor a 0.5 mm tiene un comportamiento lineal sobre el rendimiento del combustible líquido procedente de pirólisis de NFU, esto se debe que la distribución de

Figura 27

Gráfico de contorno: Tamaño de partícula vs Gradiente de calentamiento



calor es homogénea durante el proceso de pirólisis al no existir un gradiente de calentamiento en la partícula de NFU.

4.3.2 Rendimiento del producto sólido (Char)

Al finalizar la experimentación del proceso de pirólisis de NFU, el reactor se deja enfriar por convección natural, para poder retirar el producto sólido (char), el cual se encuentra en el interior del reactor, después de retirar el producto es llevado a una balanza analítica para su pesado con el fin de realizar el cálculo del rendimiento, en la Tabla 16 se presenta el resumen del rendimiento obtenido para cada réplica.

En la Tabla 16, se observa que en las tres réplicas de las experimentaciones se obtuvieron resultados semejantes del rendimiento del producto sólido, el promedio que se alcanzó fue del 42.39%, el mayor rendimiento del producto sólido, se obtuvo en la experiencia 8, al trabajar a condiciones de 25 °C/min, 600 °C y 1.0 mm; el rendimiento

obtenido fue del 43.14 %. Pretell *et al.,* (2021), reportaron que el rendimiento de char que alcanzó fue del 42.42 % al trabajar a condiciones de 5 °C/min, 550 °C y 150 mm, durante un tiempo de residencia de 390 minutos dentro del reactor.

Martínez y otros (2013), indicaron que en los procesos de pirólisis de NFU de partícula menor a 2 mm tienen una conducta isotérmica y no presentan limitaciones internas a la transferencia de masa (no existen gradientes de masa o temperatura al interior de la partícula), los cuales mencionan que el rendimiento del char debe ser similar a la cantidad de negro de humo y ceniza que esta presente en la composición de los NFU.

Tabla 16

Rendimiento del producto sólido (char)

Tamaño de partícula [mm]	T [°C]	Gradiente de calentamiento [°C/min]	Rendimiento sólido [%]		
			Réplica		
			I	II	III
0.5	500	15	41.55	41.77	41.62
1.0	500	15	41.69	41.58	41.89
0.5	600	15	42.82	42.90	42.75
1.0	600	15	41.71	41.90	41.75
0.5	500	25	41.80	43.07	41.90
1.0	500	25	42.98	42.87	42.92
0.5	600	25	42.87	42.96	43.07
1.0	600	25	43.14	43.12	42.89

Caso contrario ocurre al trabajar con partículas de mayor tamaño de NFU y a altas temperaturas, donde el rendimiento de los combustibles líquidos disminuye y el rendimiento del gas incrementa considerablemente, por otro lado el rendimiento del char

incrementa mínimamente debido a la carbonización de las moléculas de menor peso molecular dentro del reactor.

4.3.2.1 Efectos estimados para el rendimiento de char

Este análisis de datos se realiza de igual forma que los productos líquidos. La Tabla 17 muestra los valores de los efectos estimados de cada variable y sus interacciones de acuerdo a los datos experimentales obtenidos durante el proceso de pirólisis.

Se observa en la Tabla 17 que la temperatura tiene un efecto positivo, esto se debe al incrementar la temperatura de operación de 500 a 600 °C, el rendimiento del producto sólido aumenta en promedio 0.518 %, en caso de la gradiente de calentamiento también tiene un efecto positivo, esto se debe que al incrementar de 15 a 25 °C/min el rendimiento del producto sólido aumenta en promedio el 0.804 %.

Tabla 17

Efectos de las variables sobre el rendimiento del producto sólido (char)

Factores	Efecto
B: Temperatura	0.518
C: Gradiente de temperatura	0.804
A*B	-0.423
A*C	0.428

Por otro lado, la interacción de tamaño de partícula – temperatura (AB) tiene un efecto negativo debido que el rendimiento disminuye en promedio el 0.423 %, por último, la interacción de tamaño de partícula – gradiente de calentamiento (AC) posee un efecto positivo esto se debe a que el rendimiento del producto sólido incrementa en promedio 0.428 %.

En la Figura 28, se muestra el gráfico de efectos de las variables independientes (tamaño de partícula, temperatura y gradiente de calentamiento), sobre el rendimiento del producto sólido. En el caso del tamaño de partícula de NFU Antoniou y Zabaniotou (2015), mencionaron que esta variable no tiene efecto significativo sobre el rendimiento del producto sólido en el proceso de pirólisis, debido que el rendimiento de negro de humo será casi constante al trabajar a diferentes condiciones de temperatura y gradiente de calentamiento, similar comportamiento se observó en la Tabla 18.

Figura 28

Gráfica de efectos principales en el rendimiento del sólido (char)

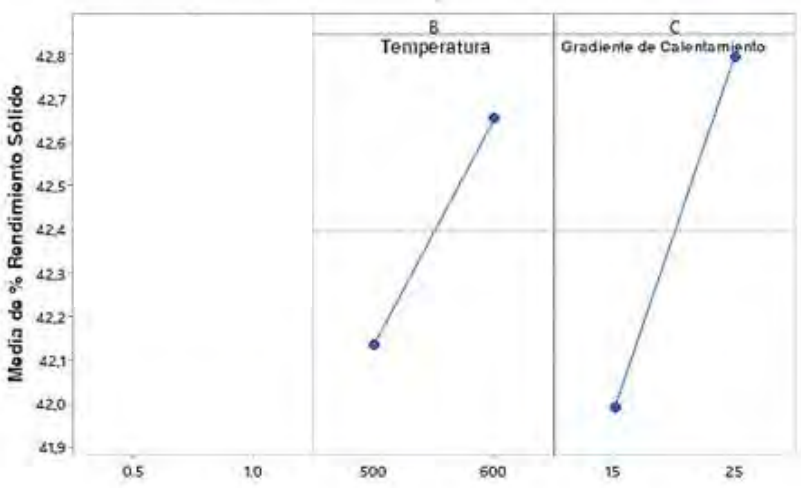
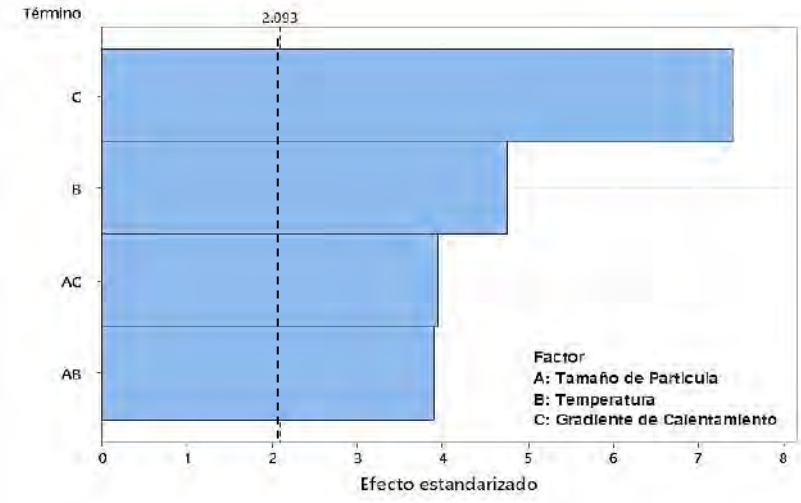


Figura 29

Diagrama de pareto de efectos de las variables para el rendimiento del producto sólido (char)



En la Figura 29 se muestra el diagrama de Pareto, el cual permitió conocer el orden de importancia de las variables de estudio (Tamaño de partícula – Temperatura – Gradiente de calentamiento).

Se observa en el diagrama de Pareto, los efectos estándares en orden decreciente de importancia de las variables de estudio sobre el rendimiento del producto sólido. La temperatura y gradiente de calentamiento en el proceso de pirólisis tienen efectos significativos, debido a que sobrepasan el límite crítico de significancia (2.093). En caso de las interacciones de las variables AB y AC también son significantes debido a que sobrepasan límite crítico de significancia, en el caso de la variable A y las interacciones BC y ABC no sobrepasan el límite crítico de significancia, este estudio se realizó con un nivel de significancia del 95 %, el cual se corroboró con el análisis de varianza (sección 4.3.2.2).

4.3.2.2 Análisis de varianza para el rendimiento del producto sólido (Char).

Tabla 18

Análisis de varianza del rendimiento sólido (char)

Factores	GL	Sumatoria de Cuadrado	Cuadrado Medio	Valor F	Valor p
Modelo	7	7.85791	1.12256	15.36	0.000
B: Temperatura	1	1.61461	1.61461	22.10	0.000
C: Gradiente de temperatura	1	3.88413	3.88413	53.15	0.000
A*B	1	1.07738	1.07738	14.74	0.001
A*C	1	1.10296	1.10296	15.09	0.001
Error	16	1.16917	0.07307		
Total	23	9.02707			

Para la determinación del nivel de significancia de las variables independientes y sus interacciones se realiza el análisis de varianza (ANOVA) como se muestra en la Tabla 18, se observa que la variable de mayor significancia estadística sobre él rendimiento del producto solido en el proceso de pirólisis es la gradiente de calentamiento con una confiabilidad del 99.99 %, seguido de la temperatura con 99.98 % y la interacción doble (AB) y (AC) de estas variables con una confiabilidad 99.90 %, con respecto a la temperatura y las demás interacciones su grado de influencia no es significativa puesto que su valor de "p" es mayor a 0.05, estos datos se analizaron con un nivel de confiabilidad del 95 %.

4.3.2.3 Modelo matemático del rendimiento del producto sólido

La Ec. 9, muestra el modelo estadístico ajustado a los datos experimentales, siendo el R^2 de 0.8507, para este modelo propuesto se consideró la interacción entre las variables independientes (A, B, C). En la Tabla 19 se muestra las estimaciones de los coeficientes del modelo matemático estadístico ajustado (Ec. 9) para cada factor y sus interacciones.

Tabla 19

Coeficiente de regresión para el rendimiento del sólido (char)

Factores	Coeficiente
Constante	42.393
B: Temperatura	0.259
C: Gradiente de temperatura	0.402
A*B	-0.211
A*C	0.214

La ecuación del modelo matemático ajustado con interacciones de las variables es:

$$R_{sol} = 42.393 + 0.259B + 0.402C - 0.211AB - 0.214AC \qquad \text{Ec. (9)}$$

Este modelo matemático es válido para el rango de temperatura de operación de 500 a 600 °C, una gradiente de calentamiento de 15 a 25 °C/min y tamaño de partícula de 0.5 a 1.0 mm.

Donde:

A: Tamaño de partícula (mm)

B: Temperatura (°C)

C: Gradiente de calentamiento (°C/min)

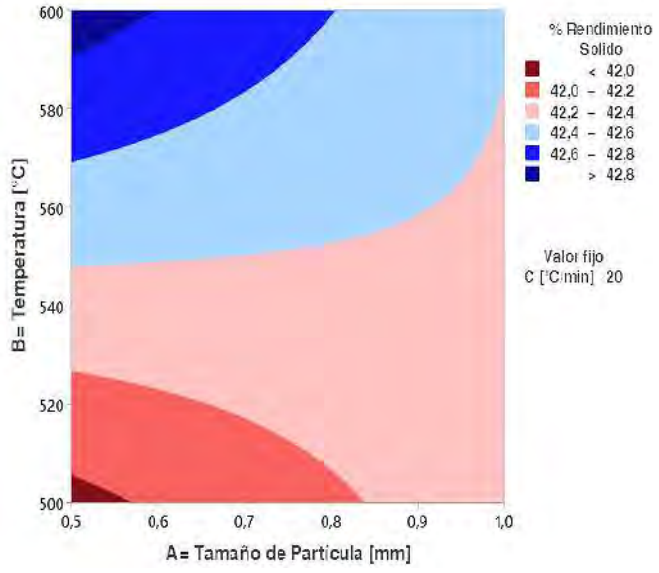
R_{sol}: Rendimiento del producto sólido (Char) (%)

4.3.2.4 Gráfico contorno del rendimiento sólido (Char)

En la Figura 30 se muestra el gráfico de contorno para el de rendimiento del producto sólido del proceso de pirólisis el cual tiene un comportamiento no lineal según el modelo matemático ajustado propuesto con interacciones de las variables (Ec.9), además que este presenta una relación inversamente proporcional de las variables independientes con la variable respuesta. El color azul y rojo del gráfico de contorno, representan zonas de mayor a menor rendimiento del producto sólido.

Figura 30

Gráfico de contorno: Temperatura vs Tamaño de partícula

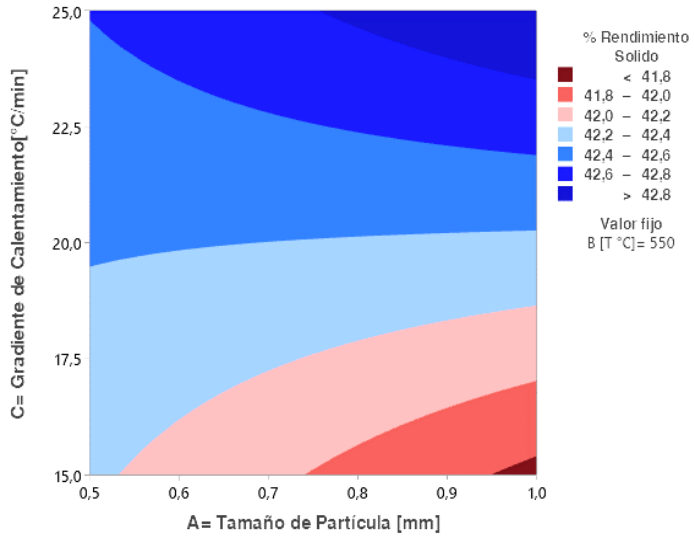


El gráfico de contorno está desarrollado mediante el uso de un modelo matemático estadístico no lineal, considerando las interacciones entre las variables.

En la Figura 31 se observa el gráfico de contorno que posee un comportamiento no lineal según (Ec. 9), al mantener la temperatura de operación a 600 °C el rendimiento del producto sólido incrementa en promedio un 0.8 %. Caso contrario ocurre si la temperatura de operación es de 500 °C, el rendimiento del sólido disminuye. Ochoa y Mahecha (2018), mencionan en sus estudios sobre el rendimiento del sólido carbonizado producto de pirólisis de llanta, obtenido a partir de un reactor de lecho de arrastre, donde al disminuir el tamaño de partícula de NFU y al incrementar la temperatura del proceso se obtiene mayor porcentaje de rendimiento en el producto sólido respectivamente.

Figura 31

Gráfico de contorno: Gradiente de calentamiento vs Tamaño de partícula



A diferencia, la interacción de las variables A:C muestra una relación de crecimiento proporcional sobre él rendimiento sólido (char), esto ocurre debido que al trabajar con una gradiente de calentamiento de 25 °C/min, el rendimiento incrementa en promedio el 1 %. Por otro lado, al trabajar con una gradiente de calentamiento de 15 °C/min, habrá una leve disminución de l % de rendimiento sólido.

Czajczynska, Krzyzynska *et al.,* (2017), mencionaron que las propiedades del producto sólido influyen en gran medida en la viabilidad económica de todo el proceso de pirólisis. Ya que el uso más extendido del negro de humo es la producción de carbón activado.

Debido al alto contenido de carbono en el producto sólido procedente del proceso de pirólisis Rahman *et al.,* (2018), describe que este producto es versátil y económico en su aplicación en diversas industrias como: La producción de calzado, cintas transportadoras, etc. La producción de carbón activado y combustible en hornos industriales.

4.3.3 Rendimiento del producto gaseoso

Durante el proceso de pirólisis, la cuantificación del producto gaseoso es muy complejo al no contar con recipiente adecuado para su almacenamiento, éste es alimentado directamente al mechero bunsen para su combustión. Para determinar el rendimiento de este producto se realiza un balance de materia con la finalidad de cuantificar la masa de gas que se produce durante el proceso de pirólisis. En la Tabla 20 muestra el porcentaje de rendimiento del gas obtenido durante la experimentación.

El rendimiento obtenido del gas, varía para cada experiencia, el cual oscila en el rango de 4.96 a 11.97 %, donde el menor promedio del rendimiento gaseoso se obtiene en la primera experiencia, esto se debe a que se trabajó a condiciones de 15 °C/min, 500 °C y 0.5 mm, caso contrario ocurre si se trabaja a condiciones de 25 °C/min, 600 °C y 0.5 mm, el rendimiento del gas aumenta hasta alcanzar el 11.97 % como se puede ver en la experiencia 7 de la Tabla 20.

Esto conlleva que habrá un incremento en el rendimiento del producto líquido, pero un efecto contrario ocurre si se trabaja con el mayor valor de las variables, entonces el rendimiento del producto líquido disminuye considerablemente.

Tabla 20

Rendimiento del gas de síntesis

Tamaño de partícula [mm]	T [°C]	Gradiente de calentamiento [°C/min]	Rendimiento de gas [%]		
			Réplica		
			I	II	III
0.5	500	15	4.96	6.00	5.49
1.0	500	15	8.03	8.75	7.99
0.5	600	15	9.79	9.01	9.30
1.0	600	15	8.63	8.88	9.37
0.5	500	25	6.58	6.08	7.20
1.0	500	25	10.10	9.84	9.82
0.5	600	25	11.97	11.74	11.09
1.0	600	25	10.42	10.16	10.80

González *et al.,(*2001), en la investigación de "Pirólisis de residuos de neumáticos de automóviles e Influencia de las variables operativas y estudio cinético", reportaron que a la temperatura de operación 350-700 °C, gradiente de calentamiento 5-20 °C/min y tamaño de partícula de 6 mm, el rendimiento del gas será menor, el cual oscila en el rango de 7-12 %.

Pretell *et al*., (2021) trabajaron en un reactor de pirólisis al vacío, a presión 30.52 kPa, un rango de temperatura 500-650 °C y tamaño de partícula de 25x25 mm, donde el rendimiento obtenido se encuentra en el rango de 5.81 – 21.70 %.

4.3.3.1 Efectos estimados para el rendimiento del gas de síntesis

Finalmente, para la evaluación del efecto de las variables independientes y sus respectivas interacciones, sobre el rendimiento del producto gaseoso, como variable respuesta, se observa que el rendimiento obtenido durante el tiempo del proceso de

pirólisis alcance un valor promedio para cada replica realizada. A partir de los datos experimentales de la Tabla 20 se realizó el análisis estadístico.

En la Tabla 21, se muestra las estimaciones de los efectos de cada factor y sus interacciones.

Tabla 21

Efectos de las variables sobre el rendimiento del gas de síntesis

Término	Efecto
A : Tamaño de partícula	1.132
B: Temperatura	2.525
C: Gradiente de calentamiento	1.632
A*B	-1.905

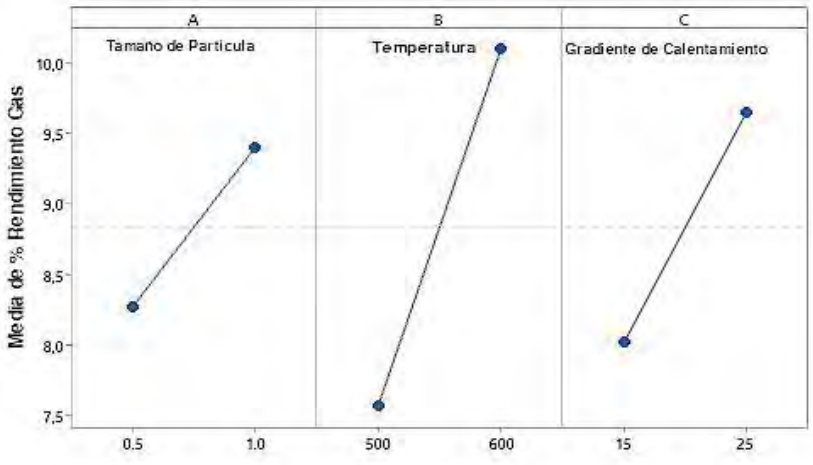
Para el análisis del efecto de las variables sobre el rendimiento del gas de síntesis se observa en la Tabla 21, que el tamaño de partícula tiene un efecto positivo debido que al incrementar el tamaño de partícula de 0.5 a 1.0 mm el rendimiento del gas incrementa en promedio el 1.132 %, por otro lado, la temperatura de operación tiene un efecto positivo sobre el rendimiento debido que, al incrementar de 500 a 600 °C, este aumenta en promedio un 2.525 %.

Finalmente, el gradiente de calentamiento también tiene efecto positivo sobre el rendimiento debido al incremento de 15 a 25 °C/min, el cual aumenta en promedio un 1.623%. en el caso de la interacción doble AB, este posee un efecto negativo sobre el

rendimiento debido que este disminuye en promedio el 1.905 %. Como se observa en la Figura 32.

Figura 32

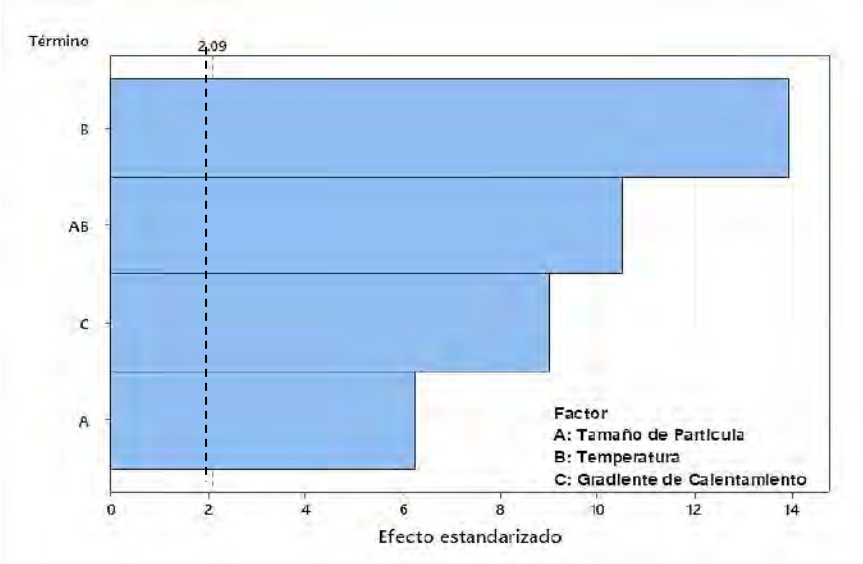
Gráfica de efectos principales en el rendimiento de gas de síntesis



En la Figura 33 se muestra el diagrama de Pareto, el cual permitió conocer el orden de importancia de las variables de estudio (Tamaño de partícula – Temperatura – Gradiente de calentamiento) siendo estos significantes debido a que sobrepasan el límite critico de significancia de 2.09.

Figura 33

Diagrama de pareto para el rendimiento del gas



En caso de la interacción de la variable AB también es significante debido a que sobrepasa límite crítico de significancia, por otro lado, las interacciones que no son significantes, debido a que no sobrepasan el límite crítico de significancia. Este estudio se realizó con un nivel de significancia del 95 %, el cual se corroboró con el análisis de varianza (sección 4.3.3.2).

4.3.3.2 Análisis de varianza para el rendimiento del gas de síntesis

Para la determinación del nivel de significancia de las variables independientes y sus interacciones se realizó el análisis de varianza (ANOVA), como se muestra en la Tabla 22.

Tabla 22

Análisis de varianza para el rendimiento gas de síntesis

Fuente	GL	Sumatoria de Cuadrado.	Cuadrado Medio	Valor F	Valor p
Modelo	7	84.6956	12.0994	69.15	0.000
A : Tamaño de partícula	1	7.7010	7.7010	44.01	0.000
B: Temperatura	1	38.2664	38.2664	218.70	0.000
C: Gradiente de calentamiento	1	15.9985	15.9985	91.43	0.000
A*B	1	21.7837	21.7837	124.50	0.000
Error	16	2.7996	0.1750		
Total	23	87.4952			

En la Tabla 22 se muestra la prueba de significancia estadística para cada factor del análisis de varianza, lo cual ayuda a corroborar que la variable de mayor influencia sobre el rendimiento gaseoso del proceso de pirólisis es la temperatura (B) con una confiabilidad promedio mayor al del 99.99 %, seguido de la gradiente de calentamiento y el tamaño de

partícula con una confiabilidad del 99.98 % y la interacción doble tamaño de partícula-temperatura (AB) posee una confiabilidad del 99.98 %.

En el caso de las interacciones restantes no tienen mayor efecto sobre el rendimiento, debido a que el valor "p" es mayor a 0.05. Estos datos están dados con una confiabilidad del 95 %.

4.3.3.3 Modelo matemático del rendimiento del producto gas

La Ecuación 10 muestra el modelo estadístico ajustado a los datos experimentales, siendo el R^2 ajustado de 0.9572 donde el modelo estadístico propuesto consideró la interacción entre las variables independientes (A, B, C). En la Tabla 23 se muestran las estimaciones de los coeficientes del modelo matemático estadístico ajustado para cada factor y sus interacciones

Tabla 23

Coeficiente de regresión para el rendimiento del gas de síntesis

Factores	Coeficiente
Constante	8.830
A : Tamaño de partícula	0.566
B: Temperatura	1.262
C: Gradiente de temperatura	0.816
A*B	-0.952

El modelo matemático ajustado con interacciones es:

$$R_{gas} = 8.830 + 0.566A + 1.262B + 0.816C - 0.952AB \qquad \text{Ec. (10)}$$

Este modelo es válido para el rango de gradiente de calentamiento de 15 a 25 °C/min, temperatura de operación de 500 a 600 °C y tamaño de partícula de 0.5 a 1.0 mm.

Donde:

A: Tamaño de partícula (mm)

B: Temperatura (°C)

C: Gradiente de calentamiento (°C/min)

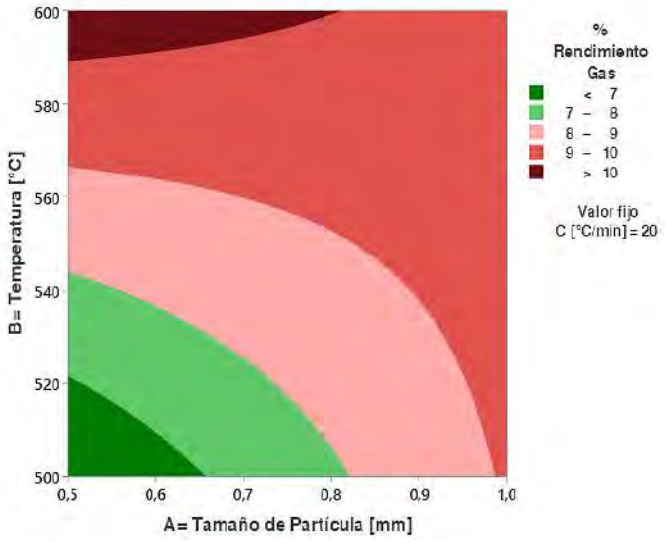
R_{liq}: Rendimiento del gas de síntesis (%)

4.3.3.4 Gráfico de contorno para el rendimiento del gas de síntesis

En la Figura 34, se muestra el gráfico de contorno que tiene el comportamiento no lineal según el modelo matemático ajustado obtenido (Ec.10) para el rendimiento del combustible gaseoso, donde la interacción de las variables A: B con la variable respuesta R_{gas} es directamente proporcional.

Figura 34

Gráfico de contorno: Temperatura vs Tamaño de partícula



El gráfico de contorno está desarrollado mediante el uso de un modelo matemático estadístico no lineal, considerando las interacciones entre sus variables.

En el gráfico de contorno muestra que al trabajar con el menor valor de las variables A y B, el rendimiento del gas durante el proceso de pirólisis será mínimo, esto también conlleva a que el rendimiento del producto líquido aumente de manera

significativa, lo cual indica que la relación de estas variables es directamente proporcional, ya que, al trabajar con el mayor valor, el rendimiento del gas aumentara y el rendimiento del producto líquido será menor. En el caso del producto sólido la variación que sufre el rendimiento es mínima.

El gráfico de contorno coincide con Hüseyin y Cumali (2012), en su investigación de “Optimización de la producción de combustible a partir de neumáticos de vehículos de desecho por pirólisis y similar al combustible diésel por varios métodos de desulfuración”, realizó su investigación en el reactor de lecho fluidizado con N_2 donde trabaja en rango de una tasa de calentamiento de 12 °C/min y temperatura 400 -700 °C, el cual reportó semejantes valores del rendimiento gaseoso que se halla en el rango de 7.42 – 18.68 %.

Fonseca Jaramillo (2016) en su investigación sobre la “Evaluación de un reactor de lecho fluidizado en el proceso de pirólisis catalítica usando desecho de caucho de llanta”, demostró que el catalizador de zeolita (ZSM-5) tuvo un menor rendimiento de gas, el cual alcanzó el 10.19 % al trabajar a condiciones de 25 °C/min, temperatura de operación de 500 °C y tamaño de partícula menor a 2.0 mm.

Finalmente se realizó el balance de materia del proceso de pirólisis de lecho fijo, según el diagrama de flujo de la Figura 21, donde se obtuvo los promedios del rendimiento de las tres réplicas de cada experiencia, como se muestra en la Tabla 24. Todas las experiencias se trabajaron a una presión manométrica de 1.36 atm; siendo la presión atmosférica de la Ciudad del Cusco de 0.674 atm y una presión absoluta de operación de 2.034 atm.

El mayor rendimiento obtenido de combustible líquido fue de la experiencia 1, con un 52.87 %, donde se trabajó a una gradiente de calentamiento 15°C/min, una temperatura de operación de 500 °C y tamaño de partícula de 0.5 mm de diámetro promedio, a comparación de una temperatura de operación 600 °C, donde el rendimiento del líquido

disminuye significativamente hasta un 45.44 %, el gas aumenta considerablemente de 4.96 a 11.74 %.

El rendimiento en el producto sólido obtenido es semejante a todas las experiencias dadas, en comparación con Golshan *et al.,* (2009), que obtuvo un rendimiento promedio del 50 % a las mismas condiciones de variables, siendo una presión absoluta de 1 atm.

En la Tabla 24 se muestra el promedio de los rendimientos de los productos obtenidos para cada experiencia en el proceso de pirólisis.

Tabla 24

Balance de materia del proceso de pirólisis de NFU

N° Experiencia	Líquido [g]	Sólido [g]	Gas [g]	Rendimiento [%]		
				Líquido	Sólido	Gas
1	88.00	93.33	18.67	52.87	41.65	5.48
2	82.67	90.00	27.33	50.03	41.72	8.26
3	80.67	92.00	27.33	47.82	42.82	9.36
4	85.83	90.00	24.17	49.26	41.78	8.96
5	80.33	98.00	21.67	51.13	42.25	6.62
6	80.00	95.00	25.00	47.16	42.92	9.92
7	76.33	101.00	22.67	45.44	42.96	11.60
8	74.33	96.00	29.67	46.49	43.05	10.46

4.4 Propiedades fisicoquímicas del producto líquido de pirólisis de NFU

Una vez terminado el proceso de pirólisis, las muestras líquidas (combustibles) son llevados al laboratorio de Hidrocarburos, para la determinación de las propiedades fisicoquímicas en los equipos de medición como centrífuga, refractómetro y equipo ASTM (viscosímetro, Petrotest).

En la Tabla 25, se muestra las propiedades fisicoquímicas de los productos de cada ensayo experimental.

Tabla 25

Propiedades fisicoquímicas del producto líquido para cada experiencia

N° Experiencia	Densidad* [g/cm^3]	ASTM D9042		ASTM D93
		Viscosidad Dinámica* [mPa.s]	Viscosidad Cinemática* [mm^2/s]	Punto de Inflamabilidad [°C]
1	0.8936	2.1101	2.3612	29.0
2	0.9041	6.4178	7.0990	29.5
3	0.8953	3.4606	3.0983	30.0
4	0.9009	3.2182	3.5758	29.5
5	0.9082	2.9655	3.2652	30.5
6	0.8697	1.3940	1.6029	30.0
7	0.9017	2.2402	2.4845	31.0
8	0.8866	1.8194	2.0521	31.5

***Nota:(****) Estas propiedades físicas se midieron a temperatura de 15.6 °C y a presión de 0.6736 atm. Para la medición del punto de inflamación (ASTM D 93) se utilizó 70 ml por muestra de combustible*

4.4.1 Destilación al vacío ASTM D1160 del combustible líquido obtenido en el reactor de pirólisis de NFU

En la Figura 35 se muestra el proceso de destilación al vacío ASTM D1160 que se dió a una presión atmosférica de 60 mmHg, el cual se utilizó 100 ml de muestra del combustible líquido proveniente del proceso de pirólisis, se observó que los primeros 15-20 ml del destilado es un líquido transparente, donde se encuentra los cortes de nafta, gasolina liviana, nafta media y nafta pesada. Cuando el destilado alcanza un volumen de 50 ml, presenta un cambio de coloración amarillenta, esto ocurre por la presencia de los cortes

de kerosene liviano y pesado; finalmente al alcanzar un volumen de 65 – 75 ml del destilado, se torna de color verde, esto se debe a la presencia del gasoil.

Figura 35

Proceso de destilación al vacío ASTM D1160

El combustible líquido (NFU), se le hizo una caracterización fisicoquímica en cortes como se muestra en las Figuras 37 y 38. Lo cual permitió desarrollar la curva de destilación del combustible proveniente de pirólisis de NFU. Para su caracterización fisicoquímica por cortes; inicialmente se determina el AET (Temperatura Atmosférica Equivalente) a partir de la Ecuación 5, se realiza con la finalidad de comparar las fracciones del destilado con la norma ASTM D2892, como se observa en la Tabla 26, la cual muestra los cortes de las fracciones del destilado para el crudo de petróleo pesado a presión atmosférica, según la norma técnica ASTM.

Figura 36

Producto de la destilación al vacío ASTM D1160

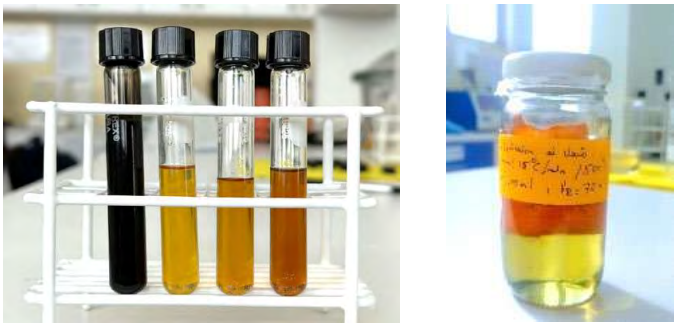


Figura 37

Curva de destilación al vacío ASTM D1160 de combustibles líquidos de pirólisis de NFU

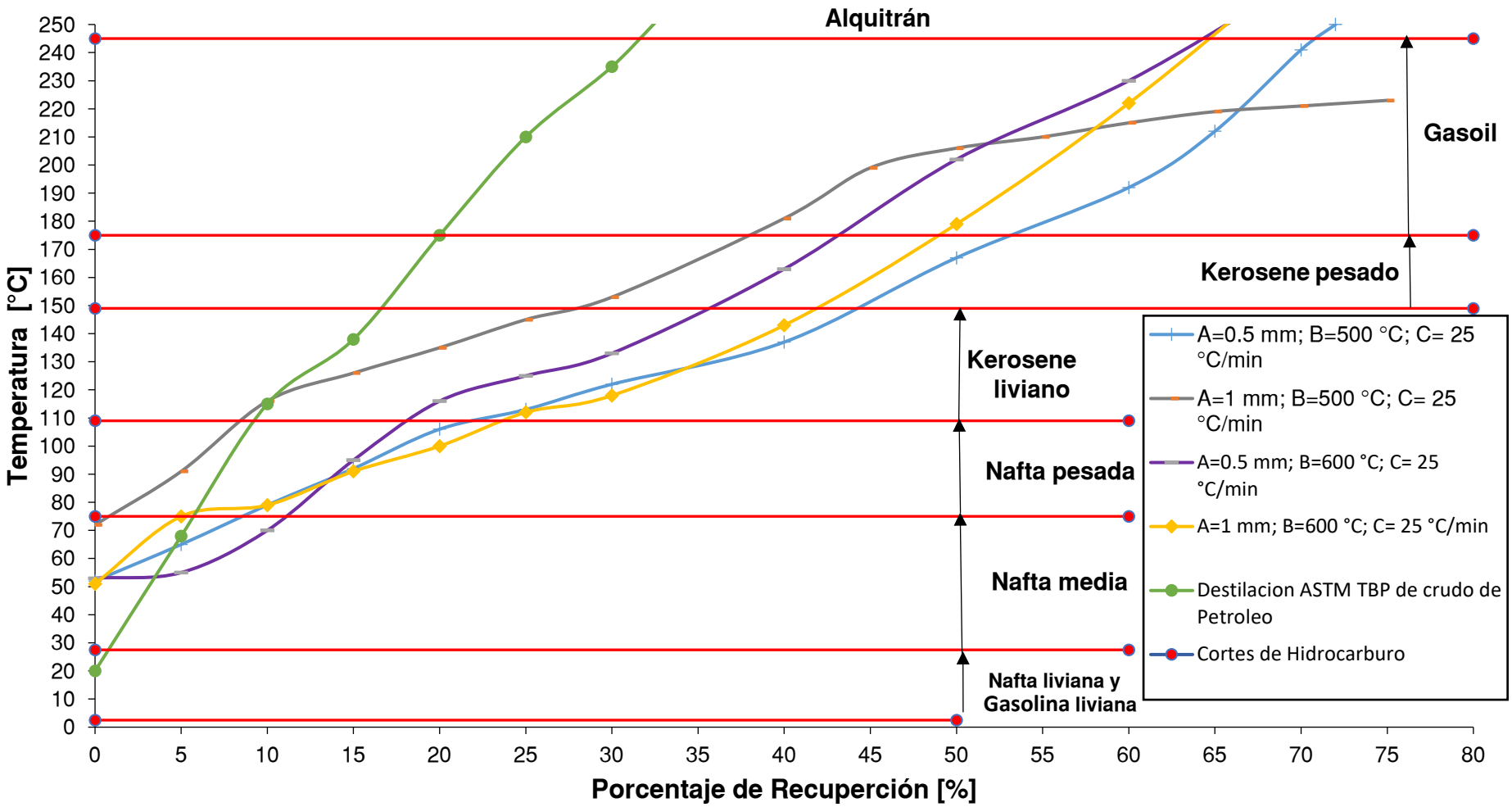


Figura 38

Curva de destilación al vacío ASTM D1160 de combustibles líquidos de pirólisis de NFU

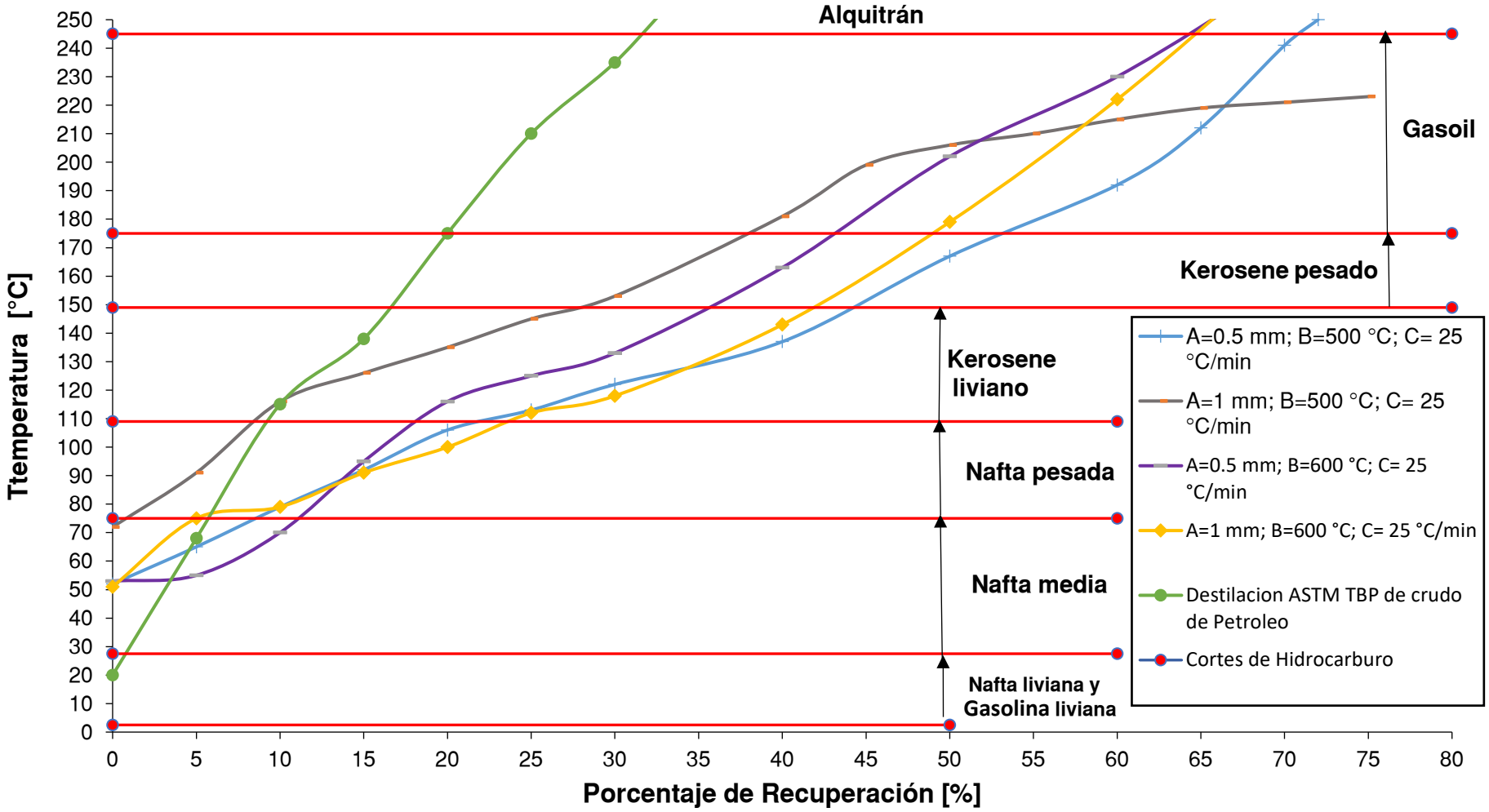


Tabla 26

Fracciones de destilado del crudo de petróleo pesado ASTM D2892

Corte destilación	Temperatura [°C]
Liviano – Gas Natural	Trampa fría
Gasolina Liviana	Trampa fría -70
Nafta Liviana	70 – 100
Nafta Media	100 – 150
Nafta Pesada	150 – 190
Kerosene Liviano	190 – 235
Kerosene Pesado	235 – 265
GO Atmosférico	265 - 343
Resíduo Atmosférico	Mayor a 343

Fuente: *Estudios y servicios petroleros S.R.L.(2014).*

Los datos obtenidos para los cortes de cada experiencia se muestran en la Tabla 27; estos se obtuvieron a partir de las curvas de destilación de las Figuras 37 y 38, donde se realiza una comparación con la curva de destilación ASTM D2892 para el crudo de petróleo pesado. Batistella, y otros (2015) determinó que la fracción de kerosene y gasoil (diésel) representa un valor promedio del 23 %.

Se observa en la Tabla 27 que muestra el °API de las experiencias se encuentran en el rango de 24.00 – 30.90, la cual indica que el combustible líquido obtenido en el proceso de pirólisis de NFU es de peso mediano con densidad menor al agua, según reportó Pretell *et al.,* (2021) donde el líquido de pirólisis es empleado como carga a una refinería de petróleo o utilizado como combustible industrial.

Tabla 27

Caracterización fisicoquímica por cortes de destilación al vacío ASTM D1160 de combustibles de neumáticos fuera de uso

N° Exp.	Gravedad Especifica (G.E)	°API	Nafta y gasolina liviana [%]	Nafta media [%]	Nafta pesada [%]	Kerosene liviano [%]	Kerosene pesado [%]	Gasoil [%]	Alquitrán [%]
1	0.895	26.50	0.20	3.89	11.46	20.05	9.78	19.61	35.01
2	0.906	24.70	0.25	2.25	19.64	28.20	8.54	13.11	28.01
3	0.897	26.20	0.30	9.45	14.75	11.27	9.13	10.00	45.10
4	0.902	26.20	0.40	4.60	12.92	17.45	8.26	21.15	35.22
5	0.910	24.00	0.35	8.22	13.57	21.87	9.20	17.68	29.11
6	0.871	30.90	0.20	0.59	7.81	18.90	10.36	37.14	25.00
7	0.904	25.10	0.50	10.50	7.33	17.01	7.74	21.09	35.83
8	0.888	27.80	0.35	4.65	18.75	17.92	7.22	15.72	35.39

En la destilación TBP (ASTM D2892) del crudo de petróleo pesado obtenido por Batistella., y otros (2015) reportaron que el destilado de combustible alcanzó el 23 % de una mezcla de kerosene y gasoil, a comparación con el combustible destilado de la experiencia 6, el cual se trabajó a condiciones de 25 °C/min, 500 °C y 1.0 mm, durante el proceso de pirólisis, se obtuvo el mayor rendimiento de destilado de kerosene y gasoil, el cual alcanzó el 29.26 y 37.14 % respectivamente.

La empresa Repsol S.A. (2023) describe que las aplicaciones del kerosene son como: Combustible a reacción en turbinas de aviación, fabricación de insecticidas, solvente y disolvente, en el caso del gasoil Frigo, Seggiani *et al.*, (2014), en su trabajo mencionaron que este combustible puede ser utilizado en motores diésel, para la calefacción o la producción de electricidad.

Pretell *et al.*, (2021) tomaron en consideración los cortes de destilado de: Nafta ligera de (20-80 °C), nafta pesada de (180-250 °C), kerosene de (180-250 °C), diésel de (250-370 °C), y el residual mayores a 370 °C, para el crudo de petróleo de Arabian Light. Reportaron los cortes de hidrocarburos en la destilación Hempel del líquido pirolítico donde obtuvo el 0.52 % de nafta ligera, 22.28 % nafta pesada, kerosene 18 %, residual 32 %, y una pérdida del 14.4 % por gases disueltos no condensables en el líquido de pirólisis en la destilación, se indica que los cortes se ubican en el rango de gasolina y diésel, la cual representa un 49.6 % del combustible líquido de pirólisis.

Equivalente resultados se obtuvo en la destilación al vacío (ASTM D1160) del combustible líquido obtenido en el proceso de pirólisis de las experiencias 2 y 5, donde se trabajó a condiciones 15 °C/min, 500 °C, 1.0 mm y 25 °C/min,500 °C y 0.5 mm respectivamente, donde los cortes obtenidos en promedio fueron de 0.3 % nafta liviana, 22.14 % nafta pesada, 33.91 % kerosene y 15.40 % gasoil, el gasoil y kerosene representan el 49.3 % del líquido de pirólisis.

En las experiencias 3 y 8, donde las condiciones de operación fueron de 15 °C/min, 600 °C, 0.5 mm y 25°C/min, 600 °C y 1.0 mm, respectivamente, mostraron un alto rendimiento en nafta, el promedio que se alcanzó fue del 24.13 %.

Gary y Handweerk (2003) mencionan que los usos de la nafta son diversos en la industria petroquímica, estos son fuente de materia prima para la producción de alquenos (etileno y propileno), también se halla en su composición los solventes orgánicos como benceno, tolueno y xileno que son utilizados como diluyentes de barnices y pinturas, otra aplicación de la nafta es la producción de gasolina de alto octanaje a través del proceso de reformado catalítico.

4.5 Propiedades físicas y composición química del producto sólido

Las muestras del producto sólido provenientes del proceso de pirólisis de NFU, son llevadas al laboratorio, para la determinación de las propiedades físicas y su composición química elemental mediante el análisis XRF (Fluorescencia de rayos X).

En la Tabla 28 se muestra las propiedades físicas del Char para cada experiencia.

Tabla 28

Propiedades físicas del producto sólido de pirólisis de NFU

N° Exp	Tamaño de partícula [mm]	Temperatura [°C]	Gradiente de calentamiento [°C/min]	Peso de sólido [g]	Humedad [%]
1	0.5	500	15	0.5	5.41
2	1.0	500	15	0.5	4.48
3	0.5	600	15	0.5	4.79
4	1.0	600	15	0.5	4.60
5	0.5	500	25	0.5	4.59
6	1.0	500	25	0.5	5.53
7	0.5	600	25	0.5	4.17
8	1.0	600	25	0.5	4.62

Nota: *Pretell et al.,(2021) reporta que el poder calorífico para los sólidos de pirólisis es 23.49 MJ/kg, Mohammad Abdul et al.,(2018) obtuvieron el valor de 31 MJ/kg y Murillo, y otros, (2006) reporta el valor de 33.59 MJ//kg.*

4.5.1 Caracterización química del producto sólido (char)

Para el análisis de la composición química de las muestras obtenidas en la pirólisis; el sólido es molido (triturado) para su homogenización de la muestra y obtener una lectura óptima con el analizador XRF Vanta. En la Tabla 29 se muestra el contenido elemental de metales en el producto sólido (Char) de cada experiencia.

Tabla 29

Contenido de metales en el producto sólido (char)

Elemento	A= 0.5mm B= 500 °C C= 15 °C/min	A= 1.0 mm B= 500 °C C= 15 °C/min	A= 0.5 mm B= 600 °C C= 15 °C/min	A= 1.0 mm B= 600 °C C= 15 °C/min
EL	86.61 %	86.63 %	86.66 %	85.50 %
S	3.51 %	3.43 %	3.13 %	3.79 %
Fe	1.52 %	0.76 %	1.97 %	1.01 %
Zn	5.31 %	5.02 %	4.97 %	5.56 %
Si	3.29 %	3.93 %	3.93 %	3.79 %
Ni	13 ppm	0	10 ppm	9 ppm
Pb	53 ppm	44 ppm	46 ppm	46 ppm
Cd	0	18 ppm	0	0
Ceniza	1.12 %	0.92 %	1.11 %	0.96 %
Elemento	A= 0.5 mm B= 500 °C C= 25 °C/min	A= 1.0 mm B= 500 °C C= 25 °C/min	A= 0.5 mm B= 600 °C C= 25 °C/min	A=1.0 mm B= 600 °C C= 25 °C/min
EL	85.52 %	85.97 %	87.77 %	87.16 %
S	3.97 %	3.48 %	3.15 %	3.25 %
Fe	1.83 %	0.78 %	1.29 %	0.79 %
Zn	5.18 %	4.81 %	4.77 %	4.35 %
Si	3.83 %	4.48 %	3.13 %	3.89 %
Ni	16 ppm	9 ppm	18 ppm	0
Pb	49 ppm	35 ppm	43 ppm	33 ppm
Cd	0	20 ppm	0	23 ppm
Ceniza	1.32 %	1.10 %	1.06 %	1.27 %

***Nota**: Elemento Ligero (EL) está compuesto en mayor proporción por carbono y en menor cantidad nitrógeno, hidrogeno y oxígeno.*

En la Tabla 29 se observa que el elemento ligero (compuesto por 90 % Carbono), es el producto de mayor cantidad en el sólido proveniente del proceso de pirólisis de NFU.

Con respecto a las cenizas encontradas en los sólidos (Char), estos se hallan en el rango de 0.92 a 1.32 %, la menor cantidad que se obtuvo, fue al trabajar a una temperatura de operación de 500 °C, 1.0 mm y 15°C/min. Acevedo y Bariocanal (2015), indicaron que, si la composición de ceniza es menor al 2 % en el producto sólido proveniente de pirólisis de NFU, este es óptimo para la producción de carbón activado de calidad.

Betancur *et al.*, (2009), reportó la composición de cenizas es del 12.69 % en el Char proveniente de la pirólisis de NFU, donde las condiciones del reactor de lecho fluidizado fueron de 600 °C, 1.0 mm y flujo N_2 del 5 l/min, donde mencionan que esto se debe a la eliminación gradual del volátil contenido en la muestra de NFU, así mismo indicaron que, si la composición de ceniza es mayor al 14.09 % en el producto sólido, este será desfavorable al ser utilizado como combustible, debido que el poder calorífico es menor.

4.6 Evaluación general del proceso de pirólisis de NFU

En la evaluación del reactor de lecho fijo, se determinó que la variable de mayor influencia significativa sobre el rendimiento de los productos provenientes del proceso de pirólisis de NFU es la temperatura de operación, debido que al trabajar a 500 °C, el rendimiento del producto líquido máximo alcanzado es 52.87 %, el rendimiento del producto sólido se mantiene en un valor promedio de 42.39 % y el rendimiento del gas alcanza un máximo de 9.92 %, caso contrario ocurre al trabajar a 600 °C el rendimiento del combustible líquido sufrió un efecto negativo y este disminuyó en promedio el 3.04 %, en caso de los rendimientos del producto sólido y gas, estos sufrieron un efecto positivo, ya que estos incrementaron en promedio del 0.52 y 2.53 % respectivamente.

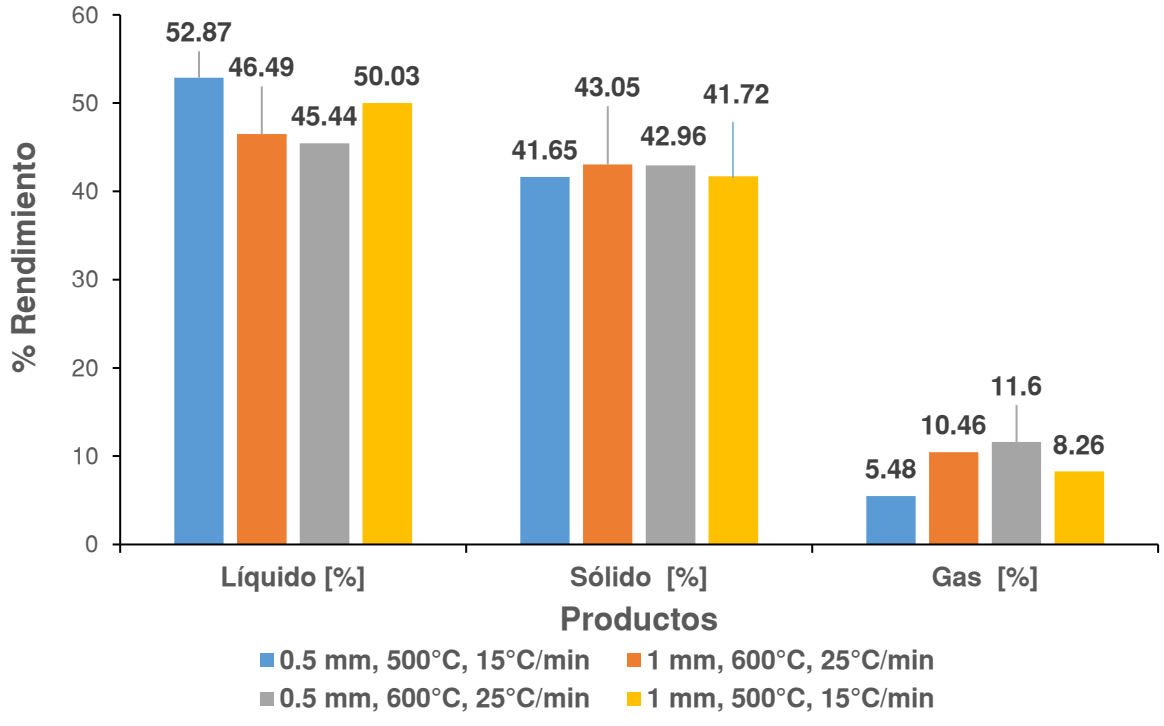
En el análisis de la gradiente de calentamiento se determinó que tiene una influencia significativa sobre el rendimiento del combustible líquido proveniente de la pirolisis de NFU, debido que al trabajar a 15 °C/min el rendimiento obtenido se encuentra en el rango de 47.82 – 52.87, en el caso del rendimiento del producto sólido este se

mantuvo en promedio el 42.39 % y en el caso del rendimiento de gas, este se halló en el rango de 5.48 – 9.36 %. Al incrementar esta variable a 25 °C/min tuvo un efecto negativo sobre el rendimiento del combustible líquido, el cual disminuyó en promedio 2.48 % y para el caso de los rendimientos del producto sólido y gas, sufrieron un efecto positivo, ya que incrementaron en promedio del 0.80 y 1.63 % respectivamente.

En el estudio del tamaño de partícula (granulometría) se determinó que su influencia es significativa con respecto al rendimiento del combustible líquido debido que al trabajar con 0.5 mm el rendimiento alcanza un máximo del 52.87 % al incrementar el tamaño de partícula de 0.5 a 1.0 mm el rendimiento disminuyó en promedio el 1.08 %; para el caso del rendimiento del producto sólido esta variable no tiene efecto ni influencia significativa, por otro lado, el rendimiento de gas obtenido fue del 5.48 % para un tamaño de partícula de 0.5 mm, al trabajar con granulometría de 1.0 mm, esta variable tiene un efecto positivo debido a que presenta un incremento promedio del 1.13 % ver Figura 39.

Figura 39

Máximos rendimientos alcanzados durante el proceso de pirólisis para cada producto



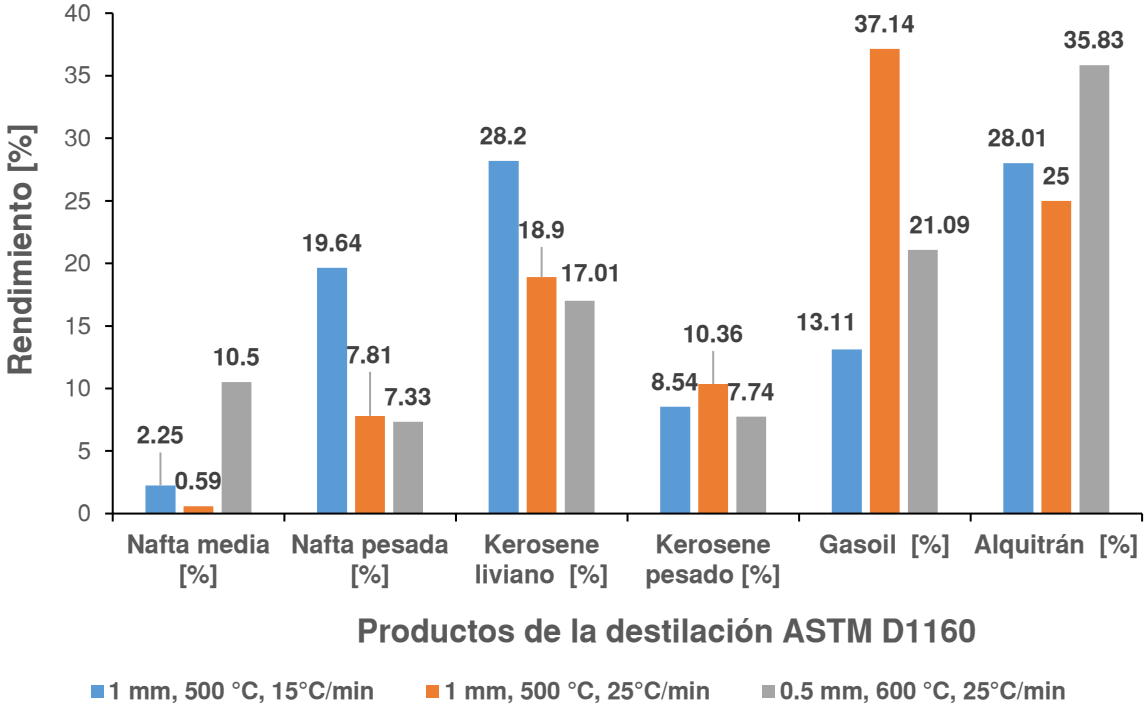
Finalmente, en la Figura 39 se observa las condiciones óptimas para lograr el mayor rendimiento en los productos deseados.

El mayor rendimiento del combustible líquido obtenido fue a 15 °C/min, 500 °C y 0.5 mm donde alcanzó en promedio el 52.87 %, en el caso del rendimiento sólido, las condiciones óptimas de operación fueron de 25 °C/min, 600 °C y 1.0 mm, donde se obtuvo un rendimiento del 43.0 %, así mismo, para obtener un mayor rendimiento del producto gaseoso las condiciones óptimas de operación fueron a 25°C/min 600 °C y 0.5 mm, donde alcanzó un máximo del 11.60 %.

En la Figura 40 se muestra el análisis del proceso de destilación al vacío ASTM D1160.

Figura 40

Máximos rendimientos alcanzados de los combustibles en la destilación ASTM D1160



se observa que, si desea obtener el mayor rendimiento de nafta y gasolina liviana, se debe trabajar a condiciones de operación de 25 °C/min, 600 °C y 1.0 mm, una presión de vacío de 60 mmHg, donde se obtuvo el rendimiento del 24.13 % (v/v), siendo este valor el máximo alcanzado con respecto a las demás experiencias.

Si el objetivo es obtener el máximo rendimiento de gasoil (diésel) para su aplicación en motores de combustión interna de vehículos o maquinarias industriales se debe trabajar a condiciones de 25 °C/min, 500 °C y 1.0 mm, el rendimiento obtenido en esta experiencia fue del 37.14 % (v/v).

Frigo, Seggiani *et al.*, (2014), mencionaron que el gasoil obtenido a partir del proceso de destilación fraccionada del producto líquido proveniente del proceso de pirólisis de NFU, mostró resultados favorables al ser comparado con el diésel obtenido a partir del crudo de petróleo, el cual fue utilizado en un motor de combustión interna, donde las revoluciones (rpm) que alcanzó el motor fueron semejantes.

CONCLUSIONES

- El efecto de la temperatura sobre el rendimiento de los productos obtenidos a partir del proceso de pirólisis de NFU, es el de mayor influencia y significancia, con un efecto negativo para el rendimiento del combustible líquido. Para el caso de los rendimientos del producto sólido y gas el efecto es positivo y significante debido al incremento de la temperatura de operación de 500 a 600 °C
- El gradiente de calentamiento de la materia prima tiene influencia considerable sobre rendimiento de los productos obtenidos a partir del proceso de pirólisis de NFU, esta variable presentó un efecto negativo y significante sobre el rendimiento del combustible líquido, y un efecto positivo en los rendimientos del producto sólido y gas al incrementar el rango de operación de 15 a 25 °C/min.
- El grado de dependencia entre el tamaño de la partícula y el rendimiento de los productos obtenidos a partir del proceso pirólisis de NFU, el cual presentó un efecto negativo y significante sobre el rendimiento del combustible líquido, en caso del rendimiento del producto sólido este no tuvo efecto ni influencia significativa y finalmente en el rendimiento de gas, esta variable presentó un efecto positivo al incrementar el tamaño de 0.5 a 1.0 mm.
- Las condiciones óptimas para obtener un mayor rendimiento en el combustible líquido son a una temperatura de operación de 500 °C, un gradiente de calentamiento de 15°C/min y una granulometría de 0.5mm, donde se alcanzó en promedio el 52.87 %, en el caso del rendimiento sólido las condiciones óptimas de operación son de 600 °C, 25°C/min y 1.0 mm, donde se obtuvo un rendimiento del 43.05 % y finalmente para obtener un mayor rendimiento del producto gaseoso las condiciones óptimas son de 600 °C, 25°C/min y 0.5 mm, este alcanzó en promedio

el 11.60 %.

- El presente trabajo de investigación tuvo como finalidad recuperar los productos de combustibles líquidos, sólidos y gas a través de las materias primas (neumático NFU), mediante el proceso de pirólisis de lecho fijo, en un reactor (Batch) . Y posterior análisis mediante la destilación al vacío (ASTM D1160).
- La pirólisis tiene un gran potencial para la obtención de productos económicamente rentables como: Combustibles, insumos para la petroquímica, diseño de productos entre otros.
- Mediante la manipulación de parámetros como la temperatura y tamaño de partícula se puede direccionar a la obtención de productos con características específicas de acuerdo a lo que se desee obtener.
- Los residuos de los neumáticos fuera de uso, constituyen una fuente potencial, útil de combustibles y materias primas para otros procesos.

RECOMENDACIONES

- Se recomienda utilizar un horno eléctrico automatizado para mejorar el control de la temperatura durante el proceso de pirólisis de NFU.
- Realizar ensayos de pirólisis utilizando un tamaño de partícula mayor al 1.0 mm y gradiente de calentamiento mayor al 25 °C/min a fin de comparar los resultados con los obtenidos en la presente investigación.
- Se recomienda realizar ensayos para la desulfuración presente en la pirólisis
- Se recomienda realizar ensayos a presión mayores de 2 atm con la finalidad de comparar los resultados obtenidos en el presente trabajo.
- Se recomienda realizar ensayos para la obtención de carbón activado a partir del producto sólido (char), proveniente de pirólisis de NFU con el fin de darle un valor agregado a este producto.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

Abbas, A., Azizi, F., Zeaiter, J., & Ismail, H. Y. (2016). Pyrolysis of waste tires. *A modeling and parameter estimation study using Aspen Plus*. Obtenido de https://doi.org/10.1016/j.wasman.2016.10.024

Abril, E., & Ortiz, S. (2015). *Evaluación del efecto del tamaño de partícula y la temperatura en las características físicas y químicas del sólido carbonoso resultante de la pirólisis de caucho de llantas usadas en el reactor de arrastre.* Bogotá: Universidad Jorge Tadeo Lozano.

Acevedo, B., & Bariocanal, C. (2015). Texture and Surface Chemistry of Activated Carbons Obtained from Tyre Wastes. *Instituto Nacional del Carbón INCAR-CSIC-España*, 275-283. doi:10.1016/j.fuproc.2015.02.009

AET. (s.f.). *Atmospheric Equivalent Temperature.* Recuperado el © COPYRIGHT 2020-2023, de https://processfunda.com/atmospheric-equivalent-temperature/

Álvarez Arredondo, I. (2014). *El Comercio Goodyear Perú espera incrementar en 5% sus ventas.* Obtenido de https://elcomercio.pe/economia/negocios/goodyear-peru-espera-incrementar-5-ventas-2014-309238

Anh Tuan Hoang, T. H. (27 de Marzo de 2020). La pirólisis de llantas de desecho como una estrategia potencial para la gestión de residuos. *Fuentes de energía, Parte A: Recuperación, utilización y efectos ambientales*, 19. doi:https://doi.org/10.1080/15567036.2020.1745336

Antoniou, N., & Zabaniotou, A. (2015). Experimental proof of concept for a sustainable End of Life Tyres pyrolysis with energy and porous materials production. *ELSEVIER*, 323-326. doi:https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2015.03.101

Arabiourrutia, M., & Lopez, G. (2007). Product distribution obtained in the pyrolysis of tyres in a conical spouted reactor. *Efecto del Uso de Catalizadores Ácidos Sobre la distribucion de productos en la Pirolisis de Neumaticos*, 5271-5275.

Arias Gonzales, J. L. (2020). Proyecto de Tesis. Arequipa: Episteme. Obtenido de http://repositorio.concytec.gob.pe/handle/20.500.12390/2236

Arya, S., Sharma, A., Rawat, M., & Agrawal, A. (2020). Tyre pyrolysis oil as an alternative fuel: A review. Materials Today: Proceedings, 28. doi:https://doi.org/10.1016/j.matpr.2020.04.797

ASTM D1160. (2018). *Vacuum Distillation Apparatus by Instrument B/R.* Obtenido de https://brinstrument.com/es/astm-d1160

ASTM D2892. (s.f.). *Standard Test Method for Distillation of Crude Petroleum (15-Theoretical Plate Column).* Obtenido de https://www.astm.org/d2892-20.html

ASTM D388. (s.f.). *Standard Classification of Coals by Rank.* Obtenido de https://www.astm.org/d0388-19a.html

ASTM D7042. (s.f.). *Standard Test Method for Dynamic Viscosity and Density of Liquids by Stabinger Viscometer (and the Calculation of Kinematic Viscosity).* Obtenido de https://www.astm.org/standards/d7042

ASTM D93. (2020). *Controlador del Punto de Inflamación Pensky-Martens: PMA (Anton Paar).* Obtenido de https://www.anton-paar.com/co-es/productos/detalles/pma/

Avsenik, L. D. (2016). Uso de producto de pirólisis lenta de neumáticos modificado como rejuvenecedor para betun envejecido. *Producción de combustibles similares a la gasolina y el diésel a partir de aceite de neumáticos de desecho mediante el uso de catalizadores*, 456-468. doi:10.1016 / j.conbuildmat.2016.05.140.

Aydin, H., & IIkilic, C. (2012). Optimización de la producción de combustibles a partir de neumáticos de vehículos de desecho mediante pirólisis y parecido al combustible diesel mediante varios métodos de desulfuración. 102, 605-612.

Baray, M. (2016). Pirolisis a Baja Temperatura de la Pomasa de Manzana para la Producción de Biocombustibles.

Batistella, C. B., Wolf Maciel, M. R., Maciel Filho, R., Winter, A., Gomes, A., Medina, L., & Kunert, R. (2015). Heavy Petroleum Fractions Characterization: a new approach Through Molecular Distillation. *ResearchGate*. Obtenido de https://www.researchgate.net/publication/237298539_HEAVY_PETROLEUM_FRACTIONS_CHARACTERIZATION_A_NEW_APPROACH_THROUGH_MOLECULAR_DISTILLATION

Beecham, M. (2014). BEECHAM, M. Global market review of automotive tyres.

Beliczky, L. S. (2007). Enciclopedia de Salud y Seguridad en el trabajo. *Industrias del Caucho, Industrias Químicas.*

Betancur, M., Martinez, J., & Murillo, R. (2009). Producción de carbón activado por degradación termoquímica de neumáticos de desecho con CO2. *Elsevier, 168*(2-3), 882-887. doi:https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2009.02.167

Bollaín Pasto, C., & Vicente Agulló, D. (2020). Presencia de microplásticos en aguas y su potencial impacto en la salud pública. *Scielo,* 2-6.

Bonilla, P. A. (2019). Compendio de técnicas de pirólisis para el reaprovechamiento energético de llantas usadas.

Bosques, G. (2014). Sintesis 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. *Centro de investigación en Química aplicada.*

Bridgwanter. (1999). Modelado CFD de la pirólisis rápida de biomasa en reactores de lecho fluidizado. Parte B : Transporte de calor, cantidad de movimiento y masa en lechos fluidizados burbujeantes. *Chemical Engineering Science*, 1036-1045.

Bustamante B, O., & Reyes S., C. (1993). Situación y Perspectivas de la Industria del Caucho en el Mundo y en Colombia. *Revista Facultad Nacional De Agronomía*, *46*, 71-106.

Cáceres Huambo, B. N. (2009). *Análisis de Datos y Diseños Experimentales Aplicados en Investigación.* Cusco: Universidad Nacional de San Antonio Abad del Cusco.

Campos, G. A., & Arrazola, F. d. (2017). Estudio Preliminar de la Pirólisis Catalítica de Desechos Plásticos para la Obtención de Combustibles.

Cano Serrano, E., Cerezo Gracia, L., & Urbina Garcia, M. (2007). valorización material y energética de neumáticos fuera de uso. *CEIM- Dirección General de Universidades e Investigación*, 9-11. Obtenido de www.madrimasd.org

Castro, G. (2008). Materiales y compuestos para la industria del neumático-Departamento de ingeniería Mecánica F.I.U.B.A. *Industria del neumático*.

Castro, G. (2016). Materiales y compuestos para la industria del neumático. Departamento de Ingeniería mecánica F.I.U.B.A. 2-4.

Chen, F. (2002). Studies on the thermal degradation of cis-1,4-polyisoprene. *Fuel*, *81*, 2071-2077.

Chun, Z., Rongcheng, W., & Guangwen, X. (2020). Coal Pyrolysis for High-Quality Tar in a Fixed-Bed Pyrolyzer Enhanced with Internals. *Energy & Fuels*, 1-9. Obtenido de https://doi.org/10.1021/ef401546n

Czajczynska, D., Krzyzynska, R., Jouhara, R., & Spencer, N. (2017). Use of pyrolytic gas from waste tire as a fuel. *review. Revista Energy, 134,* 1121-1131. doi:http://dx.doi.org/10.1016/j.energy.2017.05.042

Díez, C., Martínez, O., Calvo, L., Cara, J., & Morán, A. (2004). Pirólisis de neumáticos. Influencia de la temperatura final del proceso sobre las emisiones y el poder calorífico de los productos recuperados. *Elsevier, 24*(5), 463-469. doi:https://doi.org/10.1016/j.wasman.2003.11.006

Dzuhairy Ab., T., Hamidah Abd, H., Raja Razuan Raja, D., Muzafar, Z., Nor Afifah, K., & Ahmad Naim, A. (2020). Insights into pyrolysis of waste tire in fixed bed reactor: Thermal behavior. *ELSEVIER*, 2-9. doi:https://doi.org/10.1016/j.matpr.2020.01.569

Environmental Protection Agency (EPA). (7 de Abril de 2017). Obtenido de Estados Unidos. Scrap Tyres, Basic Information.: https://www3.epa.gov/epawaste/conserve/materials/tyres/basic.htm

Estudios y Servicios Petroleros S.R.L. (2014). *GPA.* Obtenido de http://oilproduction.net/files/GPA%20-%20Nota%20Tecnica%2087.pdf

Fernandez-Colino, A., Aylon, E., Navarro, M., Murillo, R., Garcia, T., & Mastral, A. (2008). Waste Tire Pyrolysis: Comparison between Fixed Bed Reactor and Moving Bed. *APPLIED CHEMISTRY*, 4029–4033.

Flores, D. C. (2020). *Diseño de Planta Trituradora de Neumáticos Fuera de Uso para la Obtención de sus Agregados Industriales en la ciudad de Piura* (Vol. 35). Piura. doi:doi: /10.17843/rpmesp.2018.352.3719

Fonseca Jaramillo, W. D. (2016). *Evaluación de un reactor de lecho fluidizado en el proceso de pirólisis catalítica usando desecho de caucho de llanta.* Bogotá.

Fonseca, D. (2010). Tecnologías limpias y recursos renovables. *Heat Transferir in a dranft dranfer in a dranft tube spoutd bed with botton solids feed*, 152-162.

Frigo, S., Seggiani, M., Puccini, M., & Vitolo, S. (2014). Liquid fuel productión from waste tyre pyrolysis and its utilisation in a Diesel engine. *ELSEVIER*, 399-408. doi:http://dx.doi.org/10.1016/j.fuel.2013.08.044

Gary, J., & Handweerk, G. (2003). Refino de Petroleo: Tecnologia y Economia. España: REVERTÉ.

Golshan , M., Fatola , F., & Farhad, K. (2009). Kinetic modeling of pyrolysis of scrap tires. *ELSEVIER*, 2-7.

González, J. F., Encinar, J. M., Canito, J. L., & Rodriguez, J. J. (2001). Pirólisis de resíduos de neumáticos de automóviles. Influencia de las variables operativas y estudio cinético. *ELSEVIER, 58-59*, 667-683. doi:https://doi.org/10.1016/S0165-2370(00)00201-1

Grados, A. (2018). La Importancia de una Regulación Especial para la Gestión de los Neumáticos Fuera de Uso en el Perú. Obtenido de https://tesis.pucp.edu.pe/repositorio/bitstream/handle/20.500.12404/15644/Grados_Mitteenn_Importancia_regulaci%C3%B3n_especial1.pdf?sequence=1

Hüseyin, A., & Cumali, I. (2012). Optimization of fuel production from waste vehicle tires by pyrolysis and resembling to diesel fuel by various desulfurization methods. *ELSEVIER*, 605-612.

Islam, M. R., Islam, M. N., Mustafi, N. N., Rahim, M. A., & Haniu, H. (2013). Thermal recycling of solid tire wastes for alternative liquid fuel: the first commercial step in Bangladesh. *ScienceDirect, 56*, 573-582. doi:https://doi.org/10.1016/j.proeng.2013.03.162.

Kar, Y. (2011). Catalytic pyrolysis of car tyre waste using expanded perlite. *Waste Management, 31*, 1772-1782.

Ko, D. C., Mui, E. L., Lau, K. T., & CKay, M. (2004). *Production of activated carbons from waste tire - Process design and economical analysis.*

Kumaravel, S. T., & Murugesan, A. (2016). *Tyre pyrolysis oil as an alternative fuel for diesel engines-A review. Renewable and Sustainable Energy Reviews.*

Laresgoiti, M. (2010). Verifican la Validez de la Pirólisis como Técnica de Reciclado. Obtenido de http:// www.agenciasinc.es/Noticias/Verifican-la-validez-de-la-pirolisi-como-tecnica-de reciclado-de-neumaticos

Laresgoiti, M., Caballero, B., DE Marco, I., Torres, A., Cabrero, M., & Cnomón, M. (2004). Journal of Analytical and Applied Pyrolysis. *Journal of Analytical and Applied Pyrolysis*, 917-934.

Larsen, M. B. (19 de julio-agosto de 2006). Devolatilization characteristics of larges particles of tyre rubber. *ELseiver, 85*, 1335-1345. doi:10.1016/j.combustible.2005.12.014

Li, S. Q., Yao, Q., Chi, Y., Yan , J. F., & Cen, K. F. (2004). Pirólisis a escala piloto de llantas de desecho en un reactor de horno rotatorio continuo. *ACS Publications- Chemistry for Life*, 5133–5145. doi:https://doi.org/10.1021/ie030115m

Llanos, J., Luján , S., & Ponce, M. (2017). *Viabilidad de la creación de una empresa recicladora y trituradora de llantas en desuso para su comercialización en el mercado peruano.* Lima, Perú.

López, F. A., Centeno, T. A., Alguacil, F. J., & Lobato, B. (2011). Distillation of granulated scrap tires in a pilot plant. *Elsevier, 190*(1-3), 285-292. doi:https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2011.03.039

López, F. a.-D. (2015). *Situación Actual del Tratamiento de Neumáticos fuera de uso y Posibilidades de Obtención de Negro de Humo de Alta Pureza. Centro Nacional de Investigaciones Metalúrgicas (CENIM).*

Luz L, A. C., Scatolim R, C. F., Álvarez M, M. O., & Dos R, C. A. (06 de agosto de 2008). Effect of Operating Conditions on Scrap Tire Pyrolysis. *Scielo-ResearchGate*(3), 359-363. doi:10.1590/S1516-14392008000300021

M. Rofiquil, I., M.S.H.K., T., & H., H. (2008). Production of liquid fuels and chemicals from pyrolysis of Bangladeshi bicycle/rickshaw tire wastes. *Elsevier*, 96-109.

Magallanes, C., & Guillen , I. (2014). *Experiencia en el Tratamiento de Neumáticos fuera de Uso en IberoAmérica.* Lima, Perú.

Martinez Covaleda, H. J. (Marzo de 2005). Cadena del caucho en Colombia.

Martínez, J., Puy, N., Murillo, R., García, T., Navarro, M., & Mastral, A. (2013). Waste tyre pyrolysis–A review. In Renewable and Sustainable Energy. *Elsevier, 23*, 179-213. doi:https://doi.org/10.1016/j.rser.2013.02.038

Mckendry, P. (2002). Energy production from biomass. *overview of biomass*.

Mejía, S., & Upegi, S. (2021). La Pirólisis y Otros Métodos para el Aprovechamiento de Resíduos de Neumáticos como Fuente de Energía para la Industria.

Meza, I. (2014). Diseño de una Planta para la Obtención de Carbón Activado a partir de Neumáticos de Automóvil Fuera de Uso (Nfu's).

Miandad, R., Barakat, M. A., Rehan, M., Aburiazaiza, A. S., Gardy, J., & Nizami, A. S. (2018). Effect of advanced catalysts on tire waste pyrolysis oil. *Elsevier, 116*, 542-552. doi:https://doi.org/10.1016/j.psep.2018.03.024

MINAN. (2021). *Régimen Especial de Gestión y Manejo NFU.*

Minitab, LLC. (2021). *https://www.minitab.com*. Obtenido de https://www.minitab.com

Mohammad Abdul, A., M. A., R., & Halim, M. (2018). Design, fabrication and performance test of a fixed bed batch type pyrolysis plant with scrap tire in Bangladesh. *Elsevier, 11*(4), 311-316. doi:https://doi.org/10.1016/j.jrras.2018.05.001

Murcia, J. C., & Romero, A. R. (2016). *Materiales y compuestos para la industria del neumático. Departamento de Ingeniería mecánica F.I.U.B.A.* Bogotá, Colombia: Fundación Universidad de América.

Murillo, R., Aylón, E., Navarro, M. V., Callén, M. S., Aranda, A., & Mastral, A. M. (2006). The application of thermal processes to valorise waste tyre. *SciencieDirect*, 143-147. Obtenido de https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0378382005001591

Navarro, M., & R., M. (2007). Pirólisis Catalítica de Polietileno. Estudio de la Evolución de la Distribución de Productos y Desactivación del Catalizador.

Nguyen., A. T. (Marzo de 16 de 2020). La pirólisis de llantas de desecho como una estrategia potencial para la gestion de residuos. (U. d. aFacultad de Ingeniería Mecánica, Ed.) *Fuentes de energía, Parte A: Recuperación, utilización y efectos ambientales*, 1-19. doi:10.1080 / 15567036.2020.1745336

Ochoa Mariño, A., & Mahecha Suarez, D. P. (2018). *Evaluación del proceso de pirólisis para la obtención de combustibles a partir de llantas usadas.* Bogotá: Universidad Libre Facultad de Ingeniería, Departamento de Ingeniería Ambiental. Obtenido de https://hdl.handle.net/10901/15885

Olivares, D. (2016). Planta de reciclaje de neumáticos de caucho Comercialización de miga de caucho Plan de Negocios para postular a Magister MBA. *Osinergmin*.

Ordóñez, J., Moreano, & M., N. (2017). Modelamiento de una Unidad de Micro reacción de FCC para Analizar el Efecto del Catalizador. Instituto Politécnico Nacional.

Ospina, J. A., & Villada, S. G. (2011). Methods to characterize liquid and gas combustibles. *Lámpsakos*, 23-31. Obtenido de https://www.redalyc.org/articulo.oa?id=613965338008

Özbay N., E. A.-V. (2008). *Characteriation of bio-oil obtained from fruit pulp pyrolysis. Energy.*

Poblete. (2013). Pirólisis Catalítica de Desechos Plásticos Mediante Zeolitas Mediante Zeolitas.

Prabir, .. B. (2010). Biomass gasification and Pyrolysis. Practical Design and theory. *Practical Design and theory*, 72.

Pretell, V., Ramos, W., Astorayme, M., & Pilco, A. (July de 2021). Production of Liquid Fuels by Vacuum Pyrolysis of Used Tires. *Proceeding of the LACCEI International Multi-Conference for Engineering, Education and Technology*. doi:https://doi.org/10.18687/LACCEI2021.1.1.70

Pretell, V., Ramos, W., Astorayme, M., & Pilco, A. (July de 2021). Production of Liquid Fuels by Vacuum Pyrolysis of Used Tires. *Proceeding of the LACCEI International Multi-Conference for Engineering, Education and Technology*. doi:https://doi.org/10.18687/LACCEI2021.1.1.70

Quek, A. e. (2013). Liquefaction of waste tyres by pyrolysis for Oil and chemicals. *Journal of Anaytical and Applied Pyrolysis, 101*, 1-16.

Raghuram, K., Hemanth , B., & Shijo, T. (2018). Scope of Pyrolysis Process as a Sustainable Method to Dispose Waste Tires: A Review. *School of Nano Science and Technology, NIT Calicut, Calicut 673601.*, 2-15.

Rahman, M., & Aziz, M. (2018). Waste tire solar pyrolysis: optimization of operating parameters. *Springer*, 1207-1215. doi:https://doi.org/10.1007/s10163-017-0686-1

Ramírez Garzón, V. A. (2012). Creación de una empresa dedicada al reciclaje de llantas a través de su trituración. *[Trabajo de grado, Universidad EAN]*. Obtenido de http://hdl.handle.net/10882/2513

Repsol S.A. (2023). *REPSOL* . Obtenido de https://www.repsol.com/es/productos-y-servicios/aviacion/jp-8/index.cshtml

Reyes, E. (2015). *Biodegradación del Caucho por Alternaria alternata.*

Rodríguez, I., Rodríguez, I. M., Laresgoiti, M. F., Cabrero, M. A., Torres, A., Cabrero, M. A., & Chomon, M. J. (2001). Pyrolysis of scrap tires. Fuel Processing Technology. *ScienceDirect, 71*, 9-22.

Saksham, A., Abhishek, S., Manish, R., & Alok, A. (2020). Elsevier. *Tyre pyrolysis oil as an alternative fuel: A review*, 2481-2484. doi:https://doi.org/10.1016/j.matpr.2020.04.797

Sánchez, M. (2017). Diagnóstico de Sustentabilidad de neumáticos Fuera de Uso (NFU).

Sebastián, W., & Urrego, P. (2019). Análisis de Ciclo de Vida de la Pirólisis como alternativa de gestión de resíduos de llantas: Una revisión.

Serrano, E. G. (2007). *Valorización material y energética de neumáticos fuera de uso.*

Tamara Menares, J., Romina Romero, P., & Arteaga Pérez, L. (2019). Waste tires pyrolysis kinetics and reaction mechanisms explained by TGA and Py-GC/MS under kinetically-controlled regime. *Elsevier*, 21-29.

TresPM. (2020). *TresPM.* Obtenido de https://www.trespm.mx/eco/neumaticos-indispensables-para-la-vida-cotidiana-pero-extremadamente-contaminantes

Vargas Vilca, M. M. (2019). *Evaluación de la pirólisis térmica y de la catalítica usando zeolitas volcánicas como catalizador de desechos plásticos.* Arequipa: Universidad Nacional de San Agustin de Arequipa.

Vásquez Morales, J. A. (2018). *Diseño de planta piloto para pirólisis con reactor tipo Spouted bed de neumáticos usados.* Quito. Obtenido de http://www.dspace.uce.edu.ec/handle/25000/16661

Velarde, R., Artemio, J., Lazarte, G., Enrique, C., Rodríguez, D., & Luis, J. (2018). Plan de negocio para la implementación de una planta de reciclaje de llantas usadas mediante el proceso de Pirólisis. Obtenido de http://hdl.handle.net/10757/624919

Wang, Y. L. (2017). Asistido por microondas co-pirólisis catalítica rápida de aserrín de bambú y neumáticos de desecho para la producción de bioaceite. *Revista de pirólisis analítica y aplicada123*, 224-228.

Wei-Cheng, W., Chi-Jeng, B., & Chi-Tung, L. (2016). Alternative fuel produced from thermal pyrolysis of waste tires and its use in a DI diesel engine. *ELSEVIER*, 330-338. doi:https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2015.09.056

Williams, P. T., Brottrill, R. P., & Cunliffe, A. M. (1998). Combustion of Tyre Pyrolysis Oil. *Elsevier, 76*(4), 291-301. doi:https://doi.org/10.1205/095758298529650

Williams, P. y. (2002). Pirólisis catalítica de neumáticos: Influencia de la temperatura del catalizador. *Combustible81*, 2425-2434. doi:10.1016 / S0016-2361 (02) 00196-5.

APÉNDICE

Apéndice 1. Matriz de consistencia

"EVALUACIÓN DEL RENDIMIENTO DEL REACTOR DE PIRÓLISIS DE LECHO FIJO, PARA LA OBTENCIÓN DE COMBUSTIBLES A PARTIR DE NEUMÁTICOS FUERA DE USO"

Problema	Objetivo	Variable/ Dimensión	Metodología
General	General		
- ¿Cuál es el rendimiento del reactor de pirólisis de lecho fijo, para la obtención de combustibles a partir de lo neumáticos fuera de uso? Específico - ¿Cuál es el grado de relación entre el efecto de la temperatura y el rendimiento de	Evaluar el rendimiento del reactor de pirolisis de lecho fijo, para la obtención de combustibles a partir de los neumáticos fuera de uso. Específico Determinar el grado de relación entre el efecto de la temperatura y el rendimiento de	Variables independientes -Gradiente de calentamiento (°C/min) -Temperatura (°C) -Tamaño de partícula (mm)	Tipo de investigación: -La investigación es de tipo cuantitativo Diseño de investigación -El diseño de investigación es experimental.

los productos obtenidos a partir del proceso de pirólisis? ¿Cuál es el grado de relación entre el efecto de la gradiente de calentamiento de la materia prima y el rendimiento de los productos obtenidos a partir del proceso de pirólisis? - ¿Cuál es el grado de relación entre el tamaño de la partícula y el rendimiento de los productos a partir del proceso de pirólisis?.	los productos obtenido a partir del proceso de pirólisis. Evaluar el grado de relación entre el efecto de la gradiente de calentamiento de la materia prima y el rendimiento de los productos obtenidos a partir del proceso de pirolisis. Determinar el grado de relación entre el tamaño de la partícula y el rendimiento de los productos obtenidos a partir del proceso de pirólisis.	Variables dependientes -Rendimientos de los productos obtenidos en las fases de gas, líquido y sólido (y_i, x_i, z_i) Variables intervinientes -Temperatura ambiente (°C) - Presión atmosférica (atm) Dimensiones -Tamaño del equipo	Alcance de la investigación -El alcance de la investigación es de tipo Descriptiva, analítica y proyectiva.

Nota: *En la tabla de matriz de consistencia se muestra los factores para la evaluación del rendimiento del reactor de pirólisis de lecho fijo para la obtención de combustibles a partir de NFU.*

Apéndice 2. Análisis del efecto en una hoja de cálculo Excel

Para el análisis de los datos experimentales se utiliza una herramienta estadística como la distribución de Fisher, de esta manera poder evaluar el efecto de cada variable sobre el rendimiento de los productos obtenidos durante el proceso de pirólisis, las ecuaciones a utilizar fueron tomadas de autor y para ello también se realiza una distribución sobre la interacción de las variables para un diseño factorial de 2^3 como se muestra en la tabla A**.**

Tabla A

Matriz de diseño

Niveles	A	B	C	AB	AC	BC	ABC
1	-	-	-	+	+	+	-
A	+	-	-	-	-	+	+
B	-	+	-	-	+	-	+
AB	+	+	-	+	-	-	-
C	-	-	+	+	-	-	+
AC	+	-	+	-	+	-	-
BC	-	+	+	-	-	+	-
ABC	+	+	+	+	+	+	+

$$S_{a_i} = \sum_{i=1}^{3} X_i \quad , donde \quad a_i = 1,2,3 \dots ,8 \qquad \text{Ec. (2.1)}$$

Para determinar el contraste de cada nivel, se toma en consideración el signo (+1 o –1) de la tabla A, según la interacción que estos presenten en las siguientes ecuaciones:

$$C_A = -S_{a_1} + S_{a_2} - S_{a_3} + S_{a_4} - S_{a_5} + S_{a_6} - S_{a_7} + S_{a_8} \qquad \text{Ec. (2.2)}$$

$$C_B = -S_{a_1} - S_{a_2} + S_{a_3} + S_{a_4} - S_{a_5} - S_{a_6} + S_{a_7} + S_{a_8} \qquad \text{Ec. (2.3)}$$

$$C_{AB} = +S_{a_1} - S_{a_2} - S_{a_3} + S_{a_4} + S_{a_5} - S_{a_6} - S_{a_7} + S_{a_8} \qquad \text{Ec. (2.4)}$$

$$C_C = -S_{a_1} - S_{a_2} - S_{a_3} - S_{a_4} + S_{a_5} + S_{a_6} + S_{a_7} + S_{a_8} \qquad \text{Ec. (2.5)}$$

$$C_{AC} = +S_{a_1} - S_{a_2} + S_{a_3} - S_{a_4} - S_{a_5} + S_{a_6} - S_{a_7} + S_{a_8} \qquad \text{Ec. (2.6)}$$

$$C_{BC} = +S_{a_1} + S_{a_2} - S_{a_3} - S_{a_4} - S_{a_5} - S_{a_6} + S_{a_7} + S_{a_8} \qquad \text{Ec. (2.7)}$$

$$C_{ABC} = -S_{a_1} + S_{a_2} + S_{a_3} - S_{a_4} + S_{a_5} - S_{a_6} - S_{a_7} + S_{a_8} \qquad \text{Ec. (2.8)}$$

La ecuación 2.9, determina el valor del efecto de cada variable e interacciones entre cada variable, durante el proceso de pirólisis.

$$E_q = \frac{C_q}{n * 2^{(k-1)}}, donde \;\; q = A, B, C, AB, AC, BC, ABC \qquad \text{Ec. (2.9)}$$

A partir del contraste se determina la suma de cuadrados que está dada por la ecuación 2.10.

$$SS_q = \frac{C_q^2}{n * 2^k} \qquad \text{Ec. (2.10)}$$

Con la ecuación 11, se determinar la suma de cuadrados total (SST)

$$SST = \sum Y_i^2 - \frac{(\sum Y_I)^2}{N} \qquad \text{Ec. (2.11)}$$

$$SS_{error} = SST - SS_A - SS_B - SS_{AB} - SS_C - SS_{AC} - SS_{BC} - SS_{ABC} \qquad \text{Ec. (2.12)}$$

Finalmente, para determinar el estadístico de Fisher (F), se debe conocer los grados libertad (G) para cada interacción y determinar la media de cuadrados (MS).

$$G_A = G_B = G_{AB} = G_C = G_{AC} = G_{BC} = G_{ABC} = 1 \;\; y \;\; G_{error} = 16 \qquad \text{Ec. (2.13)}$$

$$MS_q = \frac{SS_q}{G_q} \qquad \text{Ec. (2.14)}$$

Ahora para calcular MS_{error}, se describe en la ecuación 2.15

$$MS_{error} = \frac{SS_{error}}{G_{error}} \qquad \text{Ec. (2.15)}$$

Para hallar el valor estadístico de Fisher, se utiliza la ecuación 2.16

$$F = \frac{MS_q}{MS_{error}} \qquad \text{Ec. (2.16)}$$

Este valor de F se busca en la tabla de Distribución F de Fisher que se encuentra en el anexo E, también se puede calcular en una hoja de Excel con el siguiente comando:

$$Valor - p = DISTR.F.CD\ (F;\ Gq: G_{error}) \qquad \text{Ec. (2.17)}$$

El nivel de confiabilidad de nuestro análisis de regresión se da en la siguiente ecuación 2.18

$$Confiabilidad = 1 - (valor - p) \qquad \text{Ec. (2.18)}$$

En la tabla B se muestra el matriz de diseño.

Tabla B

Matriz de diseño

N° Experiencia	Diseño	Matriz de Diseño		
		X_1	X_2	X_3
1	1	-1	-1	-1
2	A	+1	-1	-1
3	B	-1	+1	-1
4	AB	+1	+1	-1
5	C	-1	-1	+1
6	AC	+1	-1	+1
7	BC	-1	+1	+1
8	ABC	+1	+1	+1

Fuente: Dzuhairy Ab., y otros. (2020).

En la tabla C, se observa las combinaciones de los niveles experimentales, para fines de comparación con la bibliografía se toma un punto de referencia (PC) que toma los valores de: A= 0.5 mm; B=600 °C; C=15 °C/min

Tabla C

Combinaciones de los niveles experimentales

N° Experiencia	Diseño	Combinaciones de Niveles		
		A	B	C
1	1	15	500	0.5
2	A	25	500	0.5
3	B	15	600	0.5
4	AB	25	600	0.5
5	C	15	500	1.0
6	AC	25	500	1.0
7	BC	15	600	1.0
8	ABC	25	600	1.0

Las variables A, B y C fueron codificas por X_1, X_2 y X_3 respectivamente y la codificación de cada factor varia de +1 a -1. Posteriormente se realizó el cambio de variables mediante las siguientes ecuaciones:

$$X_i = \frac{A - h_i}{j_i} \qquad \text{Ec. (2.19)}$$

$$h_i = \frac{m_i + n_i}{2} \qquad \text{Ec. (2.20)}$$

$$j_i = m_i - n_i \qquad \text{Ec. (2.21)}$$

El modelo matemático para un diseño factorial de 2 niveles y 3 factores es el siguiente:

$$Y = b_0 + b_1X_1 + b_2X_2 + b_3X_3 \qquad \text{Ec. (2.22)}$$

Remplazando la ecuación 2 en 5 se obtiene la siguiente ecuación de regresión:

$$Y = b_0 + b_1\left(\frac{A - h_1}{j_1}\right) + b_2\left(\frac{B - h_2}{j_2}\right) + b_3\left(\frac{C - h_3}{j_3}\right) \qquad \text{Ec. (2.23)}$$

Donde:

n_i y m_i: valores de las variables

h_i y j_i: Constantes de codificación.

Apéndice 3. Materiales y equipos

- **Materiales**

- Bagueta
- Gradillas
- Mortero
- Pizeta
- Pinzas
- Desecador
- Papel filtro watman #42
- Papel indicador de pH pampeha
- Soporte universal
- Tamices tyler (# 14, 18 y 40 malla)
- Thinner acrílico
- Alcohol isopropílico

- Cinta métrica
- Jeringa de plástico de laboratorio de 10 ml
- Manguera de alta presión de ¼ pulg.
- Válvula de paso x2 acero inox. ros. C-304 de ¼
- Válvula esférica pesada de ½ pulg
- Niple de acero 306 de ¼ y ½ pulg
- Cinta teflón PTFE Gas TF-900
- Guantes de látex y cuero
- Isopo grueso de 30 cm
- Abrazadera metálica de engranaje de ¼ pulg.
- Abrazadera de acero inox. de 2” pulg.
- Niple ½x4 de acero inox. 304
- Niple ¼ pulg.
- Bushing hexagonal acero inox. 304, de1/4 pulg. x 1/8 pulg.
- Bushing hexagonal acero inox. 304, de1/2 pulg. x 1/2 pulg.
- Unión, acero inox. 304, de ½ pulg. x ½ pulg.
- Tee de acero inox. 306 de ¼ pulg
- Tee de acero inox. de 306, 1/2 pulg. x 1/2 pulg. x 1/2 pulg.
- Codo de 45ø bronce de ¼ pulg
- Codo de 45ø de acero inox. 306 de ½ pulg
- Codo de 90ø acero inox. 306 de ½ pulg
- Tapón de acero inox. tipo 316, compresión, para tubo de 3/8 pulg OD

- Conector de compresión de tubo de doble virola 3/8, (9.52mm) OD, adaptador de tubería de acero inox .tipo 316.
- Reductora campana de acero inox. de 304 de ½x1/4 pulg
- Reductora campana de acero inox. de 304 de 1/4x1/4 pulg
- Tee de acero inoxidable 304, de 1/4 pulg
- Sellador de empaques de alta temperatura (mega grey)
- Fibra de asbesto ferolite 333
- Resistencia eléctrica horno variable (1500-2000 watt)
- Alambre Cantal N°12
- Alambre N° 16 galvanizado
- Mechero bunsen
- Aislante térmico de fibra de vidrio
- Respiradores de doble vía para gases y vapores 3M

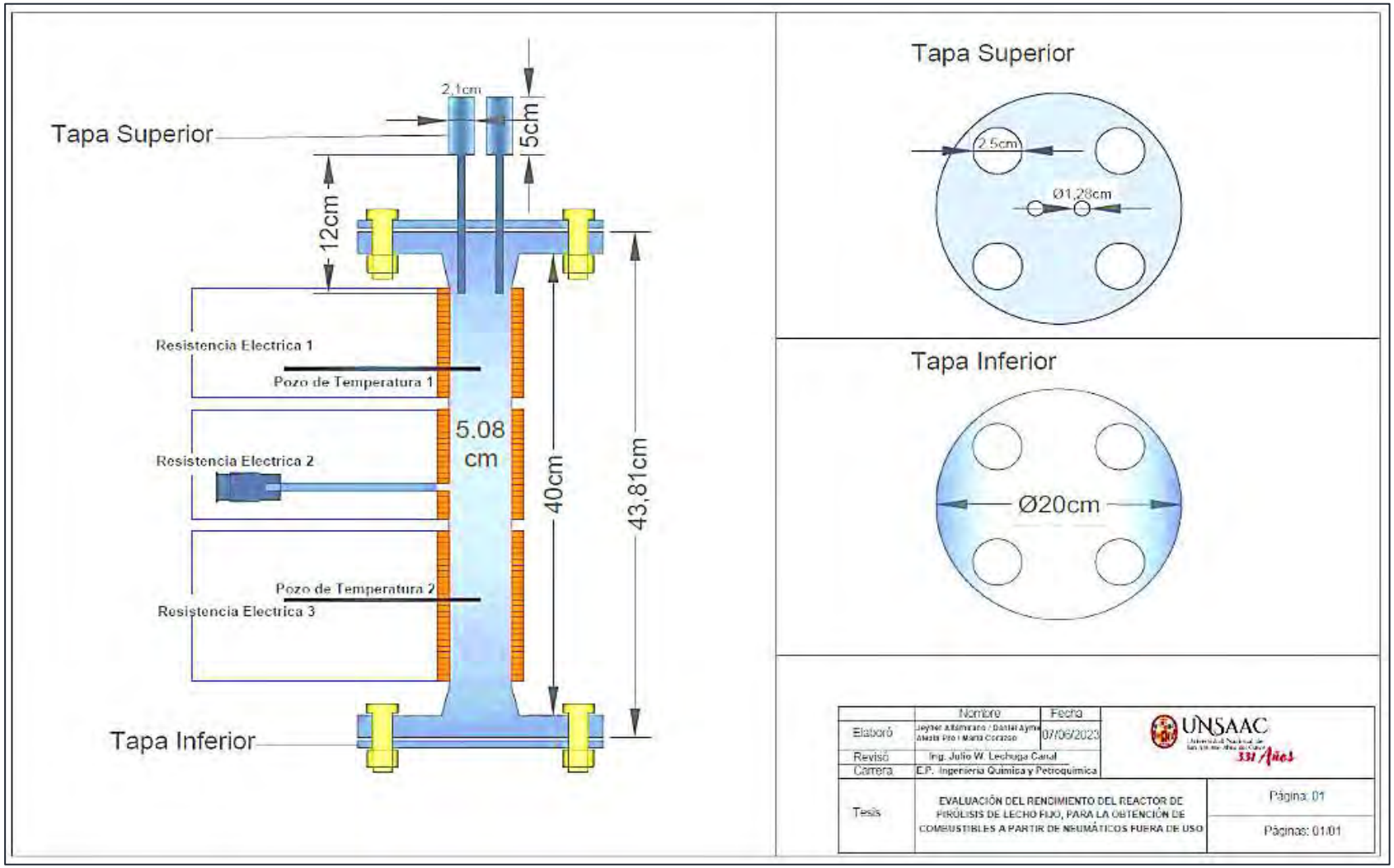
Apéndice 4. Cálculo en hoja de excel para los efectos de las variables independientes

COMBINACIONES DE FACTORES								RÉPLICA			PRODUCTO DEL COMBUSTIBLE LÍQUIDO									
NIVELES	A	B	C	AB	AC	BC	ABC	1	2	3	Promedio	Niveles	Contraste	Efecto	SS	Grados de Libertad	MS	Fisher(F)	Valor_P	Confiabilidad	
1	-	-	-	+	+	+	-	53.500	52.230	52.890	158.620	1	-	-	-	1	-	-	-	-	-
A	+	-	-	-	-	+	+	50.280	49.680	50.120	150.080	A	-12.9700	-1.0808	7.0092	1	7.0092	47.2942	0.00000	1.0000	99.9996
B	-	+	-	-	+	-	+	47.400	48.100	47.960	143.460	B	-36.5300	-3.0442	55.6017	1	55.6017	375.1696	0.00000	1.0000	100.0000
AB	+	+	-	+	-	-	-	49.660	49.230	48.890	147.780	C	-29.2500	-2.4375	35.6484	1	35.6484	240.5360	0.00000	1.0000	100.0000
C	-	-	+	+	-	-	+	51.630	50.860	50.910	153.400	AB	27.9500	2.3292	32.5501	1	32.5501	219.6302	0.00000	1.0000	100.0000
AC	+	-	+	-	+	-	-	46.920	47.290	47.270	141.480	AC	-4.5300	-0.3775	0.8550	1	0.8550	5.7693	0.02881	0.9712	97.11922
BC	-	+	+	-	-	+	-	45.170	45.310	45.840	136.320	BC	-1.6100	-0.1342	0.1080	1	0.1080	0.7288	0.40589	0.5941	59.4112
ABC	+	+	+	+	+	+	+	46.450	46.730	46.310	139.490	ABC	2.2300	0.1858	0.2072	1	0.2072	1.3981	0.25432	0.7457	74.5684
N° de réplicas	3							FV	57099			Total			134.3510	23					
N° de variables	3											ERROR			2.3713	16	0.1482				
N° de datos	24																				

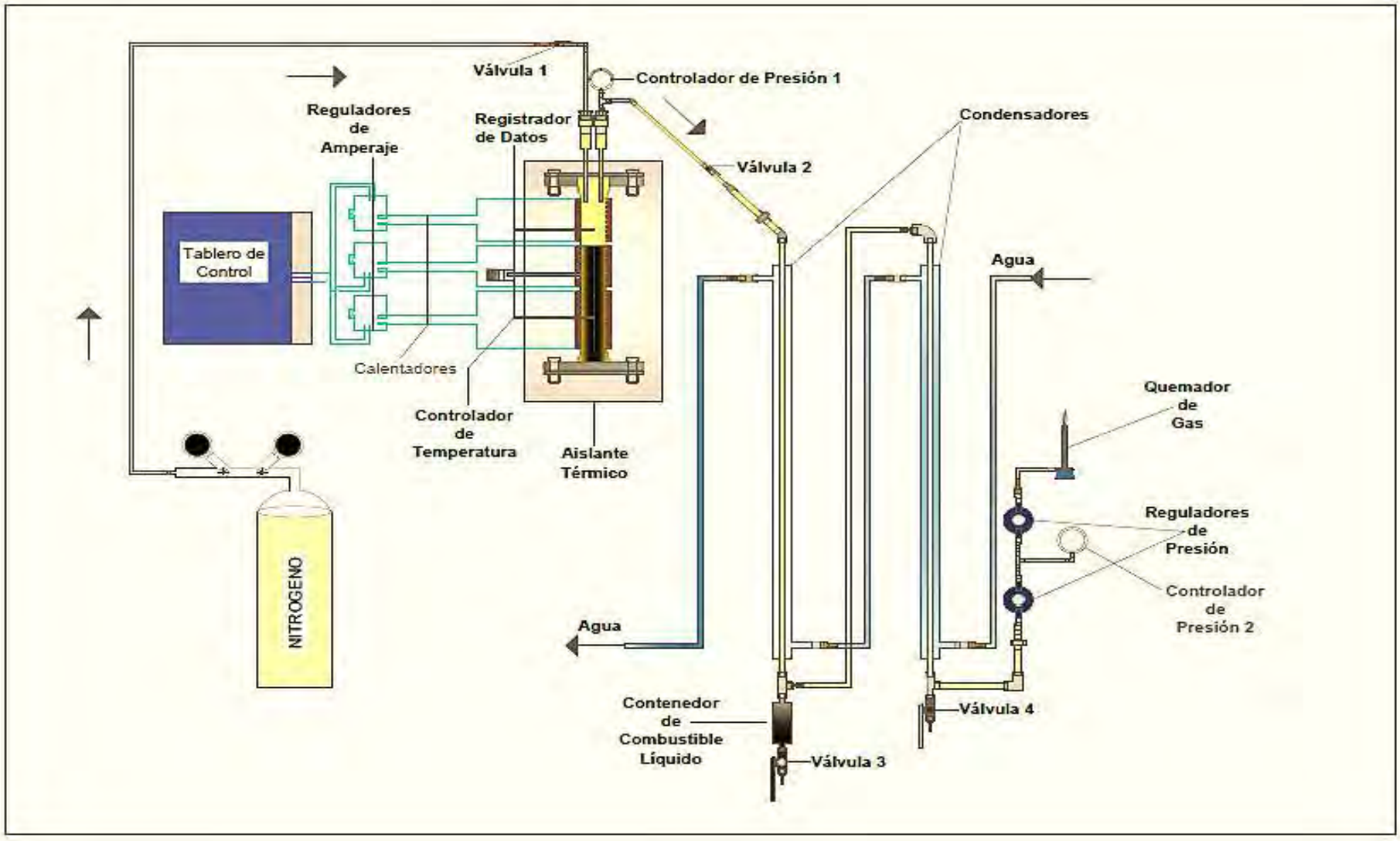
RÉPLICA			PRODUCTO SÓLIDO (CHAR)										
1	2	3	Promedio	Niveles	Contraste	Efecto	SS	Grados de Libertad	MS	Fisher(F)	Valor_P	Confiabilidad	
41.545	41.770	41.620	124.935	1	-	-	-	1	-	-	-	-	-
41.690	41.575	41.890	125.155	A	-0.6250	-0.0521	0.0163	1	0.0163	0.2227	0.6433	0.3567	35.6665
42.815	42.895	42.745	128.455	B	6.2250	0.5187	1.6146	1	1.6146	22.0959	0.0002	0.9998	99.9759
41.710	41.895	41.745	125.350	C	9.6550	0.8046	3.8841	1	3.8841	53.1541	0.0000	1.0000	99.9998
41.795	43.065	41.895	126.755	AB	-5.0850	-0.4238	1.0774	1	1.0774	14.7440	0.0014	0.9986	99.8554
42.980	42.870	42.915	128.765	AC	5.1450	0.4288	1.1030	1	1.1030	15.0940	0.0013	0.9987	99.8686
42.865	42.955	43.070	128.890	BC	-1.2050	-0.1004	0.0605	1	0.0605	0.8280	0.3764	0.6236	62.3631
43.135	43.115	42.890	129.140	ABC	1.5650	0.1304	0.1021	1	0.1021	1.3966	0.2546	0.7454	74.5433
FV	43133.1			Total			9.0271	23					
				ERROR			1.1692	16	0.0731				

RÉPLICA			PRODUCTO GASEOSO										
1	2	3	Promedio	Niveles	Contraste	Efecto	SS	Grados de Libertad	MS	Fisher(F)	Valor_P	Confiabilidad	
4.955	6.000	5.490	16.445	1	-	-	-	1	-	-	-	-	-
8.030	8.745	7.990	24.765	A	13.5950	1.1329	7.7010	1	7.7010	44.0120	0.0000	1.0000	99.9994
9.785	9.005	9.295	28.085	B	30.3050	2.5254	38.2664	1	38.2664	218.6962	0.0000	1.0000	100.0000
8.630	8.875	9.365	26.870	C	19.5950	1.6329	15.9985	1	15.9985	91.4331	0.0000	1.0000	100.0000
6.575	6.075	7.195	19.845	AB	-22.8650	-1.9054	21.7837	1	21.7837	124.4959	0.0000	1.0000	100.0000
10.100	9.840	9.815	29.755	AC	-0.6150	-0.0512	0.0158	1	0.0158	0.0901	0.7680	0.2320	23.2043
11.965	11.735	11.090	34.790	BC	2.8150	0.2346	0.3302	1	0.3302	1.8870	0.1885	0.8115	81.1516
10.415	10.155	10.800	31.370	ABC	-3.7950	-0.3163	0.6001	1	0.6001	3.4295	0.0826	0.9174	91.7417
FV	1871.342			Total			87.4952	23					
				ERROR			2.7996	16	0.1750				

Apéndice 5. Dimensionamiento del reactor de pirólisis de lecho fijo



Apéndice 6. Esquema del sistema del reactor de pirólisis de lecho fijo de NFU

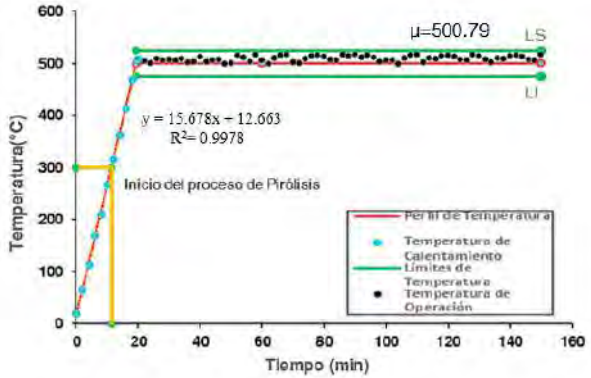


Apéndice 7. Proceso de pirólisis en el reactor de pirólisis de lecho fijo de NFU

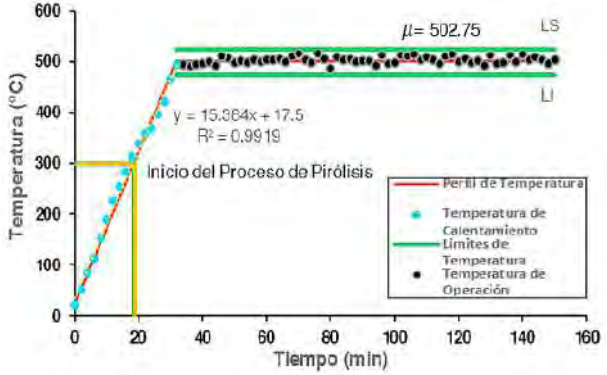
Apéndice 8. Datos experimentales de proceso de pirólisis de NFU

Condiciones de operación para la experimentación en el reactor de pirólisis de lecho fijo						Producto: Combustible líquido		Producto sólido (Char)		Producto gaseoso	
N° Exp.	Tamaño de partícula [mm]	T [°C]	Gradiente de calentamiento [°C/min]	Peso NFU [g]	Volumen (combustible líquido) [ml]	Peso del combustible [g]	Rend. del combustible líquido [%]	Peso del sólido [g]	Rend. del sólido [%]	Peso del gas [g]	Rendimiento de los gases [%]
1	0.5	500	15	200	126.0	107.00	53.50 %	83.09	41.55 %	9.91	4.96 %
2	1.0	500	15	200	117.5	100.56	50.28 %	83.38	41.69 %	16.06	8.03 %
3	0.5	600	15	200	107.0	94.79	47.40 %	85.63	42.82 %	19.58	9.79 %
4	1.0	600	15	200	114.0	99.32	49.66 %	83.42	41.71 %	17.26	8.63 %
5	0.5	500	25	200	117.5	103.25	51.63 %	83.59	41.80 %	13.16	6.58 %
6	1.0	500	25	200	103.5	93.84	46.92 %	85.96	42.98 %	20.20	10.10 %
7	0.5	600	25	200	104.0	90.34	45.17 %	92.01	46.01 %	17.65	8.83 %
8	1.0	600	25	200	112.8	98.95	48.07 %	82.05	45.92 %	19.58	9.36 %

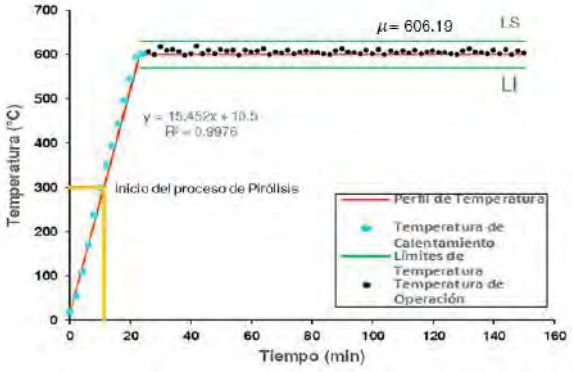
Apéndice 9. Gráfica de los ensayos experimentales del proceso de pirólisis de NFU



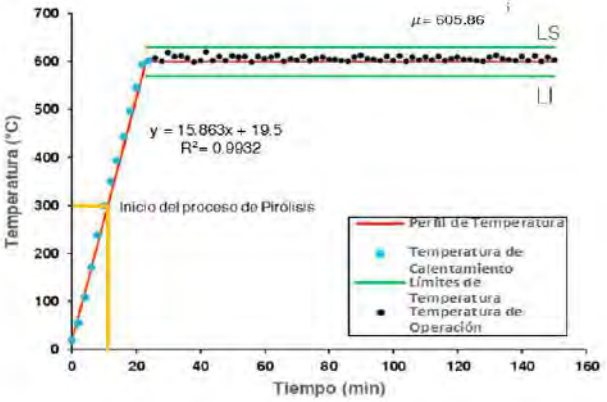
9.a) A=0.5 ; B= 500°C/min ; C= 15°C/min



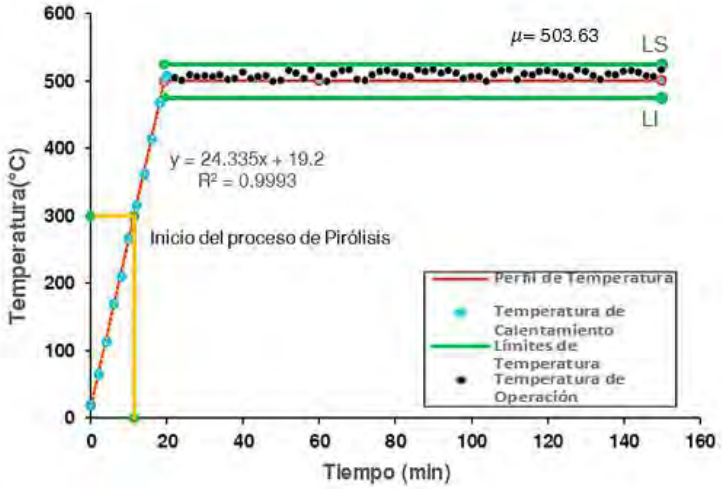
9.b) A=1mm ; B= 500°C/min ; C= 15°C/min



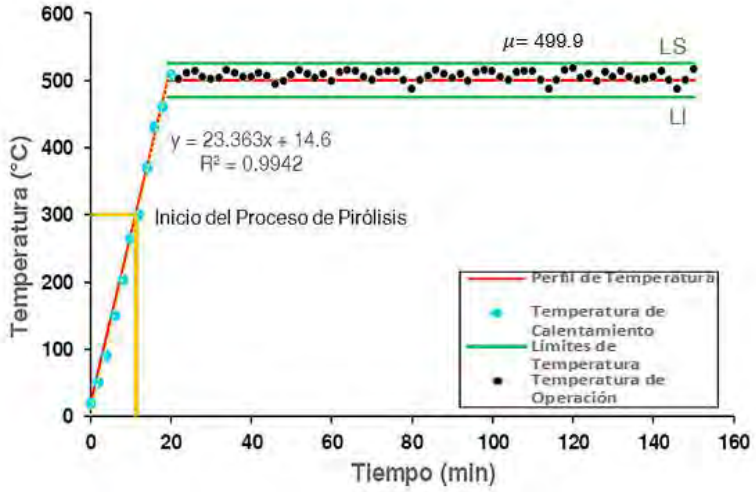
9.c) A=0.5 ; B= 600°C/min; C= 15°C/min



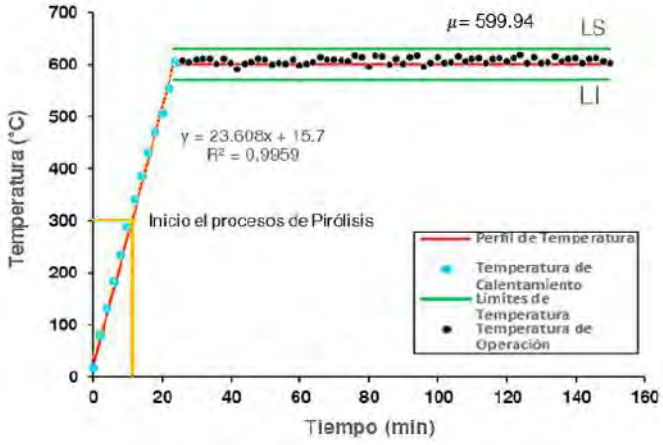
9.d) A=1 ; B= 600°C/min; C= 15°C/min



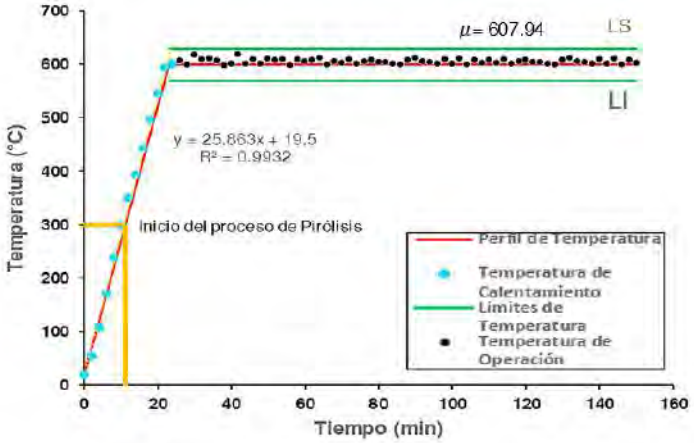
9.e) A=0.5 ; B= 500°C/min ; C= 25°C/min



9.f) A=1; B= 500°C/min ; C= 25°C/min

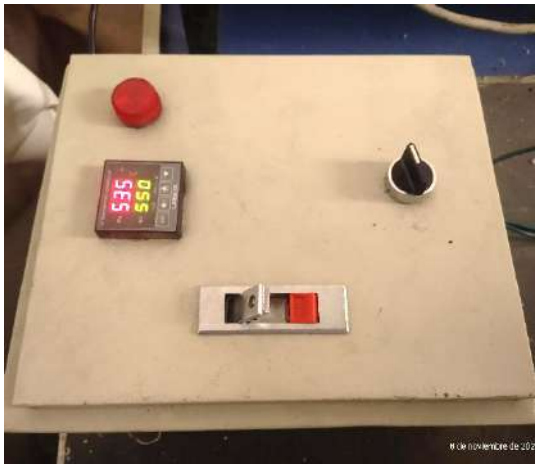


9.g) A=0.5; B= 600°C/min ; C= 25°C/min



9.h) A=1; B= 600 °C/min ; C= 25°C/min

Apéndice 10. Controlador de encendido (On/Off)



Apéndice 11. Productos obtenidos del proceso de pirólisis de NFU

- **Combustible líquido**

- **Sólido (char)**

- **Gas**

Apéndice 12. Datos experimentales para la caracterización fisicoquímica por cortes en el destilador al vacío ASTM D1160

MUESTRA 1 (0.5 mm, 500 °C, 15°C/min)					
Presión [mmHg]	V [%]	Temperatura del balón [T_2]	AET	Producto [%]	[%]
60	0	57	129.875		
A	4.09	75	150.800	Nafta media %	3.89
0.00171	5	79	155.436		
	10	93	171.623	Nafta pesada %	11.47
	15	108	188.897		
	15.55	109	190.046		
	20	117	199.227		
	25	125	208.389	kerosene liviano %	20.05
	30	135	219.812		
	35.60	149	235.753		
	40	160	248.236		
	45	174	264.070	kerosene pesado %	9.39
	50	187	278.719		
	55	193	285.462		
	60	208	302.274	Gasoil %	23.00
	65	245	343.454		
	68	260	360.032		

MUESTRA 2 (1.0 mm, 500°C, 15 °C/min)					
Presión [mmHg]	V [%]	Temperatura del balón [T_2]	AET	Producto [%]	[%]
60	0	68	142.675	Nafta y gasolina liviana %	0.25
A	2.50	75	150.800	Nafta media %	2.25
0.00171	5	82	158.910	Nafta pesada %	19.64
	10	91	169.314		
	15	99	178.541		
	20	106	186.598		
	22.14	109	190.046		
	25	113	194.639	Kerosene liviano %	28.20
	30	119	201.519		
	40	133	217.530		
	50	148	234.617		
	50.35	149	235.753	Kerosene pesado %	8.54
	58.89	174	264.070		
	60	177	267.455	Gasoil %	13.11
	65	192	284.339		
	70	199	292.195		
	72	209	303.392		

MUESTRA 3 (0.5mm, 600°C, 15 °C/min)					
Presión [mmHg]	V [%]	Temperatura del balón [T_2]	AET	Producto [%]	[%]
60	0	48	119.373	Nafta y gasolina liviana %	0.3
A	5.00	56	128.709	Nafta media %	9.45
0.00171	9.75	75	150.800	Nafta Pesada %	14.75
	10	76	151.960		
	15	90	168.160		
	20	100	179.693		
	24.50	109	190.046		

	25	110	191.195	Kerosene liviano %	11.37
	30	132	216.388		
	35.87	149	235.753		
	40	161	249.369	Kerosene pesado %	9.13
	45	175	265.198		
	50	192	284.339	Gasoil %	10.00
	55.00	215	310.096		

MUESTRA 4 (1.0 mm, 600°C, 15°C/min)					
Presión [mmHg]	V [%]	Temperatura del balón [T_2]	AET	Producto [%]	[%]
60	0	43	113.528	Nafta y gasolina liviana %	0.40
A	5	74	149.641	Nafta media %	4.60
0.00171	10	88	165.849		
	15	102	181.996	Nafta pesada %	12.92
	17.92	109	190.046		
	20	114	195.787		
	25	123	206.100	Kerosene liviano %	17.45
	30	134	218.671		
	35.37	149	235.753		
	40	162	250.502		
	43.62	175	265.198	Kerosene pesado %	8.26
	50	198	291.074		
	55	208	302.274	Gasoil %	21.38
	60	224	320.132		
	65	246	344.561		
	75	249	369.990		

MUESTRA 5 (0.5mm, 500°C, 25°C/min)					
Presión [mmHg]	V [%]	Temperatura del balón [T_2]	AET	Producto [%]	[%]
60	0	39	108.99	Nafta y gasolina liviana %	0.35
A	4.5	52	124.044	Nafta media %	8.22
0.00171	5	65	139.188		
	8.57	75	150.800		
	10	79	155.436	Nafta Pesada %	13.57
	15	92	170.469		
	20	106	186.598		
	22.14	109	190.045		
	25	113	194.639	Kerosene liviano %	21.87
	30	122	204.955		
	40	137	222.093		
	44.01	149	235.753		
	50	167	256.160	Kerosene pesado %	9.20
	53.21	175	265.198		
	60	192	284.339	Gasoil %	17.68
	65	212	306.745		
	70	241	339.021		
	70.89	245	343.453		
	72	250	348.987	Residuo %	1.11

MUESTRA 6 (1.0 mm, 500°C, 25°C/min)					
Presión [mmHg]	V [%]	Temperatura del balón [T_2]	AET	Producto [%]	[%]
60				Nafta y gasolina liviana %	0.20
A	0	72	147.320	Nafta media %	0.59
0.00171	0.79	75	150.800		
	5	91	169.314	Nafta pesada %	7.81
	8.60	109	190.046		
	10	116	198.081		

	15	126	209.532		
	20	135	219.812		
	25	145	231.205	Kerosene liviano %	18.90
	27.50	149	235.753		
	30	153	240.297		
	37.86	175	265.1983	Kerosene pesado %	10.36
	40	181	271.964		
	45	199	292.195		
	50	206	300.036		
	55	210	304.510		
	60	215	310.096		
	65	219	314.559		
	70	221	316.789	Gasoil %	37.14
	75	223	319.018		

MUESTRA 7 (0.5mm, 600°C, 25°C/min)					
Presión [mmHg]	V [%]	Temperatura del balón [T_2]	AET	Producto [%]	[%]
60				Nafta y gasolina liviana %	0.51
A	0	53	125.211		
0.00171	5	55	127.543		10.50
	10	70	144.998	Nafta media %	
	11.00	75	150.800		
	15	95	173.930		
	18.34	109	190.045	Nafta Pesada %	7.33
	20	116	198.081		
	25	125	208.389		17.01
	30	133	217.530	Kerosene liviano %	
	35.34	149	235.753		
	40	163	251.634		7.74
	43.09	175	265.198	Kerosene pesado %	
	50	202	295.557		21.09
	60	230	326.808	Gasoil %	
	64.18	245	343.453		
	70	266	366.645	Residuo %	5.82

MUESTRA 8 (1.0 mm, 600°C, 25°C/min)					
Presión [mmHg]	V [%]	Temperatura del balón [T_2]	AET	Producto [%]	[%]
60			62.923	Nafta y gasolina liviana %	0.35
A	0	51	122.877		
0.00171	5	75	150.800	Nafta media %	4.65
	10	79	155.436		
	15	91	169.314		
	20	100	179.693	Nafta pesada %	18.75

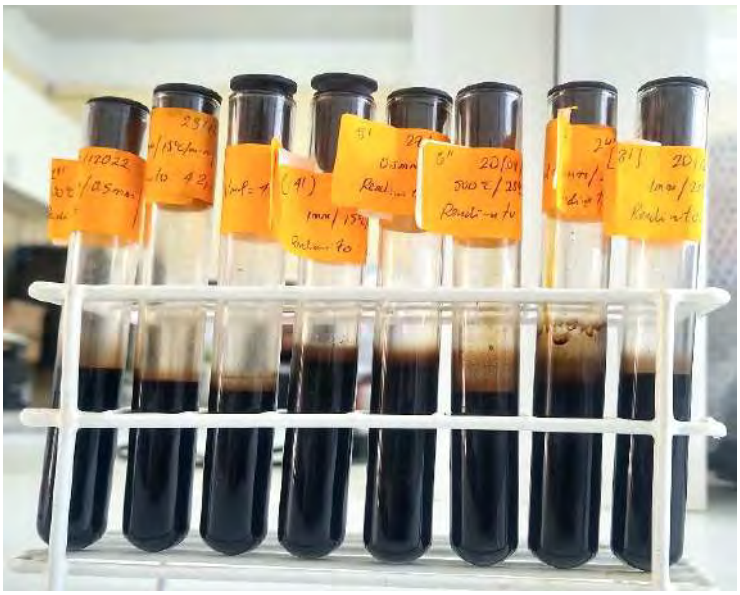
	23.75	109	190.045		
	25	112	193.491	Kerosene liviano %	17.92
	30	118	200.373		
	40	143	228.929		
	41.67	149	235.753	Kerosene pesado %	7.22
	48.89	175	265.198		
	50	179	269.710	Gasoil %	15.72
	60	222	317.904		
	64.62	245	343.453		
	70	272	373.247	Residuo %	5.38

Apéndice 13. Imágenes de la medición de las propiedades fisicoquímicas de las muestras de NFU

- Para su análisis se realizó en el laboratorio de Hidrocarburo de la Escuela Profesional de Ingeniería Química.

➢ **Determinación de la viscosidad ASTM D7042**

- Para determinar la viscosidad, se tomó 8 muestras de NFU en tubos de ensayo de 10 ml del combustible líquido, se homogenizó en la centrífuga (MPW Universal) a 3000 rpm durante 15 min.



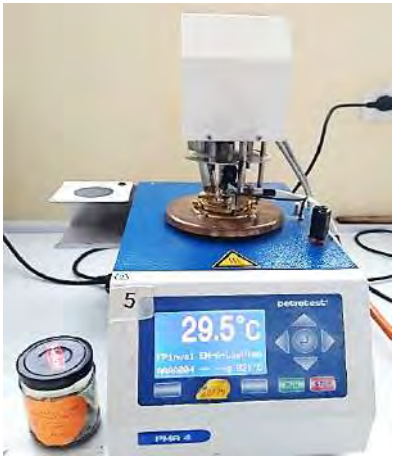
-Las muestras se tomaron en jeringas de 10 ml, para su análisis en el equipo del Viscosímetro (SVM 3000-ASTM D704).

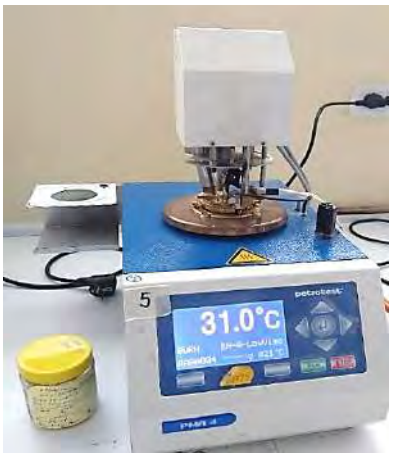
- **Proceso del análisis del combustible de NFU**

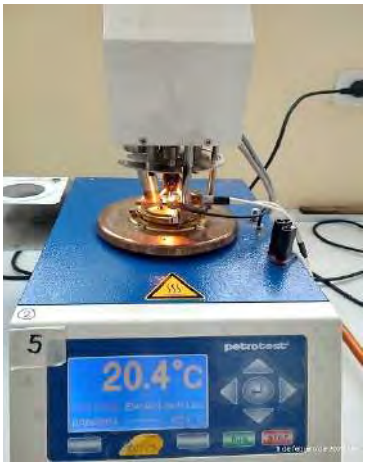
- **Prueba de punto de inflamación Pensky-Martens -ASTM D93**

- Para determinar el análisis del punto de inflamación de Pensky Martens, se tomó 70 ml de combustible pirolítico de las 8 muestras de NFU.

- **Proceso del análisis de punto de inflamación**

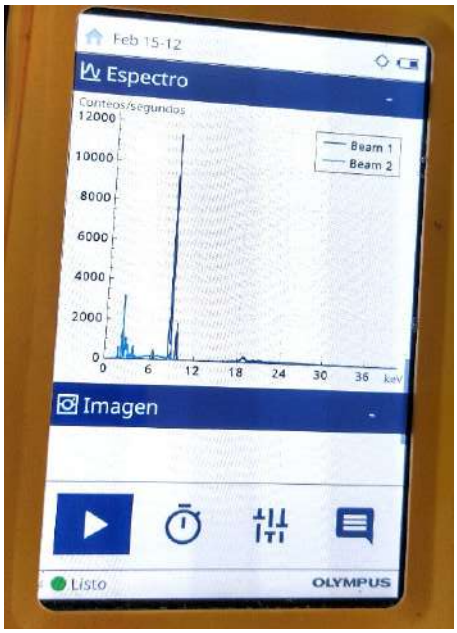




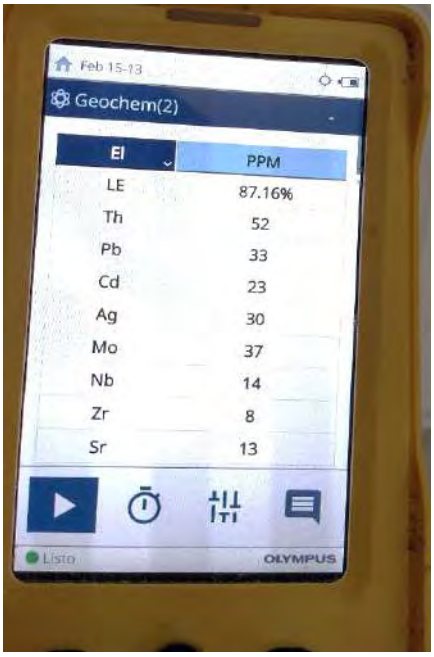


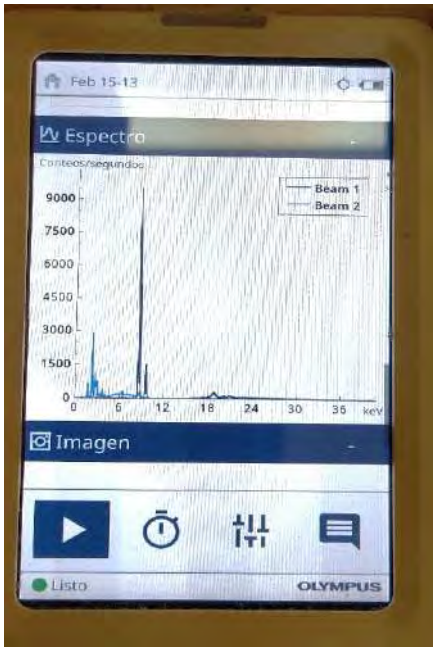
- **Proceso del análisis de la composición elemental de NFU**
  - Para el análisis elemental, se tomaron ocho muestras de sólidos (char), procedente de los NFU para determinar la composición elemental se usó el equipo Analizador XRF Vanta.

N° Experiencia	Tamaño de partícula [mm]	T [°C]	Gradiente de calentamiento (°C/min)	Peso NFU [g]	Rendimiento del sólido [g]
1	0.5	500	15	83.09	41.77



N° Experiencia	Tamaño de partícula [mm]	T [°C]	Gradiente de calentamiento [°C/min]	Peso del sólido [g]	Rendimiento del char [g]
8	1	600	25	81.67	42.70





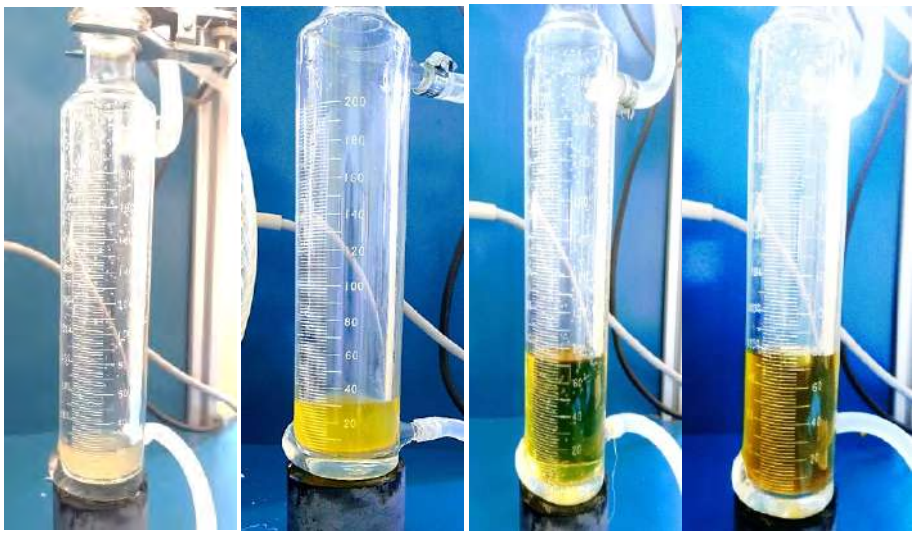
Apéndice 14: Destilación al vacío ASTM D1160

- Para la destilación al vacío ASTM D1160, se tomó 8 muestras de combustible pirolítico de NFU procedente de la pirólisis, en vaso precipitado de 100 ml.

Como se observa a continuación:

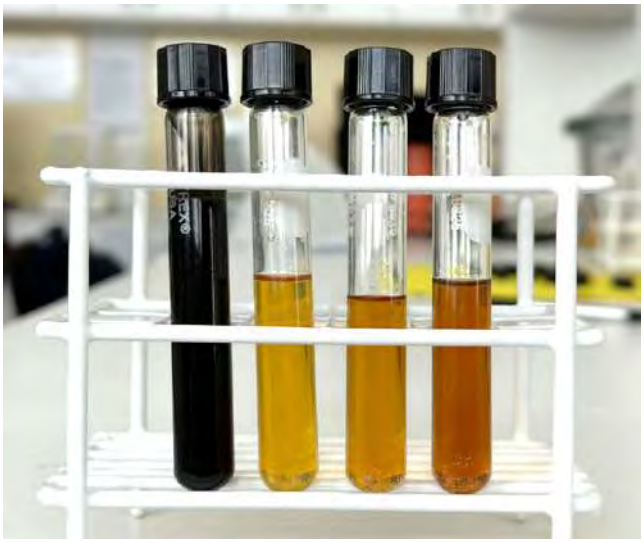
- **Proceso de destilación al vacío ASTM D1160**

Los cortes del combustible- destilación ASTM D1160



Se observa en la imagen (a) la obtención de volátiles (Naptas), en la imagen (b) el alquitrán bituminoso con 25 ml de residuo acumulado en el balón después del destilado.

- **Productos de la destilación al vacío (ASTM D1160) a una presión de 60 mmHg**



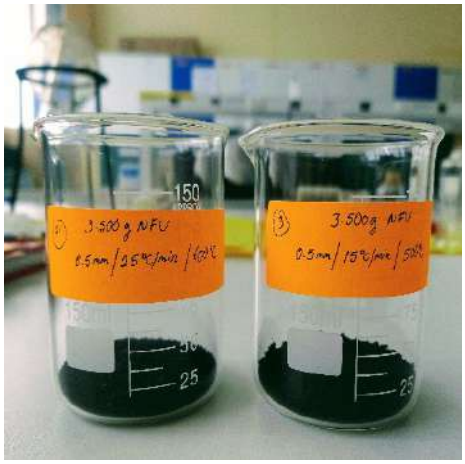
Apéndice 15. Obtención del carbón activado de NFU

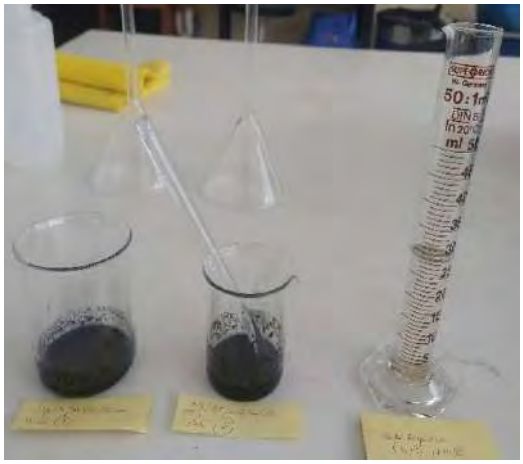
- **Procedimientos para la obtención del carbón activado del char de NFU**

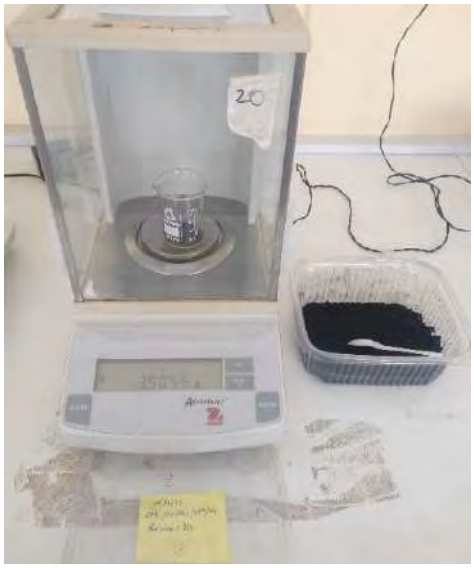
- Para la obtención del carbón activado, se tomó dos muestras de carbón (char), con 3.500 g en peso. La primera muestra fue la N° 3 de (0.5 mm/ a 25°C/min y a 600°C) y la segunda fue la muestra N° 7 de (0.5 mm/ 15°C/min y a 500°C), el cual es producto de pirólisis de NFU.
- Las muestras son llevadas al analizador de humedad (PMB 53), para secarla durante un periodo de 15 min, para luego hacer reaccionar con 10 ml de ácido fosfórico al 85 p/p, lo cual se vertió el ácido sobre la muestra en polvo (char), se mezcla homogéneamente durante 25 min, de esta manera se extrae el olor de azufre y demás componentes volátiles, se deja la muestra con el ácido durante 24 hr. Una vez que el ácido reacciona frente a la muestra, se filtra con agua destilada, este proceso se realiza hasta que el pH del ácido sea básico. Como se observa en las imágenes a continuación:

- Pesado del sólido (Char) de NFU, para su posterior obtención de Carbón Activado.

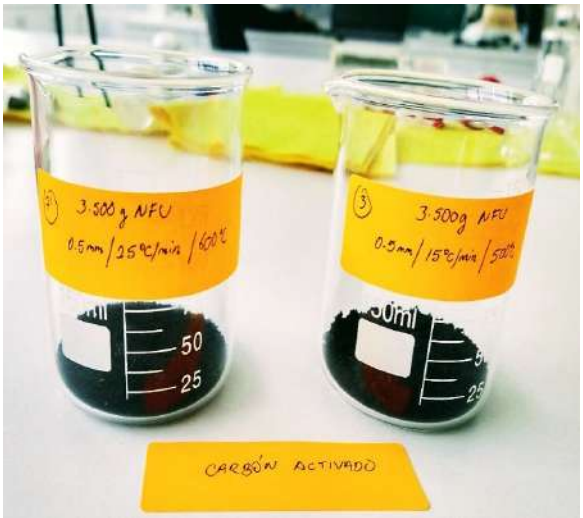
▪ Imágenes de la obtención de carbón activado del char de NFU







- **Producto : Carbón activado**



ANEXOS

Anexo 1. Ficha técnica de nitrógeno

OXINOVA S.A.S.®

FICHA TECNICA NITROGENO COMPRIMIDO INDUSTRIAL
UN 1066 NTC 2852 CGA 580

PUREZA 99.9%
IMPUREZAS

≤20 ppm O2
≤50 ppm H2O
≤10 ppm THC, HIDROCARBUROS TOTALES

SGA

CARACTERISTICAS TECNICAS DEL PRODUCTO:

NFPA704

Fórmula Molecular: N2
Apariencia: Gas o liquido Incoloro, sin sabor e insipido
Peso Molecular: 28.013 g/mol
Olor: Inodoro
Estado Físico: Gas comprimido o Liquido Criogénico
Ph: No Aplicable
Punto de Fusión: A 1 Atm: -210.0°C
Punto De Ebullición - A 1 Atm: -195.80 °C
Inflamabilidad: No Inflamable.
Densidad de Vapor: A 21.1°C Y 1 Atm: 1.160 Kg/M3
Presión de Vapor: A 20°C No Aplicable
Gravedad Específica: (Aire = 1) A 21.1°C 0.967.
Presentación: Cilindro 40-43 litros, Presión 150 Bar, 2200 Psi aprox.

TRANSPORTE

PROPIEDADES:

Formula Química: N2 / **Peso Molecular:** 39.95 / **Punto de Ebullición:** -185.9 °C
Temperatura Crítica: -122.4 °C / **Presión Crítica:** 710.0 Psi / **Volumen Específico:** 0.604 M3/Kg

PELIGROSIDAD:

Propiedad Toxicológica: Asfixiante Simple
Compatibilidad: No Corrosivo

APLICACIONES:

- Como atmósfera protectora en envasado de alimentos.
- Como Impelente en el procesamiento de alimentos.
- Como gas inerte para la remoción de gases disueltos en líquidos.
- Prevención del deterioro por oxidación.
- Secado y prueba de presión en tuberías.
- Enfriamiento y congelación criogénica.
- Criomolienda y criocontracción de partes metálicas
- Procesos químicos como gas de síntesis y regenerador de catalizadores en petroquímica.

Oxígeno, Acetileno, Argón, Nitrógeno, Dióxido de Carbón, Carburo, Soldaduras, Seguridad Industrial, Equipos Industriales y Medicinales.

Zipaquirá: Calle 8 No. 16-67 •Teléfono: 852 8500•851 3911•Cel.: 313 3761031 - 315 315 5631.
www.oxinova.com • E-mail: ventas@oxinova.com • gerencia@oxinova.com

Anexo 2. Ficha técnica de ferolite 333

Ferolite

Ferolite Jointings® Limited

C-178, Site No. 1, B.S. Road, Industrial Area, Ghaziabad – 201 001 (U.P.)
Phone : 0091-120-2757012, 2700323, 4051500 Fax: 0091-120-2701002, 4051550
E-mail: export@ferolite.com ; Website: www.ferolite.com

TECHNICAL - DATA SHEET

MATERIAL GRADE : FEROLITE -333

MATERIAL TYPE : **COMPRESSED ASBESTOS FIBER** (CAF)
MATERIAL COMPOSITION : Made from Chrysotile Asbestos Fiber with Synthetic & Natural Elastomers and Inorganic fillers
APPLICATION : To Seal off Steam ,Air, Water ,various alkaline chemicals Under low stress conditions

THICKNESS : 0.40 mm to 6.00 mm.
SURFACE FINISH : Red, Grey , Graphited
OPERATING CONDITION
Maximum pressure : 35 Kg/cm2
Maximum Temperature : 380°C
SPECIFICATION COMPLIANCE : IS: 2712 / 1998 GRADE W / 3

The following Information Applies to material Thickness 1.5mm.

S.NO.	Typical Properties	ASTM Standard	Test Method	Unit	Specified Value
1.	DENSITY	F 1315	IS:2712/1998	g/cm3	1.70 - 2.20
2.	TENSILE STRENGTH	F 152	IS:2712/1998	Mpa	> 6.7
3.	COMPRESSIBILITY	F 36 A	IS:2712/1998	%	6 –14
4.	RECOVERY	F 36 A	IS:2712/1998	%	> 40
5.	FLEXIBILITY		IS:2712/1998	--	No Visual sign of Cracks.
6.	IGNITION LOSS	F 495	IS:2712/1998	%	< 28

NOTE: All information and recommendations given in this brochure are correct to the best of our knowledge. Since conditions of use are beyond our control. The information provided and only serve as a guideline. Users must satisfy themselves that products are suitable for the intended process and uses. We reserve the right to change product design and properties without notice.

Anexo 2. Ficha Técnica Silicona Mega Grey