

Producción de Combustibles Líquidos por Pirólisis al Vacío de Neumáticos Usados

Production of Liquid Fuels by Vacuum Pyrolysis of Used Tires

Victor Pretell, MSc¹, Meg Astorayme, Bach², Alex Pilco, MSc², Williams Ramos, Ing¹

¹Universidad Nacional de Ingeniería, Perú, vpretell@fip.uni.edu.pe, wramos@fip.uni.edu.pe

²Universidad Nacional de Ingeniería, Perú, meg.astorayme.a@uni.pe, apilco@uni.edu.pe

Resumen– Los neumáticos fuera de uso (NFU), son aquellos neumáticos que han expirado como resultado de exceder su vida útil, en el Perú por las actividades de transporte y de minería en el año 2016 se estimaba que habían alrededor de un millón setecientos cincuenta mil NFU, que representan 45,000 toneladas de residuos. Los NFU son residuos que afectan al medio ambiente y podrían ser reciclados como productos energéticos. Una alternativa de reciclaje es el proceso termoquímico denominado pirólisis. Se investigó el rendimiento y calidad de los combustibles líquidos obtenidos al efectuar la pirólisis al vacío de los NFU, se evaluó el efecto de la presión de vacío, temperatura y tamaño de la partícula sobre los rendimientos de las fracciones líquidas. Los experimentos se realizaron a escala de laboratorio y de planta piloto. A escala de laboratorio se obtuvo que las condiciones que maximizaban el rendimiento de productos líquidos era una presión de 30.52 kPa abs., temperatura de 550 °C y un tamaño de partícula de 25x25 mm. A estas condiciones se obtuvo un rendimiento de productos líquidos de 54.32%, sólidos 39.87% y gases 5.81%. El producto líquido tiene las características de un petróleo tipo Talara y puede ser empleado como carga de refinería o puede ser usado como combustible industrial. El producto sólido es un producto carbonoso con bajo contenido de humedad, su poder calorífico superior fue 23.49 MJ/kg que lo clasifica como carbón subbituminoso de tipo B según ASTM D388, es fácil de moler y podría ser empleado como combustible industrial o precursor de carbón activado o negro de humo. A escala de planta piloto se obtuvo un rendimiento de productos líquidos de 35.88%, sólidos 42.42% y gases 21.70%.

Palabras clave– NFU, Pirólisis al vacío, Líquido de pirólisis, Energía renovable, Reciclo de neumáticos.

Abstract– End-of-life tires (ELTs) are those tires that have expired because of exceeding their useful life, in Peru due to transport and mining activities in 2016 it was estimated that there were around one million seven hundred fifty thousand ELTs that represent 45,000 tons of waste. ELTs are waste that affects the environment and could be recycled as energy products. An alternative to recycling is the thermochemical process called pyrolysis. The performance and quality of the liquid fuels obtained by carrying out the vacuum pyrolysis of the ELTs was investigated, the effect of the vacuum pressure, temperature, and particle size on the yields of the liquid fractions was evaluated. The experiments were carried out on a laboratory and pilot plant scale. On a laboratory scale, it was obtained that the conditions that maximized

the yield of liquid products were a pressure of 30.52 kPa abs., a temperature of 550 °C and a particle size of 25x25 mm. Under these conditions, a yield of liquid products of 54.32%, solid 39.87% and gases 5.81% was obtained. The liquid product has the characteristics of a Talara-type crude oil and can be used as a refinery load or can be used as an industrial fuel. The solid product is a carbonous product with low moisture content, its superior calorific power was 23.49 MJ/kg which classifies it as subbituminous carbon type B according to ASTM D388, is easy to grind and could be used as industrial fuel or precursor of activated carbon or smoke black. At the pilot plant level, a yield of liquid products of 35.88%, solids 42.42% and gases 21.70% were obtained.

Keywords– Waste tire, Vacuum pyrolysis, Pyrolysis liquid, Renewable energy, Tire recovery.

I. INTRODUCCIÓN

La demanda mundial de energía cayo aproximadamente un 8% el 2020 debido a los efectos de la pandemia del SARS-CoV-2 y se puede recuperar a partir del 2021 con un crecimiento estimado del 3% hasta mediados del 2030, pero no se espera volver a alcanzar los niveles prepandémicos porque los cambios sociales ocasionados por la pandemia como el trabajo remoto y la disminución en los desplazamientos diarios tendrán un efecto duradero al reducir el uso de la energía, asimismo los continuos aumentos en la eficiencia energética, especialmente en el sector transporte nos lleva a escenarios de menor consumo de combustibles fósiles, pese a ello las energías renovables mantendrán su crecimiento alterando permanentemente la matriz energética [1].

Un neumático es básicamente un elemento que permite a un vehículo desplazarse en forma suave a través de superficies lisas. Los neumáticos se fabrican en diferentes tipos y variedades, los principales componentes son compuestos de caucho como el caucho natural, caucho de estireno butadieno (SBR), caucho de polibutadieno y butilo (60-65% en peso), negro de humo (25-35% en peso) y el resto son aditivos orgánicos (hidrocarburos) e inorgánicos (óxido de zinc, azufre y compuestos de azufre), que se agregan durante el proceso de fabricación. En términos generales, se puede decir que se pueden añadir al neumático más de cien compuestos diferentes dependiendo de la marca específica y del uso específico que se le dé al neumático [2], [3], [4], [5].

Digital Object Identifier (DOI):
<http://dx.doi.org/10.18687/LACCEI2021.1.1.70>
ISBN: 978-958-52071-8-9 ISSN: 2414-6390

En la actualidad las empresas mineras y el sector transporte en el Perú son consumidores masivos de neumáticos, una vez que estos cumplen su ciclo de vida útil se convierten en un residuo, especialmente los neumáticos de los camiones mineros gigantes. Los neumáticos fuera de uso (NFU), son aquellos neumáticos que han expirado como resultado de exceder su vida útil o que ya no son seguros para el uso debido a defectos, tales como la degradación de su composición física o estructura y que no pueden ser reencauchados [6]. El 2016 en el Perú se produjeron alrededor de un millón setecientos cincuenta mil NFU que representan 45,000 toneladas de neumáticos y se estima que esto representa el 14.5% de neumáticos existentes en el mercado [7], debido al crecimiento del parque automotor esas cifras son mayores a la fecha. Un neumático de auto tiene un peso promedio de 7 kilos, un neumático de camión minero en cambio pesa 5.000 kilos, por lo que el gasto energético para destruirlos (en base a maquinaria de alto tonelaje) puede ser muy grande [5]. Debido al proceso de vulcanización y a sus componentes los neumáticos fuera de uso se convierten en un residuo difícil de eliminar, se estima que el tiempo que tardan en degradarse en forma natural es de unos 500 años. Su disposición final se da mayormente en los rellenos o los apilamientos, también suelen ser incineradas lo que ocasiona un daño al medio ambiente por las emisiones no controladas de agentes contaminantes como el dióxido de carbono, dióxido de azufre, hidrocarburos aromáticos policíclicos (PAH), etc. y en el peor de los casos son tiradas al medio ambiente como desechos y allí pueden originar múltiples problemas como por ejemplo ser sumideros para insectos como el mosquito que es un vector transmisor de muchas enfermedades endémicas [3], [5], [6], [7], [8].

La pirólisis es un proceso termoquímico donde un material es sometido a calentamiento en ausencia de oxígeno. En este proceso las moléculas grandes son descompuestas en moléculas más cortas y el enfriamiento brusco logra detener las reacciones de descomposición y formar los productos líquidos deseados. En general se obtienen productos gaseosos, líquidos (tar) y sólidos (char), estos productos pueden ser usados como combustibles o precursores para la obtención de productos químicos, la ventaja de la pirólisis respecto a la gasificación y combustión es que tiene menores requerimientos de temperatura, que procede en ausencia de oxígeno y origina productos líquidos de alta calidad [9].

Se considera a la pirólisis como una forma razonable, eficaz y no contaminante para la disposición de los NFU. Se han estudiado muchos tipos de reactores para la pirólisis de los NFU, como el de lecho fijo (lote), lecho de tornillo móvil, horno rotatorio, lecho fluidizado y el de vacío. Entre estos, el reactor de lecho fijo es el que se ha utilizado ampliamente para estudiar la pirólisis de NFU [10]. Existen muchas clasificaciones sobre los tipos de pirólisis dependiendo de las condiciones de operación, como la velocidad de calentamiento, el tiempo de residencia de los volátiles y la temperatura, por lo que es posible tener una clasificación general simple como pirólisis lenta y pirólisis rápida (esta

última a veces denominada como pirólisis flash, aunque este término también puede significar velocidades de calentamiento más altas y tiempos de residencia de vapor más cortos que la pirólisis rápida). La pirólisis también se puede clasificar en función del medio utilizado, como pirólisis oxidativa, hidro-pirólisis, pirólisis al vapor, pirólisis catalítica y pirólisis al vacío, o dependiendo del sistema de calentamiento como pirólisis de microondas o plasma. En general, los reactores de lecho fluidizado y lecho expandido están asociados con la pirólisis rápida, mientras que los reactores de lecho fijo con la pirólisis lenta (un proceso discontinuo o semicontinuo). Pero debemos tener en cuenta que para fines de investigación es posible realizar una pirólisis rápida en un reactor de lecho fijo ajustando la velocidad de calentamiento y el tiempo de residencia de los volátiles [2].

La pirólisis al vacío es un concepto antiguo que permite la producción de grandes cantidades de líquidos de pirólisis a partir de sustancias orgánicas. El vacío minimiza las reacciones secundarias como el craqueo térmico, reacciones de repolimerización y recondensación, colisión en fase gaseosa, craqueo catalítico y reacciones de reducción y oxidación. 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 [11].

A pesar de que la pirólisis se considera una alternativa importante para aprovechar los productos químicos útiles y los recursos de los NFU, el proceso aún no se emplea mucho y esto se debe en gran parte a la gran cantidad de energía requerida para el proceso, por ello se continua investigando para hacer de la pirólisis de los NFU un proceso económicamente viable [4]. Lo anteriormente mencionado permite establecer que es necesario un estudio particular de la carga de NFU a ser pirolizada para poder efectuar los estudios de dimensionamiento de una planta y los costos asociados a ella.

La investigación plantea determinar el rendimiento y calidad en combustibles líquidos obtenidos al efectuar la pirólisis de los neumáticos fuera de uso. Adicionalmente se pretende establecer el efecto de la presión de vacío, la temperatura y el tamaño de la partícula sobre los rendimientos de las fracciones líquidas. Asimismo, es un objetivo realizar experimentos a nivel de planta piloto.

II. MATERIALES Y MÉTODOS

A. Muestras de neumáticos usados

Se trabajó con 80 kg de muestras de residuos de neumáticos usados procedente de la empresa de reciclaje D&D Soluciones Ambientales S.A. la cual recolecta y dispone residuos de empresas mineras. Se tomaron submuestras y se picaron a tres tamaños de partícula, 25x25 mm, 50x50 mm y 150x150 mm. A la muestra obtenida se le realizaron los ensayos de poder calorífico, contenido de humedad, contenido de cenizas y densidad aparente, los resultados se muestran en la Tabla I.

TABLA I
CARACTERIZACIÓN DE LOS RESIDUOS DE NEUMÁTICOS USADOS

Ensayo	Método de Ensayo	Resultado
Poder Calorífico Superior (MJ/kg)	ASTM D240	30.92
Contenido de Humedad (% m/m)	ASTM E1756	1.87
Contenido de Cenizas (% m/m)	ASTM E1755	0.09
Densidad Aparente (kg/m ³)	ASTM E873	0.663

B. Pirólisis a escala de laboratorio

La pirólisis se llevó a cabo en un reactor de lecho fijo. En general el equipo experimental consta de cuatro partes: el reactor tubular, calentador eléctrico, controlador de temperatura y sistema de condensación y vacío. En la Fig. 1 se muestra un esquema del sistema experimental.

Los experimentos se realizaron en un reactor tubular de acero inoxidable con un diámetro interno de 50 mm y una longitud de 600 mm, un extremo esta roscado para acomodar una tapa lateral desmontable. La tapa lateral en acero inoxidable con un diámetro externo de 59 mm cuenta con una tubería central de salida de 6.4 mm para extraer los productos de reacción y conectar el reactor al sistema de condensación de gases. El otro extremo del reactor esta sellado por una tapa soldada, que en la parte superior cuenta con dos orificios, el central con un diámetro de 6.35 mm para conectar al sistema de acarreo de gases y el lateral con un diámetro de 3.2 mm para la termocupla.

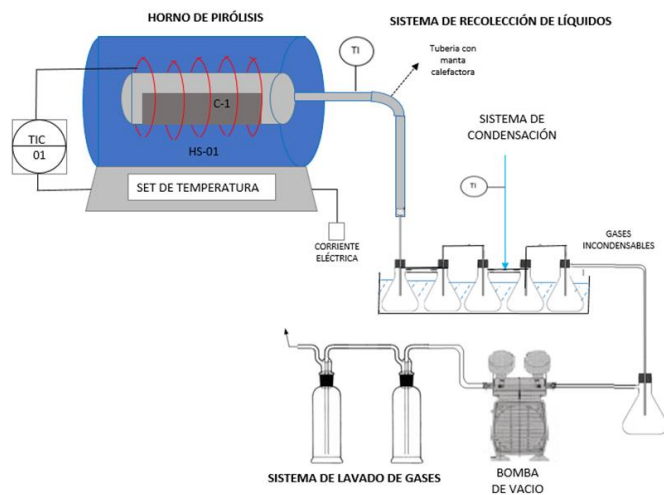


Fig. 1 Esquema experimental de la pirólisis de los NFU

El sistema de calentamiento consiste en una mufla eléctrica cilíndrica con tapas desmontables en ambos extremos para acomodar adecuadamente el reactor de pirólisis y que permite el ensamblaje rápido del sistema. La mufla funciona a 220 V y tiene una potencia de 2.2 kW, esta dotada de una termocupla tipo K y un sistema electrónico PID-Autonics TZN4S para la lectura y control de la temperatura. A la salida del reactor, los gases de pirólisis ingresan al sistema de

condensación formado por cinco kitsatos conectados en serie y sumergidos en una solución de agua y etilenglicol para mantener el baño a 0 °C, la temperatura del baño de enfriamiento está regulada por un chiller.

Las cargas de NFU (150 g) fueron primero pirolizadas a diferentes condiciones de presión de vacío (33.19 y 30.52 kPa abs.) y manteniendo constantes la temperatura (550 °C) y el tamaño de partícula (25x25 mm), luego a la mejor condición de presión de vacío y manteniendo constante el tamaño de partícula se vario la temperatura (500 °C, 550 °C, 600 °C y 650 °C); posteriormente a la mejor condición de temperatura y manteniendo la presión constante se vario el tamaño de partícula (25x25 mm, 50x50 mm y 150x150 mm) en el sistema experimental descrito. En todos los casos se calculó el rendimiento de las fracciones líquidas y sólidas y se estimo el rendimiento de la fracción gaseosa por balance de masa. La cantidad de ensayos para cada condición fue un mínimo de tres para asegurar la reproducibilidad de los resultados.

Una vez establecida la condición que maximizaba el rendimiento de productos líquidos se realizaron corridas adicionales para recolectar la cantidad suficiente de la fracción líquida, la cual se analizó de acuerdo a los métodos normalizados por ASTM para muestras de hidrocarburos: Contenido de azufre (ASTM D4294), viscosidad (ASTM D445), densidad (ASTM D5002), punto de inflamación Pensky-Martens (ASTM D93), poder calorífico (ASTM D240), contenido de agua (ASTM D95), cenizas (ASTM D482), punto de fluidez (ASTM D97) y destilación Hempel (ASTM D285).

B. Pirólisis a escala de planta piloto

Se diseño y construyó una planta piloto para poder realizar la macro pirólisis de los NFU. El equipo es capaz de procesar 37 kg de llantas con un tamaño de 150x150 mm a 550°C y a una presión de vacío menor a 40 kPa abs. La planta piloto consta de: a) Horno, b) Reactor, c) Sistema de condensación, d) Sistema de vacío, e) Sistema de calentamiento y f) Sistemas auxiliares. El horno es de tipo cilíndrico con un diámetro externo de 740 mm y un diámetro interno de 460 mm, la longitud externa es de 740 mm y la longitud interna de 600 mm. El horno consta de tres capas. La capa interna es un ladrillo cerámico capaz de resistir hasta 1200 °C con un espesor de 115 mm, la segunda capa es un aislante de fibra cerámica capaz de resistir temperaturas entre 538 °C y 1482 °C con un espesor de 25 mm y finalmente una cubierta de chapa metálica de hierro galvanizado de 2 mm de espesor. El reactor es de acero inoxidable de tipo cilíndrico con un diámetro externo de 360 mm y una longitud de 642 mm, el espesor de la chapa metálica es de 2 mm. La tapa es del mismo material y se emperna al reactor junto con un empaque de nitrilo capaz de soportar hasta una temperatura de 600 °C. A la tapa va soldada un termopozo en la parte central y un tubo de 51 mm de diámetro para la salida de los gases de pirólisis. El sistema de condensación consta de dos condensadores colocados en serie. El primer condensador (C-1) es de tipo serpentín hecho con tubo de acero inoxidable de

8 mm de diámetro externo, con una longitud de 2000 mm. El segundo condensador (C-2) es de tipo coraza-tubo y el gas ingresa por la parte inferior del tubo y sale por la parte superior hacia el sistema de tratamiento de gases, por la coraza superior ingresa el agua de enfriamiento a temperatura ambiente y a contracorriente del flujo de gases.

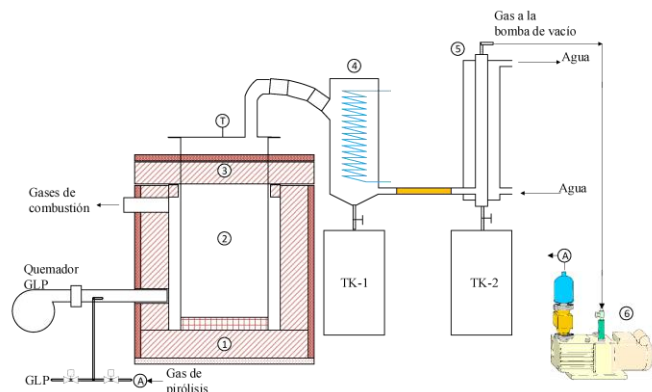


Fig. 2 Esquema de la planta piloto para la pirólisis de los NFU. 1) Horno, 2) Reactor, 3) Tapa del reactor, 4) Condensador, 5) Condensador, 6) Bomba de vacío

Al sistema se cargo 20.18 kg de pedazos de NFU y se procedió a la pirólisis al vacío a una temperatura promedio en el reactor de 480 °C y una presión de vacío de 38.85 kPa abs., la temperatura del agua de enfriamiento fue de 19 °C.

III. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

A. Efecto de la presión sobre los rendimientos

En la Tabla II se muestran los resultados de la pirólisis de muestras de 150 g de NFU a dos condiciones de presión de vacío (33.19 y 30.52 kPa abs.) y manteniendo constante la temperatura (550 °C) y el tamaño de partícula (25x25 mm).

TABLA II
EFECTO DE LA PRESIÓN VS. RENDIMIENTOS DE LOS PRODUCTOS DE PIRÓLISIS

N° Exp.	Presión (kPa abs.)					
	33.19			30.52		
	Rendimientos (% m/m)					
	L ^a	S ^b	G ^c	L	S	G
1	49.02	42.54	8.44	53.50	40.00	6.50
2	51.86	41.02	7.12	55.02	40.31	4.67
3	49.64	40.50	9.86	54.43	39.31	6.26
Prom.	50.17	41.35	8.47	54.32	39.87	5.81

^a Líquidos, ^b Sólidos, ^c Gases

De los datos mostrados en la Tabla II se observa que a menor presión (30.52 kPa) hay un menor rendimiento de productos gaseosos y una mayor producción de producto líquido (54.32%), esto se debe a que se tienen menores tiempos de residencia de los productos gaseosos en la zona de reacción y por ello hay una menor generación de reacciones

secundarias, se evidencia que una menor presión absoluta es favorable a las reacciones de pirólisis que llevan a la formación de productos líquidos. Según Martínez et al. [2] y Roy et al. [11] a menor presión se limitan las reacciones secundarias por lo que se minimiza la formación de productos carbonáceos sobre la superficie del producto sólido entonces el área superficial mejora y los rendimientos de sólidos y gases disminuyen, todo ello se comprueba de los datos mostrados. En consecuencia, se decidió trabajar en los siguientes experimentos a una presión de 30.52 kPa.

B. Efecto de la temperatura sobre los rendimientos

En la Tabla III se muestran los resultados de la pirólisis de muestras de 150 g de NFU a las temperaturas de 500 °C, 550 °C, 600 °C y 650 °C manteniendo constante la presión a 30.52 kPa abs. y con un tamaño de partícula de 25x25 mm.

TABLA III
EFECTO DE LA TEMPERATURA VS. RENDIMIENTOS DE LOS PRODUCTOS DE PIRÓLISIS

Temperatura (°C)	Rendimientos (% m/m)		
	Líquidos	Sólidos	Gases
500	52.55	40.27	7.19
550	54.32	39.87	5.81
600	50.35	39.82	9.83
650	51.48	43.66	4.86

En la Fig. 3 se comparan los resultados del rendimiento de los productos de la pirólisis a diferentes temperaturas observando que a la temperatura de 550 °C se obtiene el mayor rendimiento de productos líquidos y el menor rendimiento de productos sólidos y gaseosos y también se puede apreciar que a 600°C se observa el menor rendimiento de productos líquidos y sólidos y un mayor rendimiento de productos gaseosos. Esto concuerda con los resultados reportados por Williams et al. [12] quien establece que a menor presión, mayor temperatura y mayor velocidad de calentamiento aumenta el rendimiento de productos líquidos, en nuestro caso se aprecia que hay un pico de máximo rendimiento de líquidos a 550 °C, luego disminuye y vuelve a subir a 650 °C y también a esa temperatura aumenta el rendimientos de productos sólidos y disminuyen los productos gaseosos. Ese comportamiento puede estar asociado a la presión de vacío moderada que se ha empleado pues a mayor temperatura (650 °C) se generan más productos gaseosos en la zona de reacción y debido a la capacidad de la bomba todos no serán extraídos a la misma velocidad produciéndose una recondensación en el reactor la cual favorece la formación del producto sólido. Martínez et al. [2] mencionan que el rendimiento de sólidos debe ser similar a la cantidad de negro de humo y ceniza que esta en los NFU pero que dependiendo de una serie de variables como el tamaño del reactor, la eficiencia en la transferencia de calor, la velocidad de calentamiento y el tiempo de residencia de los vapores en la

zona de reacción y a la ocurrencia de reacciones secundarias puede darse la formación de compuestos carbonosos y aumentar el rendimiento de sólidos.

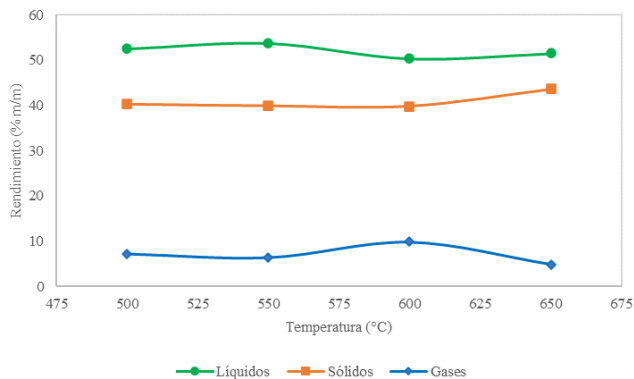


Fig. 3 Efecto de la temperatura sobre el rendimiento de los productos

C. Efecto del tamaño de la partícula

En la Tabla IV se muestran los resultados de la pirólisis de muestras de 150 g de NFU a 550 °C, 30.52 kPa abs. y variando el tamaño de partícula. De los resultados obtenidos se aprecia que a menor tamaño de partícula mayor rendimiento de productos líquidos, que el rendimiento de sólidos es casi constante y el rendimiento de productos gaseosos aumenta con el aumento del tamaño de la partícula.

TABLA IV
EFECTO DEL TAMAÑO DE LA PARTÍCULA VS. RENDIMIENTOS DE LOS PRODUCTOS DE PIRÓLISIS

Tamaños de la partícula	Rendimientos (% m/m)		
	Líquidos	Sólidos	Gases
25x25 mm	54.32	39.87	5.81
50x50 mm	51.27	39.97	8.75
150x150 mm	49.64	40.50	9.86

Martínez et al. [2] indican que a pesar de estar bien establecido que el tamaño de la partícula afecta la cinética de la pirólisis y la transferencia interna de calor (afectando los rendimientos de los productos de la pirólisis) existen pocos estudios respecto al tamaño de la partícula y su influencia sobre el proceso de la pirólisis de los NFU, esto se debe a que la mayoría de los estudios se han realizado a altas tasas de transferencia de calor es decir a condiciones de pirólisis rápida (tamaño de partícula < 2 mm) y por este motivo el tamaño de la partícula no ha sido ampliamente estudiado. Se considera generalmente que en los procesos termoquímicos tamaños pequeños de partícula tienen una conducta isotérmica y no presentan limitaciones internas a la transferencia de masa es decir que no hay gradientes de masa o temperatura al interior de la partícula, pero lo contrario ocurre en partículas grandes por ello se espera que a mayor tamaño de partícula disminuya el rendimiento de productos líquidos y gaseosos. En contraste

Antoniou et al. [13] menciona que el tamaño de partícula de los NFU no influye mucho en el rendimiento de los productos de la pirólisis y que, cuanto mayor sea el tamaño de partícula, mayor será la cantidad de los productos líquidos con un rango de ebullición alto, mientras que el rendimiento de negro de humo será casi constante en las mismas condiciones.

Los datos obtenidos confirman lo mencionado por Antoniou et al. respecto a que la variación en los rendimientos de líquidos existe, pero es pequeña y que el contenido de sólidos es casi constante por otro lado lo establecido por Martínez et al. explica el mayor rendimiento de líquidos. El rendimiento de los gases que es inverso a lo que cabría esperar puede ser debido a la existencia de reacciones secundarias en la zona de reacción que lleven al craqueo de los productos líquidos y generen más gases.

D. Caracterización fisicoquímica de los productos

De los experimentos anteriores se definió que las condiciones operativas que maximizan el rendimiento de productos líquidos se dan a una temperatura de 550°C, presión de operación de 30.52 kPa abs. y un tamaño de partícula de 25x25 mm, se corrieron seis ensayos adicionales para recolectar muestra suficiente para los análisis fisicoquímicos de los productos líquidos y sólidos, los resultados obtenidos se muestran en la Tabla V.

TABLA V
ANÁLISIS FISICOQUÍMICOS A LOS PRODUCTOS DE LA PIRÓLISIS

Producto	Parámetro	Valor
Líquidos	Contenido de Azufre (% m/m)	0.813
	Destilación Hempel	Ver Fig. 4
	Viscosidad a 40°C (cSt)	5.824
	Densidad (g/mL)	0.911
	Punto de Inflamación (°C)	31
	Poder Calorífico Superior (MJ/kg)	40.81
	Contenido de Agua (% v/v)	2.7
	Cenizas (% m/m)	0.039
	Punto de Fluidez (°C)	-9
Sólidos	Poder Calorífico Superior (MJ/kg)	23.49
	Humedad (% m/m)	0.4082
	Densidad Aparente (g/mL)	0.6063

En el Perú se producen y procesan básicamente dos tipos de crudo, el crudo pesado denominado "Selva" y un crudo más liviano denominado "Talara", en la Tabla VI se muestran sus características fisicoquímicas y se las compara con el líquido de pirólisis, se puede apreciar que el líquido de pirólisis tiene las características de un crudo "Talara" y por tanto podría ser una carga fácilmente procesable en una refinería de petróleo.

TABLA VI
CARACTERÍSTICAS TÍPICAS DE LOS CRUDOS PERUANOS

Parámetro	Crudo Talara ^a		Crudo Selva ^a	
	Mínimo	Máximo	Mínimo	Máximo
Contenido de Azufre (% m/m)	0.0403	0.394	0.0666	1.85
Viscosidad a 40°C (cSt)	2.791	30.6	16.86	371
Densidad (g/mL)	nd	nd	0.8967	0.9054
Punto de Inflamación (°C)	62.5	62.5	nd	nd
Poder Calorífico Superior (MJ/kg)	41.717	46.213	42.869	44.601
Contenido de agua (% v/v)	nd	3.9	0.05	1.1
Cenizas (% m/m)	0.001	0.13	0.009	0.021
Punto de Fluidez (°C)	-21	21	-24	-3

^a Tomado de [14]
nd No disponible

En la Fig. 4 se muestra la curva de destilación Hempel de los líquidos de pirólisis, considerando lo establecido por Wauquier et al. en [15] donde se toma como referencia el crudo Arabian Light y se determinan los cortes del petróleo como: Nafta ligera (20 a 80 °C), Nafta pesada (180 a 250 °C), Kerosene (180 a 250 °C, Diesel (250 a 370°C) y Residual atmosférico (370+ °C) podemos estimar los % volumétricos de los cortes que se obtendrían al destilar los líquidos de pirólisis los cuales serían: Nafta ligera 0.52%, Nafta pesada 22.28%, Kerosene 18%, Diesel 8.8%, Residual 36% y se tiene una pérdida del 14.4%. Se registró durante la destilación Hempel una fracción que no condensaba entre 70 °C y 180 °C lo que indica la presencia de gases disueltos o un craqueo a esas condiciones. La destilación indica que la mayoría de los cortes se ubican en el rango de la gasolina y diésel lo que representa el 49.60% del producto líquido.

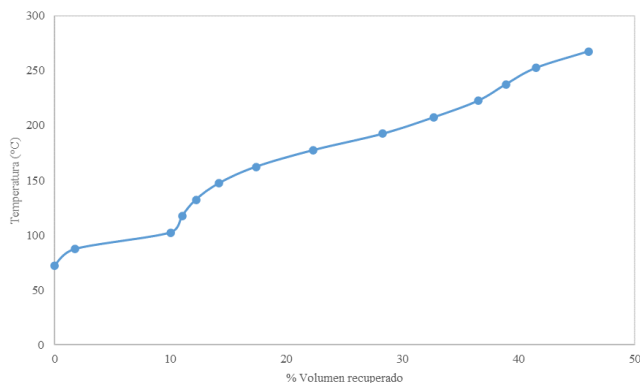


Fig. 4 Curva de destilación Hempel (ASTM D285) del líquido de pirólisis

En la Tabla VII se comparó el Poder Calorífico Superior (PCS) del producto sólido versus el PCS de la leña, Gas Licuado de Petróleo (GLP) y Gas Natural (GN), se aprecia que el producto sólido es mejor combustible que la leña y podría ser empleado como combustible o precursor de productos químicos como el negro de humo.

TABLA VII
PODER CALORÍFICO SUPERIOR DEL SÓLIDO DE PIRÓLISIS VS. COMBUSTIBLES DE USO TÍPICO

Parámetro	Sólido de la pirólisis de los NFU	Leña ^a	GLP ^b	GN ^b
Poder Calorífico Superior (MJ/kg)	23.49	19.87	49.28	53.67

^aTomado de [16]

^bTomado de [17]

E. Rendimientos obtenidos en la planta piloto

Se pirolizaron 20.18 kg de pedazos de NFU con un tamaño promedio de 150x150 mm en la planta piloto descrita anteriormente, la fuente de calentamiento fue GLP que se alimento a un quemador diseñado para ello y el aire de combustión se alimento a través de un soplador, la temperatura promedio en el reactor fue de 480 °C, el tiempo que duró la corrida fue de 390 minutos, a los 50 minutos se alcanzó la temperatura de 250 °C a la cual se inician las reacciones de pirólisis, a los 200 minutos se alcanzó la temperatura de 480 °C y se mantuvo con ligeras variaciones (± 20 °C) hasta el final del proceso, se mantuvo una presión de 38.85 kPa durante el proceso. Se gastaron 9.68 kg de GLP y el enfriamiento se logró con agua a 19 °C la cual se recirculo y no se registro un aumento apreciable en la misma pero cada dos horas se agregó 3 kg de hielo para prevenir cualquier aumento de temperatura.

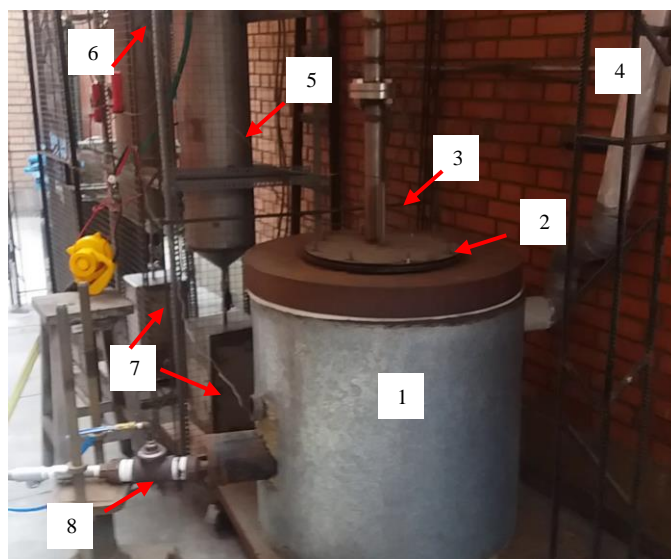


Fig. 5 Planta piloto. 1) Horno, 2) Reactor, 3) Termopozo, 4) Chimenea, 5) Condensador, 6) Condensador, 7) Tanques de producto líquido, 8) Quemador de GLP

Al final del proceso, se retiraron los tanques de producto líquido los cuales se pesaron y cuando el horno estuvo frío se retiró el producto sólido que también fue pesado, mediante un balance de masa se estimó la masa de los gases incondensables. En la Fig. 6 se puede apreciar el proceso de carga de muestra —pedazos de NFU— inicialmente se muestra el reactor vacío (1), luego con los NFU (2), después de la pirólisis queda el residuo sólido (3) y finalmente el sólido que se retira del reactor (4). En la Tabla VIII se presentan los rendimientos de los productos.

TABLA VIII
RENDIMIENTO DE PRODUCTOS EN LA PIRÓLISIS DE NFU EN PLANTA PILOTO

Rendimientos (% m/m)		
Líquidos	Sólidos	Gases
35.88	42.42	21.70

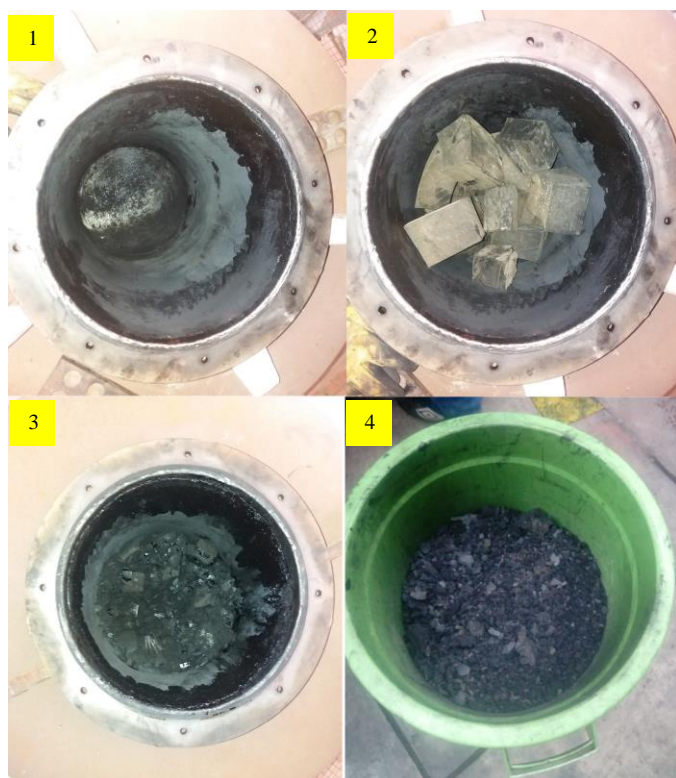


Fig. 6 Proceso carga y descarga del reactor en la planta piloto. 1) Reactor vacío, 2) Reactor cargado con los NFU, 3) Reactor después del proceso de pirólisis, 4) Sólido retirado del reactor

Si comparamos los rendimientos de líquidos vemos que en la pirólisis a escala de laboratorio para un tamaño de partícula de 150x150 mm se obtuvo 49.64% de líquidos y 9.86% de gases, a escala de planta piloto el rendimiento de líquidos cae a 35.88% y los gases suben a 21.70% hay varios factores que explican este resultado, primero la temperatura de pirólisis es 480 °C a nivel de planta piloto versus 550 °C a escala de laboratorio; también el tiempo de residencia en la planta piloto fue de 390 minutos versus los 180 minutos en

promedio a escala de laboratorio, tercero la presión de vacío a escala de planta piloto fue 38.85 kPa abs. y a nivel de laboratorio se trabajó con una presión de 30.52 kPa abs., finalmente el tamaño de partícula de los NFU a escala de planta piloto no fue homogéneo como se aprecia en la Fig. 6. Como se analizó anteriormente medida que aumenta el tamaño de la partícula, aumenta el tiempo de residencia y disminuye la temperatura, la posibilidad de la ocurrencia de reacciones secundarias es mayor, esto es lo que probablemente ocurre pues el % de gases aumenta significativamente lo que indica reacciones de craqueo de los compuestos que llevan a líquidos esto se confirma porque el % de sólidos se mantiene similar a lo hallado en las experiencias a nivel de laboratorio (40.50%). Roy et al. en [11] pirolizaron muestras de NFU con un tamaño de 150 a 400 mm en un reactor batch a una presión < 3 kPa y una temperatura de 420 °C y obtuvo rendimientos de líquidos 58.4%, sólidos 34.8%, gases 2.1% y agua 4.7% estos resultados indican que cuando la presión es lo suficientemente baja se pueden retirar rápidamente los volátiles de la zona de reacción y minimizar las reacciones secundarias de craqueo, repolimerización, recondensación, oxidación y reducción.

IV. CONCLUSIONES

Se investigó la pirólisis al vacío de los NFU y se determinó que las condiciones que maximizaban el rendimiento de productos líquidos son: Presión de 30.52 kPa, temperatura de 550 °C y un tamaño de partícula de 25x25 mm. A estas condiciones se obtiene un rendimiento de productos líquidos del 54.32%, sólidos 39.87% y gases 5.81%.

De los resultados de los ensayos fisicoquímicos se aprecia que el producto líquido tiene un contenido alto de azufre, con un bajo punto de inflamación y una viscosidad moderada, comparado con los crudos peruanos típicos se concluye que tiene características que lo hacen similar al crudo Talara. En conclusión, el producto líquido puede ser empleado como carga a una refinería de petróleo o puede ser usado como combustible industrial, pero debe ser fraccionado para retirar la fracción ligera o ser mezclado con un producto más pesado para formular un combustible industrial que cumpla las especificaciones nacionales.

Los líquidos fueron destilados y se determinó que la fracción de gasolinas y diésels representan el 49.60% del producto líquido y el resto es una fracción pesada mayor a 282 °C.

El producto sólido obtenido es un producto carbonoso con bajo contenido de humedad, su poder calorífico superior de 23.49 MJ/kg lo clasifica como carbón subbituminoso de tipo B según ASTM D388. El producto es suave al tacto y fácil de moler para alcanzar el tamaño de malla deseado y puede ser empleado como combustible industrial o precursor de carbón activado o negro de humo.

Los resultados obtenidos en los ensayos a nivel de planta piloto comparados a los ensayos a escala de laboratorio indican que se debe mejorar la presión de vacío y el caudal de

extracción de los gases de la zona de reacción, asimismo es necesario optimizar el quemador de GLP para poder emplear los gases de pirólisis como combustible.

AGRADECIMIENTOS

Los autores agradecen a la Compañía DyD Soluciones Ambientales S.A. por el financiamiento de los experimentos a nivel de planta piloto y a la Unidad de Investigación de la Facultad de Ingeniería de Petróleo, Gas Natural y Petroquímica de la UNI por el financiamiento de los experimentos a escala de laboratorio.

REFERENCIAS

- [1] U. Ickerodt and M. Maluck, "Energy transition outlook 2020," 2019. doi: 10.2307/j.ctv7xbrmk.21.
- [2] J. D. Martínez, N. Puy, R. Murillo, T. Garcia, M. V. Navarro, and A. M. Mastral, "Waste tyre pyrolysis – A review," *Renew. Sustain. Energy Rev.*, vol. 23, pp. 179–213, 2013, doi: 10.1016/j.rser.2013.02.038.
- [3] A. Quek and R. Balasubramanian, "Liquefaction of waste tires by pyrolysis for oil and chemicals — A review," *J. Anal. Appl. Pyrolysis*, vol. 101, pp. 1–16, 2013, doi: 10.1016/j.jaap.2013.02.016.
- [4] M. Suhanya, M. Thirumarimurugan, and T. Kannadasan, "Recovery of Oil From Waste Tyres Using Pyrolysis Method: a Review," *Int. J. Res. Eng. Technol.*, vol. 1, no. 2, pp. 81–90, 2013, [Online]. Available: <http://citeseerx.ist.psu.edu/viewdoc/download?doi=10.1.1.680.6260&rep=rep1&type=pdf>.
- [5] M. Astorayme, "Producción de combustibles sintéticos a partir de neumáticos fuera de uso," Universidad Nacional de Ingeniería, 2021.
- [6] J. I. Osayi, S. Iyuke, and S. E. Ogbeide, "Biocrude Production through Pyrolysis of Used Tyres," *J. Catal.*, vol. 2014, pp. 1–9, 2014, doi: 10.1155/2014/386371.
- [7] J. A. Ramírez Velarde, C. E. Gómez Lazarte, and J. L. Donoso Rodríguez, "Plan de negocio para la implementación de una planta de reciclaje de llantas usadas mediante el proceso de Pirólisis," Universidad Peruana de Ciencias Aplicadas, 2018.
- [8] A. Ayanoglu and R. Yumrutas, "Rotary kiln and batch pyrolysis of waste tire to produce gasoline and diesel like fuels," *Energy Convers. Manag.*, vol. 111, pp. 261–270, 2016, doi: 10.1016/j.enconman.2015.12.070.
- [9] V. Pretell and R. Erazo, "Catalytic pyrolysis of the Empty Fruit Bunches of the Oil Palm and the Sugarcane Bagasse : Non-Isothermal Thermogravimetric Kinetic Analysis Pirólisis Catalítica de los Racimos de Frutos Vacíos de la Palma Aceitera y el Bagazo de Caña de Azúcar : Análisis," in *18th LACCEI International Multi-Conference for Engineering, Education, and Technology: "Engineering, Integration, and Alliances for a Sustainable Development" "Hemispheric Cooperation for Competitiveness and Prosperity on a Knowledge-Based Economy,"* 2020, no. July, pp. 27–31, doi: <http://dx.doi.org/10.18687/LACCEI2020.1.1.69>.
- [10] W. C. Wang, C. J. Bai, C. T. Lin, and S. Prakash, "Alternative fuel produced from thermal pyrolysis of waste tires and its use in a diesel engine," *Appl. Therm. Eng.*, vol. 93, pp. 330–338, 2016, doi: dx.doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2015.09.056.
- [11] C. Roy, B. Labrecque, and B. de Caumia, "Recycling of scrap tires to oil and carbon black by vacuum pyrolysis," *Resour. Conserv. Recycl.*, vol. 4, no. 3, pp. 203–213, 1990, doi: 10.1016/0921-3449(90)90002-L.
- [12] P. T. Williams, S. Besler, and D. T. Taylor, "The pyrolysis of scrap automotive tyres. The influence of temperature and heating rate on product composition," *Fuel*, vol. 69, no. 12, pp. 1474–1482, 1990, doi: 10.1016/0016-2361(90)90193-T.
- [13] N. Antoniou and A. Zabaniotou, "Features of an efficient and environmentally attractive used tyres pyrolysis with energy and material recovery," *Renew. Sustain. Energy Rev.*, vol. 20, pp. 539–558, 2013, doi: 10.1016/j.rser.2012.12.005.
- [14] V. Pretell, "Pirólisis Rápida de Biomasa de Palma Africana y Caña de Azúcar para la obtención de Bio-Petróleo," Universidad Nacional de Ingeniería-Perú, 2013.
- [15] J. P. Wauquier, *Petroleum Refining 1, Crude Oil, Petroleum Products, Process Flowsheets*. Paris, 1995.
- [16] M. Uceda, "Determinación del poder calorífico de 20 especies forestales de la amazonía Peruana," *Rev. For. del Perú*, vol. 12, no. 1–2, pp. 1–15, 2015, [Online]. Available: [http://cedinfor.lamolina.edu.pe/Articulos_RFP/Vol12_no1-2_84_\(16\)/vol12_art8.pdf](http://cedinfor.lamolina.edu.pe/Articulos_RFP/Vol12_no1-2_84_(16)/vol12_art8.pdf).
- [17] V. Arroyo, "Costos de los combustibles. Seminario de capacitación: Eficiencia energética y administración de la demanda en el sector productivo." MINEM, Lima - Perú, p. 20, 2008, [Online]. Available: [http://www2.congreso.gob.pe/sicr/cendocbib/con_uibd.nsf/AE982758BA07E4B3052574F7005E39CA/\\$FILE/Costosdeloscombustible_s.pdf](http://www2.congreso.gob.pe/sicr/cendocbib/con_uibd.nsf/AE982758BA07E4B3052574F7005E39CA/$FILE/Costosdeloscombustible_s.pdf).