




Characterization of physicochemical properties of Diesel B5 S-50 blends with pyrolytic liquid fuel obtained from disposable face masks

Williams Ramos¹; Nicole Blas²; Leli Peñaloza³; Marco Santillan⁴; Jesús Huamán⁵; Johnny Nahui-Ortiz⁶
Raymundo Erazo⁷

^{1,2,3,4,5,6}Universidad Nacional de Ingeniería, Perú, wramosv@uni.edu.pe, nicole.blas.m@uni.pe, janeth.penalozai@uni.pe,
wilder.santillan.p@uni.pe, kevin.huaman.r@uni.pe, jnahuio@uni.edu.pe

⁷Universidad Nacional Mayor de San Marcos, Perú, rerazoe@unmsm.edu.pe

Abstract—The accumulation of disposable face mask waste due to the COVID-19 pandemic has highlighted the urgent need to develop sustainable solutions for their management and valorization. This study analyzed the characterization of Diesel B5 S-50 blends with a pyrolytic liquid fuel obtained from the catalytic pyrolysis of disposable face masks, aiming to assess their feasibility as an alternative fuel. To this end, blends containing 5%, 10%, and 15% of pyrolytic liquid by volume were formulated and characterized using ASTM standard methods to determine their physicochemical properties. The results show that the incorporation of pyrolytic liquid does not significantly affect fuel quality, as all formulations meet the requirements established in Supreme Decree No. 092-2009-EM and its errata. The cetane index increased from 44.8 (base diesel) to 49.3 (with 15% PL), sulfur content decreased from 47 mg/kg to 13 mg/kg, and carbon residue was reduced from 0.08% to 0.05%. Viscosity and pour point remained stable (3.1–3.2 cSt and -27 °C, respectively). These improvements suggest that the blends can be used in diesel engines without compromising performance.

Keywords— Catalytic pyrolysis, Diesel B5 S-50, pyrolytic liquid, physicochemical characterization, alternative fuels.

Caracterización de propiedades fisicoquímicas de mezclas de Diesel B5 S-50 con combustible líquido pirolítico obtenido a partir de mascarillas desechables

Williams Ramos¹; Nicole Blas²; Leli Peñaloza³; Marco Santillan⁴; Jesús Huamán⁵; Johnny Nahui-Ortiz⁶; Raymundo Erazo⁷;

^{1,2,3,4,5,6}Universidad Nacional de Ingeniería, Perú, wramosv@uni.edu.pe, nicole.blas.m@uni.pe, janeth.penalozai@uni.pe, wilder.santillan.p@uni.pe, kevin.huaman.r@uni.pe, jnahuio@uni.edu.pe

⁷Universidad Nacional Mayor de San Marcos, Perú, rerazoe@unmsm.edu.pe

Resumen– La acumulación de residuos de mascarillas desechables como consecuencia de la pandemia del COVID-19 ha generado la necesidad de desarrollar soluciones sostenibles para su gestión y aprovechamiento. En este estudio, se analizó la caracterización de mezclas de diésel B5 S-50 con un combustible líquido pirolítico obtenido a partir de la pirólisis catalítica de mascarillas desechables, con el propósito de evaluar su viabilidad como combustible alternativo. Para ello, se formularon mezclas con 5%, 10% y 15% de líquido pirolítico en volumen, las cuales fueron caracterizadas mediante métodos ASTM para determinar sus propiedades fisicoquímicas. Los resultados muestran que la incorporación de líquido pirolítico no afecta significativamente la calidad del combustible, ya que todas las formulaciones cumplen con los requisitos establecidos en el Decreto Supremo N° 092-2009-EM y fe de erratas. El índice de cetano aumentó de 44.8 (diésel base) hasta 49.3 (con 15% LP), el contenido de azufre disminuyó de 47 mg/kg a 13 mg/kg, y el residuo de carbono se redujo de 0.08% a 0.05%. La viscosidad y el punto de escurrimiento se mantuvieron estables (3.1–3.2 cSt y -27 °C, respectivamente). Estas mejoras sugieren que las mezclas pueden ser utilizadas en motores diésel sin comprometer su desempeño.

Palabras clave– Pirólisis catalítica, diésel B5 S-50, líquido pirolítico, caracterización fisicoquímica, combustibles alternativos.

I. INTRODUCCIÓN

La pandemia del COVID-19 generó una gran demanda en el uso de mascarillas desechables (compuestas principalmente por polipropileno), generando una gran acumulación de desechos en el medio ambiente al ser desechadas [1]. En el Perú, durante el año 2021, se generaron aproximadamente 9 695 toneladas anuales de residuos de mascarillas, de las cuales 3 587 toneladas correspondieron a mascarillas quirúrgicas [2]–[4]. En un contexto más amplio, se ha estimado que durante la pandemia se descartaban diariamente alrededor de 12.2 millones de mascarillas desechables, lo que equivale a aproximadamente 15 120 toneladas anuales. De esta cantidad, 12 222 toneladas correspondían a mascarillas quirúrgicas de tres capas. La inadecuada gestión de estos residuos ha intensificado los riesgos de contaminación ambiental, evidenciando la necesidad urgente de desarrollar tecnologías sostenibles que permitan convertir estos desechos en recursos aprovechables [3], [5]. Por lo que es necesario buscar soluciones a la generación de estos residuos.

Por otro lado, el Perú depende en gran medida de los combustibles fósiles como principal fuente de energía, siendo el Diésel B5 S-50 uno de los más utilizados tanto en el sector industrial, como combustible para maquinaria, como en el transporte de vehículos. Sin embargo, la producción nacional de combustibles es insuficiente para cubrir la demanda interna, lo que ha llevado al país a importar grandes volúmenes de hidrocarburos. En 2023, se importaron aproximadamente 22 millones de barriles de diésel, 5.8 millones de barriles de gasolinas y 35.6 millones de barriles de petróleo crudo. Esta alta dependencia de las importaciones no solo genera una vulnerabilidad económica ante las fluctuaciones del mercado internacional, sino que también subraya la necesidad urgente de desarrollar alternativas sostenibles que reduzcan esta dependencia y refuercen la seguridad energética del país[6]–[8]

Asimismo, los catalizadores son muy importantes en los procesos de conversión de la refinación de petróleo como el Craqueo Catalítico Fluidizado (FCC), el catalizador usado es llamado catalizador de FCC y contiene principalmente Zeolita Y[9] Las unidades de FCC renuevan diariamente alrededor del 1 al 2% de catalizador (llamado catalizador de equilibrio (E-Cat)) del inventario para mantener el rendimiento y la calidad del producto, en el Perú se estima que se renueva alrededor de 25 t/año de E-Cat y se consume alrededor de 3107 t/año en las unidades de FCC [10]–[16]. Por lo que es importante estudiar procedimientos de reutilización de estos residuos industriales.

Actualmente se están estudiando procesos de reciclaje químico de residuos plásticos como las mascarillas desechables y nuevas alternativas para la obtención de combustibles líquidos, Uno de los procesos que se encuentra en estudio es la pirólisis catalítica que consiste en la degradación térmica de una carga en presencia de un catalizador, esto se consigue llevando a la materia prima a elevadas temperaturas en una ausencia de oxígeno, una materia prima con potencial para ser fuente de combustibles líquidos son los residuos de las mascarillas desechables [17]–[19]

Asimismo, existen algunas referencias donde se estudia las características de las propiedades fisicoquímicas que tendría una mezcla entre el diésel y un combustible

alternativo, de esta manera contribuir a la demanda de combustibles fósiles y a su progresivo reemplazo por opciones más amigables con el medio ambiente[20]–[22]. Actualmente no hay ningún estudio acerca de la caracterización de las mezclas de diésel B5 S-50 con el producto obtenido de la pirólisis de las mascarillas desechables.

La presente investigación busca estudiar las características de las propiedades fisicoquímicas que tendrían las mezclas entre el diésel B5 S-50 y el combustible líquido obtenido por la pirólisis catalítica de mascarillas desechables a diferentes proporciones, para lo cual se obtendrá el líquido pirolítico y se realizarán las mezclas respectivas, posteriormente se realizará la caracterización de mezclas y se discutirán los resultados frente a las normas vigentes para corroborar que el producto se encuentra dentro de especificación. Se espera tener como resultado que las mezclas entre el diésel B5 S-50 y el combustible líquido obtenido por la pirólisis catalítica de mascarillas desechables a diferentes proporciones se encuentren dentro de la especificación del diésel B5 S-50.

II. MATERIALES Y MÉTODOS

A. Muestras de Diesel B5 S-50 y líquido pirolítico

Para la investigación se adquirió una muestra de 8 L de Diesel B5 S-50 de una estación de servicios local. Asimismo, se obtuvo de manera experimental una muestra de líquido pirolítico obtenido a partir de la pirólisis catalítica de mascarillas desechable mediante el procedimiento descrito en [23] y caracterizado mediante lo establecido en [24]. Se obtuvieron y acumularon 600 mL de líquido pirolítico de varios experimentos realizados.

B. Formulación de mezclas de Diesel B5 S-50 y líquido pirolítico

TABLA I

COMPOSICIÓN DE MEZCLAS DE DIESEL B5 S-50 Y LÍQUIDO PIROLÍTICO FORMULADAS

Código de muestra	Composición de mezclas	
	Diesel B5 S-50 (%Vol.)	Líquido pirolítico (%Vol.)
95%DB5- 5% LP	95	5
90%DB5- 10% LP	90	10
85%DB5- 15% LP	85	15

Para este estudio, se formularon tres mezclas de Diésel B5 S-50 con líquido pirolítico, variando su proporción en 5%, 10% y 15% en volumen con el propósito de evaluar su impacto en las propiedades fisicoquímicas del combustible. En la Tabla I se presentan las proporciones utilizadas en cada formulación.

Para la preparación de mezclas de 1 L, se calcularon los volúmenes exactos de diésel B5 S-50 y líquido pirolítico según los requerimientos de cada composición. Posteriormente, los volúmenes fueron medidos con probetas y transferidos a vasos de precipitado de 1 L. A continuación, las mezclas fueron agitadas durante 30 minutos utilizando un

agitador magnético y una barra de agitación, con el fin de garantizar una homogeneización adecuada. En la Fig. 1, se ilustra el procedimiento experimental de formulación de las mezclas.



Fig. 1 Formulación de mezclas de Diesel B5 S-50 y líquido pirolítico

Si siguiendo el procedimiento de formulación de mezclas previamente descrito, se obtuvieron muestras homogeneizadas, asegurando la compatibilidad de ambos líquidos y la correcta ejecución del proceso de formulación. Posteriormente, las muestras fueron almacenadas en recipientes de vidrio ámbar de un litro, provistos de tapa y contratapa, para preservar sus propiedades fisicoquímicas.

C. Caracterización de propiedades fisicoquímicas de mezclas de Diesel B5 S-50 y líquido pirolítico

TABLA II
PROPIEDADES FISICOQUÍMICAS Y MÉTODOS DE ENSAYO PARA LA CARACTERIZACIÓN DE MUESTRAS DE COMBUSTIBLE

Propiedades fisicoquímicas	Método de ensayo
Destilación a 760 mmHg	ASTM D86
Punto de Inflamación Pensky Martens	ASTM D93
Viscosidad Cinemática a 40 °C	ASTM D445
Punto de Escurecimiento	ASTM D97
Gravedad API a 60°F	ASTM D1298
Índice de cetano	ASTM D976
Contenido de cenizas	ASTM D482
Residuo de carbón Ramsbottom	ASTM D189
Corrosión de lámina de cobre	ASTM D130
Poder calorífico bruto	ASTM D240
Azufre total	ASTM D4294

Las mezclas fueron caracterizadas mediante la determinación de sus propiedades fisicoquímicas, siguiendo los procedimientos establecidos en normas estandarizadas de la *American Society for Testing and Materials* (ASTM). Para ello, se emplearon materiales y equipos que cumplen con los requisitos de dichas normas. Los ensayos fueron realizados en el Laboratorio de Normalización de Petróleo y Derivados de la Universidad Nacional de Ingeniería (Lima, Perú). Además, se determinaron las propiedades fisicoquímicas del *Diesel B5 S-*

50 utilizado en la formulación de las mezclas. La Tabla II presenta un resumen de las propiedades fisicoquímicas y los métodos de ensayo aplicados en las muestras.

II. RESULTADOS

A. Resultados de caracterización de propiedades fisicoquímicas de mezclas de Diesel B5 S-50 y líquido pirolítico

Los resultados de la caracterización fisicoquímica de las mezclas de Diesel B5 S-50 y líquido pirolítico, así como de la muestra de Diesel B5 S-50, se presentan en la Tabla III. Para garantizar la repetibilidad de los resultados, cada ensayo se realizó por triplicado.

TABLA III
RESULTADOS DE CARACTERIZACIÓN DE PROPIEDADES FISICOQUÍMICAS DE LAS MUESTRAS

Propiedades fisicoquímicas	Método de ensayo	Muestras			
		Diesel B5 S-50	95% DB5-5% LP	90%DB5-10% LP	85%DB5-15% LP
Destilación a 760 mmHg (°C)	ASTM D86				
	Punto inicial	151.5	152.5	149.5	158.5
	5% Vol.	162.5	175.5	172.5	169.5
	10% Vol.	179.5	181.5	185.5	179.5
	15% Vol.	197.5	192.5	198.5	191.5
	20% Vol.	213.5	219.0	215.5	211.5
	25% Vol.	231.0	230.0	230.0	229.0
	30% Vol.	246.0	241.0	242.0	237.0
	40% Vol.	271.0	266.0	271.0	262.0
	50% Vol.	283.0	283.0	287.0	280.0
	60% Vol.	302.0	299.0	302.0	297.0
	70% Vol.	316.0	314.0	316.0	314.0
	80% Vol.	331.0	334.0	332.0	330.0
85% Vol.	342.0	343.0	342.0	341.0	
90% Vol.	354.0	351.0	353.0	352.0	
Punto final	377.0	360.0	376.0	367.0	
Destilado Recuperado (%Vol)		98.5	95.6	98.2	96.8
Punto de inflamación P.M.(°C)	ASTM D93	54.0	52.0	52.5	52.5
Viscosidad cinemática a 40 °C (cSt)	ASTM D445	3.195	3.105	3.099	3.202
Punto de escurrimiento (°C)	ASTM D97	-27	-27	-27	-27
Índice de cetano	ASTM D976	44.8	45.5	46.4	49.3
Contenido de cenizas (%masa)	ASTM D482	0.010	0.015	0.002	0.003

Residuo de carbon Ramsbotto m (%masa)	ASTM D189	0.08	0.08	0.06	0.05
Corrosión de lámina de cobre	ASTM D130	1a	1a	1a	1a
Azufre total (mg/kg)	ASTM D4294	47	33	47	13
Gravedad API a 60°F (°API)	ASTM D1298	34.3	34.8	35.2	35.8
Poder calorífico bruto	ASTM D240				
	(MJ/kg)	44.380	44.788	44.019	43.645
	(Btu/lb)	19080	19255	18925	18764
	(cal/g)	10607.2	10697.4	10520.9	10431.4

II. DISCUSIÓN DE RESULTADOS

A. Discusión de los resultados de caracterización de propiedades fisicoquímicas de mezclas de Diesel B5 S-50 y líquido pirolítico

Los resultados de la caracterización de las propiedades fisicoquímicas de las muestras fueron analizados y comparados con las especificaciones técnicas de calidad del Diesel B5 S-50 vigentes, establecidas en el Decreto Supremo N° 092-2009-EM del Ministerio de Energía y Minas, incluyendo su respectiva fe de erratas. Además, cada propiedad fisicoquímica evaluada fue clasificada según su naturaleza en una de las siguientes categorías: volatilidad, fluidez, composición y corrosividad. En la Tabla IV se presenta la discusión detallada de los resultados de caracterización de las muestras en relación con los estándares de calidad del Diesel B5 S-50 [25], [26].

TABLA IV
DISCUSIÓN DE RESULTADOS DE CARACTERIZACIÓN DE MUESTRAS

Propiedades fisicoquímicas	Métodos	Muestras				DS N°092-2009-EM y fe de erratas	
		Diesel B5 S-50	95% DB5-5% LP	90% DB5-10% LP	85% DB5-15% LP	Min	Max
Volatilidad							
Destilación a 760 mmHg (°C)	ASTM D86 90% Vol.	354.0	351.0	353.0	352.0	282	360
Punto de inflamación Pensky Martens (°C)	ASTM D93	54.0	52.0	52.5	52.5	52	-
Fluidez							
Viscosidad cinemática a 40 °C (cSt)	ASTM D445	3.195	3.105	3.099	3.202	1.9	4.1
Punto de escurrimiento (°C)	ASTM D97	-27	-27	-27	-27	-	4
Composición							

Índice de cetano	ASTM D976	44.8	45.5	46.4	49.3	45	-
Contenido de cenizas (%masa)	ASTM D482	0.010	0.015	0.002	0.003	-	0.01
Residuo de carbon Ramsbottom (%masa)	ASTM D189	0.08	0.08	0.06	0.05	-	0.35
Azufre total (mg/kg)	ASTM D4294	47	33	47	13	-	50
Corrosividad							
Corrosión de lámina de cobre	ASTM D130	1a	1a	1a	1a	-	3

El análisis de los resultados indica que tanto la muestra de Diesel B5 S-50 como las mezclas evaluadas cumplen con las especificaciones técnicas de calidad establecidas en el Decreto Supremo N° 092-2009-EM y fe de erratas. No se observaron desviaciones fuera de los límites normativos en ninguna de las propiedades fisicoquímicas evaluadas, lo que sugiere que las mezclas propuestas mantienen características adecuadas para su uso como combustible, sin comprometer los estándares de calidad exigidos.

Asimismo, se analizó el efecto de la adición de líquido pirolítico en cada una de las mezclas para cada una de las propiedades fisicoquímicas. A partir de los resultados de la destilación a 760 mmHg (según el método ASTM D86), se construyeron las curvas de destilación de cada muestra, las cuales fueron comparadas entre sí. La Fig. 2 presenta dichas curvas de destilación.

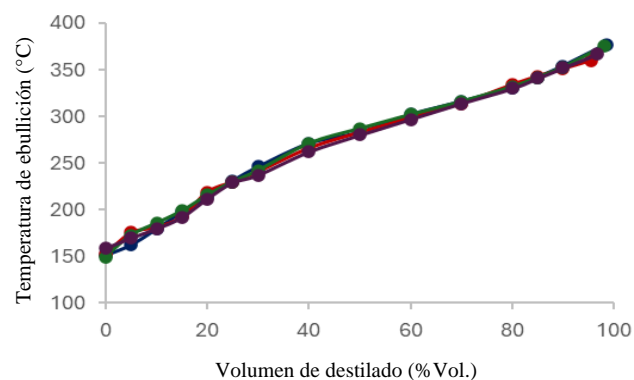


Fig. 2 Curvas de destilación (ASTM D86) de muestras Diesel B5 S-50 (Azul), 95% DB5- 5% LP (Rojo), 90%DB5- 10% LP (Verde), 85%DB5- 15% LP (Morado)

De la Fig. 2 se observa que las curvas de destilación prácticamente se superponen, esto podría atribuirse a la similitud en la composición y las propiedades volátiles de las mezclas evaluadas, lo que sugiere que la adición de líquido pirolítico en los porcentajes estudiados no genera una variación sustancial en el perfil de destilación del Diesel B5 S-50 [27], [28].

Asimismo, al analizar los resultados del punto de inflamación determinado mediante el método Pensky-Martens (ASTM D93), se observa que este disminuye a medida que

aumenta la proporción de líquido pirolítico en la mezcla. El diésel B5 presentó un punto de inflamación de 54.0°C, mientras que las mezclas con 5%, 10% y 15% de LP registraron valores de 52.0°C, 52.5°C y 52.5°C, respectivamente. Esto evidencia que la adición de líquido pirolítico introduce componentes más volátiles en la formulación, reduciendo la temperatura a la cual los vapores del combustible pueden inflamarse en presencia de una fuente de ignición [29], [30].

Por otro lado, al discutir los resultados de viscosidad cinemática a 40°C (ASTM D445), se observa que los valores varían en un rango estrecho entre 3.099 cSt y 3.202 cSt, lo que indica que la adición de líquido pirolítico no genera cambios significativos en la fluidez del combustible. La muestra de diésel B5 presentó una viscosidad de 3.195 cSt, mientras que las mezclas con 5%, 10% y 15% de líquido pirolítico registraron valores de 3.105 cSt, 3.099 cSt y 3.202 cSt, respectivamente. Esto evidencia que la incorporación de líquido pirolítico no altera de manera considerable la viscosidad del diésel dentro de los límites recomendados por las especificaciones de combustibles diésel, lo que sugiere que las mezclas mantendrían un adecuado comportamiento en sistemas de inyección y atomización en motores de combustión interna [31].

Según los resultados obtenidos de punto de escurrimiento mediante el método ASTM D97, todas las muestras analizadas (diésel B5 S-50 y sus mezclas con 5%, 10% y 15% de líquido pirolítico) presentan un punto de escurrimiento de -27°C, sin variaciones entre ellas. Este resultado evidencia que la incorporación de líquido pirolítico no afecta significativamente la fluidez del combustible a bajas temperaturas, manteniendo una resistencia adecuada a la solidificación en condiciones frías. La estabilidad del punto de escurrimiento sugiere que la adición de líquido pirolítico no introduce compuestos que afecten la formación de estructuras parafínicas o interfieran con la capacidad del diésel de mantenerse bombeable en climas fríos [32].

Los resultados del índice de cetano, obtenidos mediante el método ASTM D976, muestran un incremento progresivo a medida que aumenta la proporción de líquido pirolítico en la mezcla. En particular, el diésel B5 S-50 presentó un índice de 44.8, mientras que las mezclas con 5%, 10% y 15% de líquido pirolítico alcanzaron valores de 45.5, 46.4 y 49.3, respectivamente. Este aumento indica que la adición de líquido pirolítico mejora la capacidad de ignición del combustible, favoreciendo una combustión más eficiente y reduciendo el retardo de encendido en los motores diésel. El efecto es más notable en la mezcla con 15% de líquido pirolítico, donde el índice de cetano asciende a 49.3, situándola dentro del rango óptimo para combustibles de alto desempeño. Esto sugiere que el líquido contiene fracciones con alta reactividad a la ignición, lo que permitiría mejorar las características de combustión sin necesidad de aditivos adicionales [33], [34].

El contenido de cenizas es un parámetro fundamental para evaluar la presencia de residuos inorgánicos en combustibles

diésel, ya que su acumulación puede generar depósitos en los inyectores, afectar la eficiencia de combustión y acelerar el desgaste del motor. A partir de los resultados obtenidos mediante el método ASTM D482, se observa que el diésel B5 S-50 presentó un contenido de cenizas de 0.010% en masa, mientras que las mezclas con 5%, 10% y 15% de líquido pirolítico registraron valores de 0.015%, 0.002% y 0.003%, respectivamente. Estos resultados evidencian que la adición de líquido pirolítico no aumenta el contenido de cenizas en las mezclas, e incluso en las formulaciones con 10% y 15% de LP, se observa una reducción en la cantidad de residuos inorgánicos. Esto sugiere que el líquido pirolítico podría contener menos impurezas no combustibles en comparación con el diésel base, lo que contribuiría a una combustión más limpia. Sin embargo, el ligero aumento en la mezcla con 5% de líquido pirolítico (0.015%) podría estar relacionado con la presencia de partículas inorgánicas residuales. En general, los valores obtenidos se mantienen dentro de los límites normativos para el Diesel B5 S-50, lo que indica que las mezclas evaluadas no comprometen la calidad del combustible en términos de generación de residuos sólidos tras la combustión[35].

El residuo de carbono Ramsbottom es un indicador clave para evaluar la tendencia de un combustible a generar depósitos de carbono tras su combustión, lo que puede influir en el rendimiento de los motores diésel y en la acumulación de residuos en los inyectores y cámaras de combustión. A partir de los resultados obtenidos mediante el método ASTM D189, se observa que el contenido de carbono residual disminuye progresivamente con el aumento de líquido pirolítico en la mezcla. Mientras que el diésel B5 S-50 y la mezcla con 5% de líquido pirolítico presentan un valor de 0.08% en masa, las mezclas con 10% y 15% de LP muestran valores más bajos de 0.06% y 0.05%, respectivamente. Estos resultados indican que la adición de líquido pirolítico ayuda a reducir la formación de residuos carbonosos, posiblemente debido a una menor presencia de compuestos pesados en su composición. La disminución observada en las mezclas con mayor contenido de LP sugiere una mejora en la calidad de la combustión, lo que podría traducirse en una menor acumulación de depósitos en los componentes del motor[36].

El ensayo de corrosión en lámina de cobre (ASTM D130) permite evaluar la presencia de compuestos corrosivos en combustibles, especialmente aquellos que podrían afectar los sistemas de inyección y almacenamiento debido a su interacción con materiales metálicos. Los resultados obtenidos para el diésel B5 S-50 y sus mezclas con 5%, 10% y 15% de líquido pirolítico muestran una clasificación de 1a, lo que indica que no hubo corrosión significativa en las láminas de cobre expuestas al combustible. Estos resultados confirman que la adición de líquido pirolítico no introduce compuestos corrosivos, garantizando que el combustible mantiene su estabilidad química y su compatibilidad con componentes metálicos del motor[37].

El contenido de azufre total es un parámetro crucial en los combustibles, ya que influye directamente en la generación de

emisiones contaminantes y en la corrosión de los componentes del motor y del sistema de escape. Los resultados obtenidos mediante el método ASTM D4294 muestran variaciones en la concentración de azufre entre las distintas mezclas evaluadas. Mientras que el diésel B5 S-50 y la mezcla con 10% de líquido pirolítico presentan un contenido de 47 mg/kg, la mezcla con 5% de líquido pirolítico muestra una reducción a 33 mg/kg y la mezcla con 15% de líquido pirolítico registra el valor más bajo con 13 mg/kg. Estos resultados indican que la adición de líquido pirolítico influye en la concentración de azufre en el combustible, especialmente en la mezcla con 15% de líquido pirolítico, donde se observa la mayor reducción. Esto sugiere que el líquido pirolítico utilizado posee un menor contenido de azufre en comparación con el diésel base, lo que podría resultar en una menor emisión de óxidos de azufre (SO_x) durante la combustión [38], [39].

La gravedad API es un parámetro clave para determinar la densidad de los combustibles líquidos y su influencia en la combustión y el rendimiento en motores diésel. Los resultados obtenidos mediante el método ASTM D1298 muestran un incremento progresivo en la gravedad API con la incorporación de líquido pirolítico. En este sentido, el diésel B5 S-50 registró un valor de 34.3°API, mientras que las mezclas con 5%, 10% y 15% de líquido pirolítico presentaron valores de 34.8°API, 35.2°API y 35.8°API, respectivamente. El aumento en la gravedad API refleja una disminución en la densidad del combustible, lo que sugiere que el líquido pirolítico aporta fracciones más ligeras a la mezcla. Esta reducción en densidad puede favorecer la atomización del combustible en los sistemas de inyección, mejorando su eficiencia de combustión. No obstante, si la densidad disminuye demasiado, podría afectar la entrega de energía en motores diseñados para combustibles con mayor peso específico [28], [40].

El poder calorífico bruto es un parámetro esencial para determinar la cantidad de energía liberada durante la combustión de un combustible y su impacto en el rendimiento energético en motores diésel. A partir de los resultados obtenidos mediante el método ASTM D240, se observa una ligera variación en el poder calorífico con la incorporación de líquido pirolítico. En términos de MJ/kg, el diésel B5 S-50 presentó un valor de 44.380 MJ/kg, mientras que las mezclas con 5%, 10% y 15% de líquido pirolítico registraron valores de 44.788 MJ/kg, 44.019 MJ/kg y 43.645 MJ/kg, respectivamente. Tendencias similares se observan en las unidades equivalentes en Btu/lb y cal/g, donde el contenido energético disminuye conforme aumenta la proporción de líquido pirolítico. Este comportamiento sugiere que la adición de líquido pirolítico influye en la cantidad de energía disponible por unidad de masa, mostrando un incremento en la mezcla con 5% de líquido pirolítico, seguido de una reducción progresiva en las mezclas con 10% y 15% de líquido pirolítico. Esta tendencia podría estar relacionada con la composición del líquido pirolítico, que posiblemente contiene una mayor proporción de compuestos oxigenados o

hidrocarburos más ligeros con menor contenido energético en comparación con el diésel base [28], [39], [41].

CONCLUSIONES

Se puede concluir que la incorporación de líquido pirolítico en las mezclas de diésel B5 S-50 no compromete la calidad del combustible, ya que todas las muestras analizadas cumplen con los requisitos establecidos en el Decreto Supremo N° 092-2009-EM y fe de erratas. Además, se concluye que la incorporación de hasta 15% de líquido pirolítico en mezclas con diésel B5 S-50 no compromete su calidad, ya que todas las formulaciones cumplen con las especificaciones técnicas del Decreto Supremo N° 092-2009-EM. El índice de cetano mejoró de 44.8 a 49.3, favoreciendo una mejor ignición; el contenido de azufre disminuyó significativamente, pasando de 47 a 13 mg/kg, y el residuo carbonoso se redujo de 0.08% a 0.05%. Aunque el poder calorífico se redujo ligeramente (de 44.4 a 43.6 MJ/kg), los valores se mantuvieron dentro de los rangos aceptables. Estos resultados respaldan la viabilidad técnica de las mezclas como combustible alternativo para motores diésel.

Además de su viabilidad técnica, la implementación del método de pirólisis catalítica para el aprovechamiento de mascarillas desechables presenta un potencial de escalabilidad, dado que la materia prima (residuos de polipropileno) es abundante y continua. El uso de catalizadores reciclados de unidades FCC, como el E-Cat, permitiría reducir costos operativos y aprovechar residuos industriales existentes. La compatibilidad de las mezclas con los estándares de combustible diésel sugiere que su incorporación en la matriz energética podría realizarse con mínimas adaptaciones en la infraestructura de distribución y uso, facilitando una posible transición hacia una valorización energética masiva de residuos sanitarios.

AGRADECIMIENTOS

Los investigadores expresamos nuestro agradecimiento al Grupo de Investigación en Procesos Termoquímicos y Energéticos de la Universidad Nacional de Ingeniería (UNI) por su valioso apoyo en la obtención del líquido pirolítico utilizado en este estudio. Asimismo, extendemos nuestro reconocimiento al Laboratorio de Normalización de Petróleo y Derivados de la Facultad de Ingeniería de Petróleo, Gas Natural y Petroquímica (FIP) – UNI por su colaboración en la caracterización de las mezclas. Finalmente, agradecemos a la Unidad de Investigación FIP por el financiamiento otorgado, el cual hizo posible la ejecución de este proyecto.

REFERENCIAS

[1] S. B. Lee *et al.*, “Production of value-added aromatics from wasted COVID-19 mask via catalytic pyrolysis,” *Environ. Pollut.*, vol. 283, p. 117060, Aug. 2021, doi: 10.1016/j.envpol.2021.117060.

[2] R. Hurtado-Cuba and N. Espiritu, “Factores sociodemográficos relacionados con el uso adecuado de las mascarillas y el distanciamiento social apropiado para evitar el contagio del SARS-CoV-2 en un mercado de abastos en Lima, Perú,” *Horiz. Médico*, vol. 21, no. 3, p. e1360, Jul. 2021, doi: 10.24265/horizmed.2021.v21n3.05.

[3] A. L. Patrício Silva *et al.*, “Rethinking and optimising plastic waste management under COVID-19 pandemic: Policy solutions based on redesign and reduction of single-use plastics and personal protective equipment,” *Sci. Total Environ.*, vol. 742, p. 140565, Nov. 2020, doi: 10.1016/j.scitotenv.2020.140565.

[4] SNI, “Decreto Supremo del MINSA limita exportación de mascarillas y material médico,” 2021. <https://sni.org.pe/sni-decreto-supremo-del-minsa-limita-exportacion-de-mascarillas-y-material-medico/> (accessed Jan. 27, 2022).

[5] N. P. Requena-Sanchez *et al.*, “A multi-jurisdictional study on the quantification of COVID-19 household plastic waste in six Latin American countries,” *Environ. Sci. Pollut. Res.*, vol. 30, no. 40, pp. 93295–93306, 2023, doi: 10.1007/s11356-023-28949-0.

[6] MINEM, “Cargas en Refinería (MBPD) - Diciembre 2023,” 2023.

[7] MINEM, “Producción de combustibles (MBPD) - Diciembre 2023,” *Inf. Estadístico Upstream-Downstream*, 2023, [Online]. Available: <https://www.gob.pe/institucion/minem/colecciones/17643-informes-estadisticos-upstream-downstream>

[8] OSINERGMIN, “Demanda de combustibles líquidos (MBPD) Total País - Diciembre 2023,” 2023. [Online]. Available: <https://www.osinergmin.gob.pe/empresas/hidrocarburos/scop/documentos-scop>

[9] E. F. Sousa-Aguiar, “Y Zeolites as a Major Component of FCC Catalysts: Main Challenges in the Modification Thereof,” in *Zeolites and Zeolite-like Materials*, Elsevier Inc., 2016, pp. 265–282. doi: 10.1016/B978-0-444-63506-8.00007-0.

[10] F. Rodríguez de Castillejo, “Ampliación de la Refinería Talara: Tecnologías del nuevo esquema de refinación,” 2019.

[11] G. Fortini, “Evaluación técnico - económico de una unidad de coquificación de residuales de vacío en el Perú,” p. 161, 2010.

[12] Apoyo & Asociados, “Refinería La Pampilla S.A.A. – (RELAPASAA),” 2018.

[13] Ministerio del Ambiente de España, *Guía de las mejores técnicas disponibles en España del sector refino de petróleo*. 2004.

[14] J. Jechura, “Refinery Feedstocks & Products – Properties & Specifications,” p. 127, 2014, [Online]. Available: http://inside.mines.edu/~jjechura/Refining/02_Feedstocks_&_Products.pdf

[15] PETROPERU, “Esquema de proceso,” *Nueva Refinería Talara*, 2024. <https://www.refineriatalara.com/esquema-de-proceso/>

[16] M. Bertero, J. R. García, M. Falco, and U. Sedran, “Equilibrium FCC catalysts to improve liquid products from biomass pyrolysis,” *Renew. Energy*, vol. 132, pp. 11–18, Mar. 2019, doi: 10.1016/j.renene.2018.07.086.

[17] A. Demirbas, “Pyrolysis of municipal plastic wastes for recovery of gasoline-range hydrocarbons,” *J. Anal. Appl. Pyrolysis*, vol. 72, no. 1, pp. 97–102, Aug. 2004, doi: 10.1016/j.jaap.2004.03.001.

[18] S. Jain, B. Yadav Lamba, S. Kumar, and D. Singh, “Strategy for repurposing of disposed PPE kits by production of biofuel: Pressing priority amidst COVID-19 pandemic,” *Biofuels*, vol. 13, no. 5, pp. 545–549, May 2022, doi: 10.1080/17597269.2020.1797350.

[19] R. Miandad, M. A. Barakat, A. S. Aburiazza, M. Rehan, and A. S. Nizami, “Catalytic pyrolysis of plastic waste: A review,” *Process Saf. Environ. Prot.*, vol. 102, no. June, pp. 822–838, Jul. 2016, doi: 10.1016/j.psep.2016.06.022.

[20] V. Bobor and J. Velastegui, “Caracterización de mezclas de diésel-biodiésel a diferentes proporciones con el fin de minimizar los impactos ambientales generados por el consumo de combustibles fósiles,” Escuela Superior Politécnica del Litoral, Guayaquil, 2017.

[21] P. Castillo-Hernandez, A. Mendoza-Domínguez, and P. Caballero-Mata, “Análisis de las propiedades fisicoquímicas de gasolina y diesel mexicanos reformulados con Etanol,” *Ing. Investig. y Tecnol.*, vol. XIII, no. 3, pp. 293–306, Jan. 2012.

[22] J. D. Martínez, M. Lapuerta, R. García-Contreras, R. Murillo, and T. García, “Fuel properties of tire pyrolysis liquid and its blends with diesel fuel,” *Energy and Fuels*, vol. 27, no. 6, pp. 3296–3305, Jun. 2013, doi: 10.1021/ef400602e.

[23] W. Ramos, J. Nahui-Ortiz, R. Erazo, and V. Pretell, “Pirólisis catalítica de cubrebocas de polipropileno desechables para la obtención de combustibles líquidos,” *Inf. tecnológica*, vol. 34, no. 1,

- pp. 1–10, 2023, doi: 10.4067/s0718-07642023000100001.
- [24] W. Ramos, J. Nahui-Ortiz, R. Erazo, H. Manrique, and V. Pretell, “Modeling and Estimation of Physicochemical Properties of the Liquid Fuel Obtained from the Catalytic Pyrolysis of Disposable Masks,” *Proc. LACCEI Int. Multi-conference Eng. Educ. Technol.*, vol. 2023-July, pp. 1–7, 2023, doi: 10.18687/laccei2023.1.1.680.
- [25] Ministerio de Energía y Minas, “Modifican el artículo 4° del Decreto Supremo N°041-2005-EM y se emiten otras disposiciones Decreto Supremo N°092-2009-EM,” Perú, 2009. [Online]. Available: http://www.minem.gob.pe/_legislacion.php?idSector=10&idLegislacion=3033
- [26] Ministerio de Energía y Minas, “Fe de Erratas Decreto Supremo N°092-2009-EM,” 2010.
- [27] ASTM International, “Método de prueba estándar para destilación de productos petrolíferos y combustibles líquidos a presión atmosférica ASTM D86,” *Man. Hydrocarb. Anal. 6th Ed.*, no. November, pp. 222–222–18, 2009, doi: 10.1520/D7345-08.
- [28] M. R. Riazi, *Characterization and Properties of Petroleum Fractions, First Edition*. 100 Barr Harbor Drive, PO Box C700, West Conshohocken, PA 19428-2959: ASTM International, 2005. doi: 10.1520/MNL50_1ST-EB.
- [29] ASTM, “Standard Test Method for Flash Point by the Equilibrium Method With a Closed Cup - ASTM D93,” vol. 05, no. Reapproved, pp. 5–7, 2001, doi: 10.1520/D3941-14.
- [30] W. Ramos, N. Regalado, J. Valenzuela, and V. Pretell, “Calidad de los Combustibles Líquidos Pirolíticos Obtenidos por Pirólisis de Residuos Plásticos,” in *Proceedings of the 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-Bas, 2020, no. July 2020, pp. 27–31. doi: 10.18687/LACCEI2020.1.1.99.
- [31] ASTM, “Standard Test Method for Kinematic Viscosity of Transparent and Opaque Liquids (the Calculation of Dynamic Viscosity) - ASTM D445,” in *Manual on Hydrocarbon Analysis, 6th Edition*, no. March, 100 Barr Harbor Drive, PO Box C700, West Conshohocken, PA 19428-2959: ASTM International, 2008, pp. 126–126–8. doi: 10.1520/MNL10842M.
- [32] ASTM International, “ASTM D97-96a Standard Test Method for Pour Point of Petroleum Products,” 2012. doi: 10.1520/D0097-12.In.
- [33] ASTM International, “ASTM D976-91 Standard Test Methods for Calculated Cetane Index of Distillate Fuels,” West Conshohocken, PA, USA, 2000. doi: 10.1520/mnl10856m.
- [34] ASTM International, “ASTM D4737-96a Standard Test Method for Calculated Cetane Index by Four Variable Equation,” West Conshohocken, PA, USA, 2008. doi: 10.1520/mnl10944m.
- [35] ASTM International, “ASTM D482-00a Standard Test Method for Ash from Petroleum Products,” ASTM International, 100 Barr Harbor Drive, PO Box C700, West Conshohocken, PA 19428-2959, 2008.
- [36] ASTM International, “ASTM D189-01 Standard Test Method for Ramsbottom Carbon Residue of Petroleum Products,” ASTM International, 100 Barr Harbor Drive, PO Box C700, West Conshohocken, PA 19428-2959, 2008. doi: 10.1520/MNL10846M.
- [37] ASTM International, “ASTM D130-94 Standard Test Method for Detection of Copper Corrosion from Petroleum Products by the Copper Strip Tarnish Test,” 2008. doi: 10.1520/mnl10837m.
- [38] ASTM, “D4294–10. Standard Test Method for Sulfur in Petroleum and Petroleum Products by Energy,” vol. 00, pp. 1–9, 2010, doi: 10.1520/D4294-10.2.
- [39] M. A. Fahim, T. A. Alsahhaf, and A. Elkilani, *Fundamentals of Petroleum Refining*, vol. 11, no. 1. 2018.
- [40] ASTM International, “ASTM D1298-99 Standard Test Method for Density , Relative Density or API Gravity of Crude Petroleum and Liquid Petroleum Products by hydrometer method. Annual Book of ASTM Standards, Vol 05.01 Annual Book of ASTM Standards,100 Barr Harbor Drive, U.S.A.,” pp. 1–6, 1999.
- [41] ASTM International, “ASTM D240-00 Standard Test Method for

Heat of Combustion of Liquid Hydrocarbon Fuels by Bomb,” vol. 02, no. Reapproved 2007, pp. 1–9, 2008.