

 	ASESORÍA TÉCNICA PARA EL ANÁLISIS DE LA MEZCLA DE DIÉSEL- ADITIVO SOBRE EL DESEMPEÑO E INTEGRIDAD DE UN MOTOR	UIS - INF - 216
		Página 1 de 36

ASESORÍA TÉCNICA PARA EL ANÁLISIS DE LA MEZCLA DE DIÉSEL- ADITIVO SOBRE EL DESEMPEÑO E INTEGRIDAD DE UN MOTOR

INFORME FINAL



ISO/IEC 17025:2005

13-LAB-051

Elaborado para:

Alcoholes Especiales De Colombia

Alesco S.A.S

Contacto: Juan Manuel Giraldo

UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER
ESCUELA DE INGENIERÍA DE PETRÓLEOS
LABORATORIO DE ANÁLISIS PETROFÍSICOS Y DAÑO A LA FORMACIÓN
PIEDRECUESTA / DICIEMBRE - 2022

Los datos aquí reportados corresponden únicamente a la(s) muestra(s) analizada(s) y no pueden ser reproducidos en forma parcial. En caso de queja o reclamo favor dirigirse a quien firma el informe o comunicarse a la línea 6344000 Ext. 1327 o E-mail: edalgoce@uis.edu.co, labpetrofisicos@uis.edu.co | Laboratorio de Análisis Petrofísicos, Km 2 vía refugio Sede UIS Guatiguará - Piedrecuesta, Santander.

 	ASESORÍA TÉCNICA PARA EL ANÁLISIS DE LA MEZCLA DE DIÉSEL- ADITIVO SOBRE EL DESEMPEÑO E INTEGRIDAD DE UN MOTOR	UIS - INF - 216
		Página 2 de 36

PROYECTO

ASESORÍA TÉCNICA PARA EL ANÁLISIS DE LA MEZCLA DE DIÉSEL- ADITIVO SOBRE EL DESEMPEÑO E INTEGRIDAD DE UN MOTOR

Elaborado por:

Adan Yovani León Bermúdez, M.Sc – Ph.D.
 Director Técnico Proyecto

Revisado y aprobado por:

EDUARDO GÓMEZ, M.Sc
 Director Servicios de Extensión

_____ **Firma**

C.C.

TABLA DE CONTENIDO

1.	Resumen.....	5
2.	Metodología.	7
2.1	Evaluación del rendimiento del Diésel en un generador (Marca Caterpillar).....	8
2.2	Análisis de la composición de los gases de combustión.	9
2.3	Efecto del Diésel con y sin aditivo sobre la integridad del hierro gris.	9
3.	Resultados y análisis.....	11
3.1	Evaluación del rendimiento de un generador Diésel.	11
3.2	Análisis de la composición de los gases de combustión.	17
3.3	Efecto del Diésel con y sin aditivo azul AA sobre la integridad del hierro gris.	19
3.3.1	Análisis superficial.	24
4.	Conclusiones.....	30
5.	Referencias	31
6.	Anexos	32

 	ASESORÍA TÉCNICA PARA EL ANÁLISIS DE LA MEZCLA DE DIÉSEL- ADITIVO SOBRE EL DESEMPEÑO E INTEGRIDAD DE UN MOTOR	UIS - INF - 216
		Página 4 de 36

LISTA DE TABLAS

Tabla 1. Poder calorífico en mezclas de Diésel.....	¡Error! Marcador no definido.
Tabla 2. . Cantidad de emisiones de CO2 en las pruebas de combustión de Diésel con y sin aditivos.....	¡Error! Marcador no definido.
Tabla 3. Porcentaje en peso de la composición elemental del hierro gris inmerso en Diésel con y sin aditivo azul.	28

LISTA DE FIGURAS

Figura 1. Diagrama de la metodología experimental.....	7
Figura 2. Análisis de Diésel con y sin aditivos usando el espectrofotómetro UV–VIS GO 3.12..	¡Error! Marcador no definido.
Figura 3. Montaje de recolección de gases de combustión.....	¡Error! Marcador no definido.
Figura 4. Análisis de gases de combustión mediante cromatografía de gases	9
Figura 5. Consumo de Diésel con y sin aditivos a diferentes tiempos: a- Consumo de combustible en cada periodo y b- Consumo de combustible acumulado.	¡Error! Marcador no definido.
Figura 6. Reducción de consumo de Diésel con aditivos a diferentes tiempos: a- Reducción de consumo de combustible en cada periodo y b- Reducción de consumo de combustible promedio para 60 y 120 min de prueba.....	¡Error! Marcador no definido.
Figura 7. Comportamiento de la concentración de los aditivos en el Diésel en función del tiempo: a- Aditivo Azul y b- Aditivo Rojo.	¡Error! Marcador no definido.
Figura 8. Efecto de los aditivos en la tendencia de la temperatura ¡Error! Marcador no definido.	
Figura 9. Cromatograma de los gases productos de la prueba de combustión del Diésel de referencia para 30 minutos de reacción	¡Error! Marcador no definido.
Figura 10. Contenido de CO2 (% molar) en los gases producto de la combustión del Diésel con y sin aditivos.....	¡Error! Marcador no definido.
Figura 11. Reactor batch para pruebas de integridad.	¡Error! Marcador no definido.
Figura 12. Cupones de hierro gris: a- Antes de las pruebas de integridad y b- Después de las pruebas de integridad a 2, 6 y 24 ciclos.....	¡Error! Marcador no definido.
Figura 13. Diferencia de peso del hierro gris inmerso en combustible Diésel y Diésel con aditivo azul: a- Cupones sumergidos en el combustible (inferiores) y b- Cupon de la parte superior..	¡Error! Marcador no definido.
Figura 14. Micrografía de hierro gris a 400 y 50 μm	¡Error! Marcador no definido.
Figura 15. Micrografía de hierro gris a 400 y 50 μm inmerso en Diésel Blanco durante 6 ciclos de reacción: a- Cupon inferior y b- Cupon superior..	¡Error! Marcador no definido.
Figura 16. Micrografía de hierro gris a 400 y 50 μm inmerso en Diésel con aditivo azul durante 6 ciclos de reacción: a- Cupon inferior y b- Cupon superior.....	¡Error! Marcador no definido.
Figura 17. Composición elemental mediante EDS: a-Hierro gris, b-Cupon inferior en Diésel blanco, c-Cupon superior en Diésel blanco, d-Cupon inferior en Diésel con aditivo y e-Cupon superior en Diésel con aditivo..	¡Error! Marcador no definido.

	ASESORÍA TÉCNICA PARA EL ANÁLISIS DE LA MEZCLA DE DIÉSEL- ADITIVO SOBRE EL DESEMPEÑO E INTEGRIDAD DE UN MOTOR	UIS - INF - 216 Página 5 de 36
---	--	--

1. Resumen.

El Diésel es un producto valioso obtenido del proceso de refinación del petróleo, cuya función esencial es permitir complementar la demanda de combustible en el sector de transporte vehicular y su aplicación en diferentes sectores industriales. Sin embargo, debido al incremento vehicular se proyectan emisiones considerables de dióxido de carbono CO₂ y a su vez existe la necesidad de aprovechar al máximo la potencia por cantidad de Diésel consumido. Por tanto, con el propósito de reducir la problemática anterior, se han venido desarrollando estudios, herramientas y nuevos aditivos con el fin de disminuir las emisiones de dióxido de carbono y como una opción válida dentro del mercado para permitir un mayor rendimiento en los motores de combustión.

El estudio de los efectos de aditivos sobre el rendimiento del Diésel en los motores de combustión ha sido cuestionado, por lo que el objetivo principal de este trabajo consiste en analizar el comportamiento de mezclas de Diésel con dos aditivos con concentraciones de 1000 ppm (partes por millón). En este sentido, en este informe se presenta el análisis del desempeño de un motor de combustión (Generador Caterpillar), utilizando Diésel con dos tipos de aditivos denominados como Aditivo Rojo (AR) y Aditivo Azul (AA). La investigación se desarrolló en tres etapas: inicialmente, las pruebas de rendimiento se realizaron en un generador Diésel Marca Caterpillar (Capacidad 344 KVA, 440 Voltios, 60

	ASESORÍA TÉCNICA PARA EL ANÁLISIS DE LA MEZCLA DE DIÉSEL- ADITIVO SOBRE EL DESEMPEÑO E INTEGRIDAD DE UN MOTOR	UIS - INF - 216 Página 6 de 36
---	--	--

Hz) perteneciente a la empresa Sierra Alta S.A.S., el cual está ubicado en la ciudad de Barrancabermeja (Santander). Las pruebas de combustión se llevaron a cabo utilizando Diésel como muestra de referencia y mezclas Diésel/aditivo como muestras de estudio. En la segunda fase, se analizaron las muestras de líquidos y de gases de combustión obtenidos a través de técnicas analíticas y espectroscópicas. Finalmente, en la tercera fase se evalúa la integridad o vida útil del hierro gris procedente de un motor Diésel en condiciones de tratamiento térmico entre 25 y 200 °C.

El análisis de los resultados se determinó que los aditivos azul y rojo presentaron incrementos promedio en el rendimiento de desempeño con respecto al Diésel de referencia con valores de 31.3 y 24 % durante una hora de operación, mientras que el incremento promedio en el rendimiento fue de 19.9 y 15.7 % durante dos horas de operación, respectivamente. Por otra parte, la caracterización de los productos mediante espectroscopía Ultravioleta-Visible (UV-Vis) y cromatografía de gases permitieron comprobar el efecto positivo al utilizar los aditivos aplicados al Diésel en el generador de combustión. Finalmente, el hierro gris inmerso en Diésel de referencia en ciclos térmicos durante el intervalo de 10 a 120 horas presento mayor velocidad de corrosión en comparación con las pruebas de Diésel con aditivo azul AA, bajo las mismas condiciones de operación. Por otra parte, los resultados del análisis por microscopía de electrónica de barrido SEM - EDS lograron evidenciar que el Diésel con aditivo Azul AA muestra una mejor distribución de fases homogéneas en comparación con el Diésel de referencia.

2. Metodología.

El presente trabajo buscó analizar el uso de mezclas de Diésel con dos tipos de aditivos: Aditivo Rojo (AR) y Aditivo Azul (AA), en términos de aplicabilidad, rendimiento en un generador de combustión, emisión de gases e integridad del hierro gris representativo en la construcción de motores Diésel. Para cumplir con el propósito anterior, en esta sección se describen las etapas experimentales desarrolladas para la ejecución de este trabajo, las cuales se ilustran en la Figura 1.

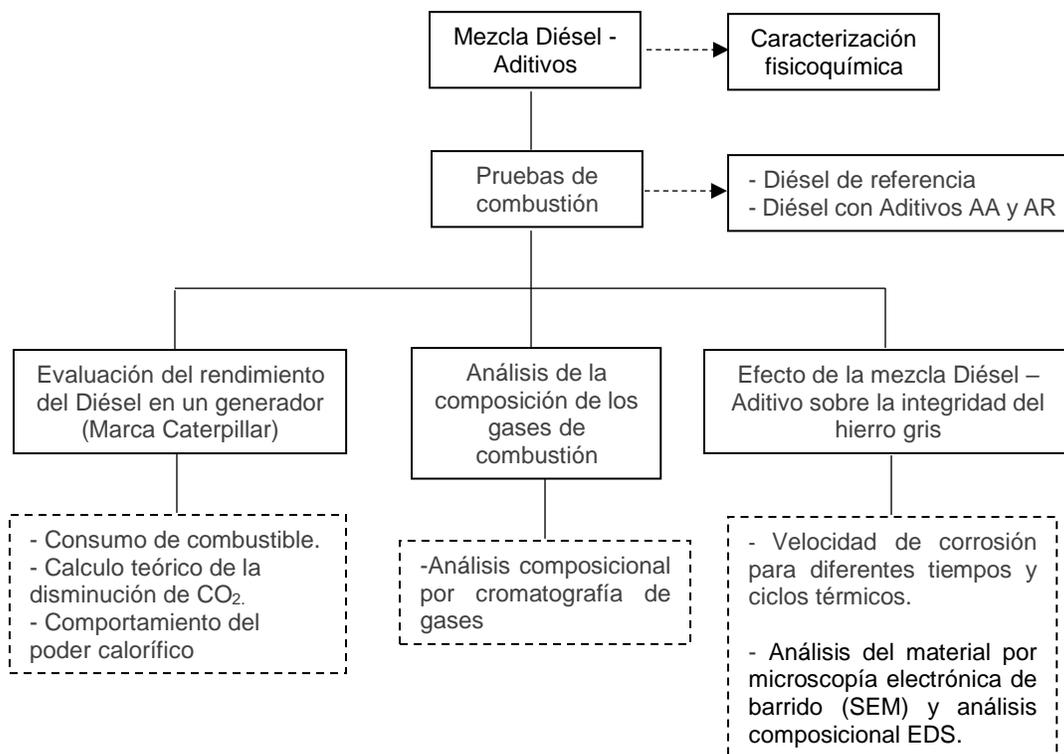


Figura 1. Diagrama de la metodología experimental.

2.1 Evaluación del rendimiento del Diésel en un generador (Marca Caterpillar).

Para la realización de las pruebas de carga impuesta por el motor fue necesario adecuar los ensayos en un generador Marca Caterpillar Modelo C9 con una capacidad de 344 KVA, 440 Voltios, 60 Hz. Las pruebas se realizaron con asistencia del personal de Sierra Alta Oil & Gas Drilling Services en el municipio de Barrancabermeja, Santander. Se tuvo en cuenta el tiempo de operación, consumo de combustible (Diésel o mezcla Diésel/aditivo), composición de los gases de combustión y la temperatura.

- *Análisis del consumo de combustible:* Con esta prueba se estimó el rendimiento real o efectivo del motor, en donde se pudo medir la cantidad de combustible gastado, el cual fue transformado en trabajo útil durante 2 horas de prueba. Asimismo, se analizó la concentración de los aditivos a diferentes tiempos de medición: 0, 30, 60, 90 y 120 minutos de operación. Estas muestras fueron analizadas y cuantificadas mediante espectroscopía ultravioleta-visible UV-Vis con el equipo UV-VIS GO 3.12 (figura 2), donde se realizaron curvas de calibración de los diferentes aditivos con Diésel como disolvente.

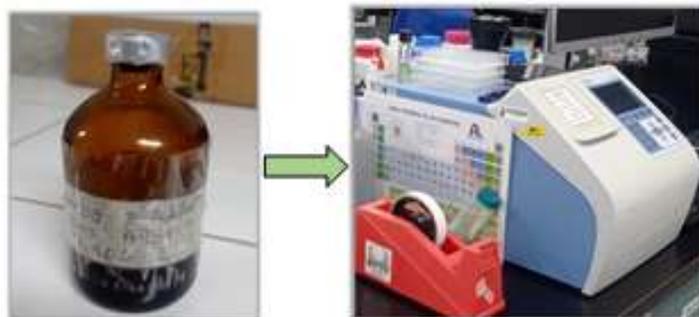


Figura 2. Análisis de Diésel con y sin aditivos usando el espectrofotómetro UV-VIS GO 3.12.

- *Recolección de los gases de combustión:* Durante las pruebas de combustión del Diésel con y sin aditivos, los productos de los gases de combustión fueron recolectados a una trampa de muestreo a la salida de los gases de escape usando bolsas de muestreo

de gas (Restek multi-layer foil gas sampling bags), tal como se muestra en la Figura 3. La recolección de los gases se tomó a diferentes tiempos de medición durante 30, 60 y 120 minutos de operación.

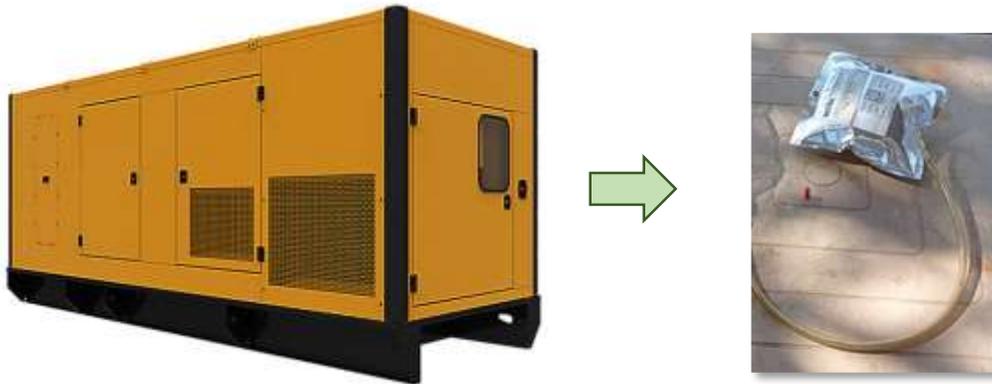


Figura 3. Montaje de recolección de gases de combustión.

2.2 Análisis de la composición de los gases de combustión.

En esta sección se analizaron las emisiones de los gases producidos en un motor Diésel, sometido a pruebas estáticas de combustión con Diésel y mezcla Diésel/aditivo. Los gases producidos en las pruebas fueron analizados mediante cromatografía de gases y los resultados se reportarán en porcentaje molar, tal como se visualiza en la Figura 4.



Figura 4. Análisis de gases de combustión mediante cromatografía de gases.

	ASESORÍA TÉCNICA PARA EL ANÁLISIS DE LA MEZCLA DE DIÉSEL- ADITIVO SOBRE EL DESEMPEÑO E INTEGRIDAD DE UN MOTOR	UIS - INF - 216 Página 10 de 36
---	--	---

2.3 Efecto del Diésel con y sin aditivo sobre la integridad del hierro gris.

El Diésel de referencia y Diésel con aditivo se utilizaron como medios directos en condiciones de tratamiento térmico para determinar su efecto sobre la corrosión o integridad del hierro gris fundido. Para el desarrollo de las pruebas el aditivo fue seleccionado de acuerdo a los resultados del mejor desempeño sobre el rendimiento o reducción de consumo de combustible.

Procedimiento: Los efectos de integridad por corrosión de los medios directos se evaluó en cupones de hierro gris como material seleccionado usando la técnica de pérdida de peso o análisis gravimétrico. Los cupones se construyeron con dimensiones de 2.5cm x 2.5cm y espesor de 3mm y su velocidad de corrosión se determinó analíticamente en función del peso perdido. Los cupones fueron sometidos a al proceso de lijado y la limpieza se finalizó por ultrasonido usando acetona como solvente durante 15 minutos. El registro de los pesos de los cupones durante el desarrollo de las pruebas se realizó con una balanza analítica de alta precisión 0.00001 g.

Las pruebas se desarrollaron en un reactor batch usando dos tratamientos térmicos, el primero a temperatura ambiente cerca de 25 °C, y el segundo en ciclos a alta temperatura alrededor de 200 °C en un reactor batch. El montaje y el desarrollo de las pruebas se realizaron en un reactor con transmisión mecánica que incluye un baño de calentamiento con arena fluidizada de acuerdo a los protocolos establecidos en la Universidad Industrial de Santander (León et al., 2020).

Los ciclos de tratamiento térmico se plantean usando calentamiento a 200 °C durante 240 minutos y un posterior enfriamiento durante 60 minutos a temperatura ambiente (25 °C). En cada ensayo la rampa de calentamiento y enfriamiento se establece para un tiempo total por ciclo de 300 minutos. Los experimentos consistieron entre 2 y 24 ciclos equivalente a 10 y 120 horas de ensayo. Posteriormente, las muestras sometidas a los ensayos de corrosión fueron analizadas mediante microscopía electrónica de barrido SEM

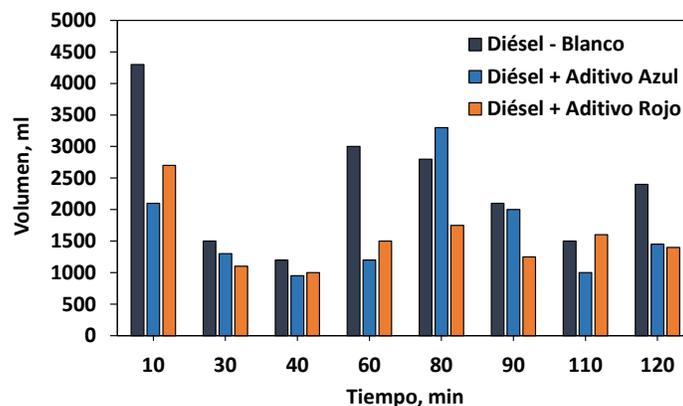
– EDS para observar las características de la superficie y los cambios composicionales. Finalmente, la caracterización de los cupones de hierro gris se realizó antes y después de los ensayos.

3. Resultados y análisis.

A continuación, se presentan los resultados obtenidos en el desarrollo experimental de acuerdo al orden planteado en la sección anterior.

3.1 Evaluación del rendimiento de un generador Diésel.

En la figura 5a se muestran los resultados del consumo de combustible por periodos de 10 minutos durante un tiempo total de 120 minutos. Los resultados en la figura 5b permiten observar una disminución en el consumo de combustible acumulado al emplearse los aditivos en una concentración de 1.000 ppm, en comparación con la muestra del Diésel sin aditivo o Diésel de referencia (Blanco).



a

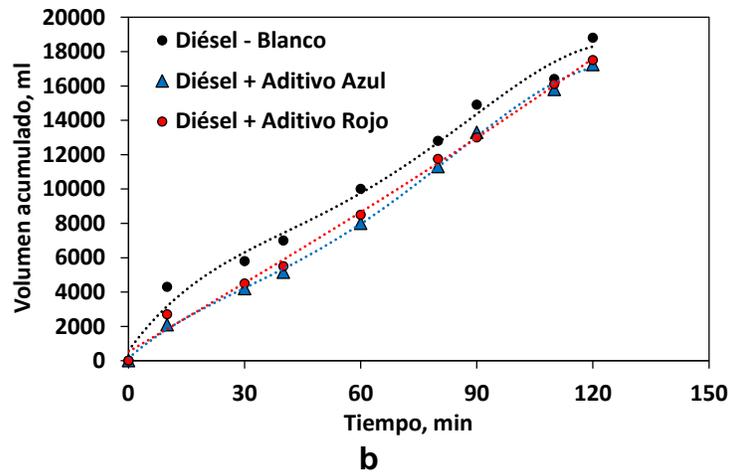
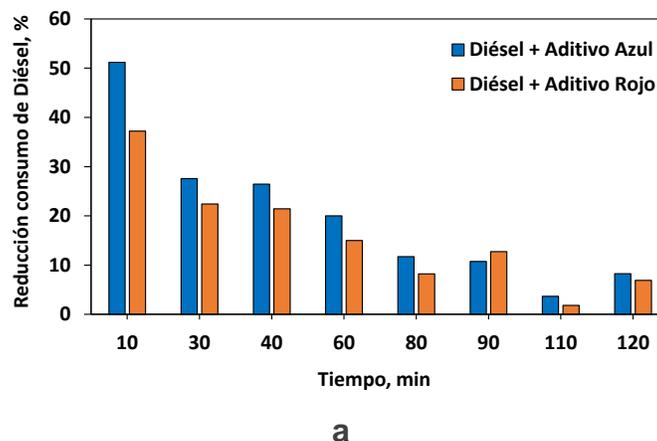
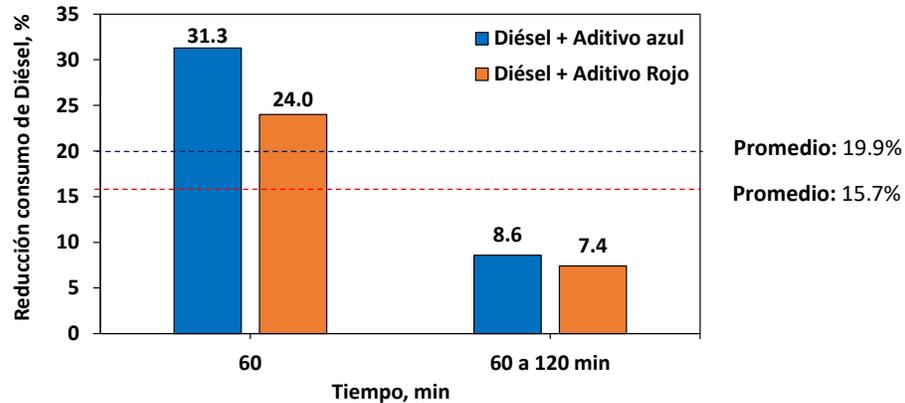


Figura 5. Consumo de Diésel con y sin aditivos a diferentes tiempos: a- Consumo de combustible en cada periodo y b- Consumo de combustible acumulado.

A partir de los resultados anteriores se puede indicar que, al finalizar la prueba de combustión, el volumen acumulado de Diésel de referencia consumido fue de 18.800 ml, mientras que al emplearse el aditivo azul y rojo se obtuvo un consumo de 17.250 ml y 17.500 ml, equivalente a una reducción de 8,24% y 6.91 % respectivamente, en comparación con la muestra blanco. Asimismo, en la figura 6a se muestran los resultados del porcentaje de reducción del consumo de combustible con aditivos con respecto al blanco registrados cada 10 minutos durante los 120 minutos del proceso de combustión.





b

Figura 6. Reducción de consumo de Diésel con aditivos a diferentes tiempos: a- Reducción de consumo de combustible en cada periodo y b- Reducción de consumo de combustible promedio para 60 y 120 min de prueba.

La reducción del consumo de combustible se determinó con la ecuación 1:

$$\text{Reducción de combustible (\%)} = \frac{100(\text{Valor } 1_t - \text{Valor } 2_t)}{\text{Valor } 1_t} \quad (1)$$

Donde:

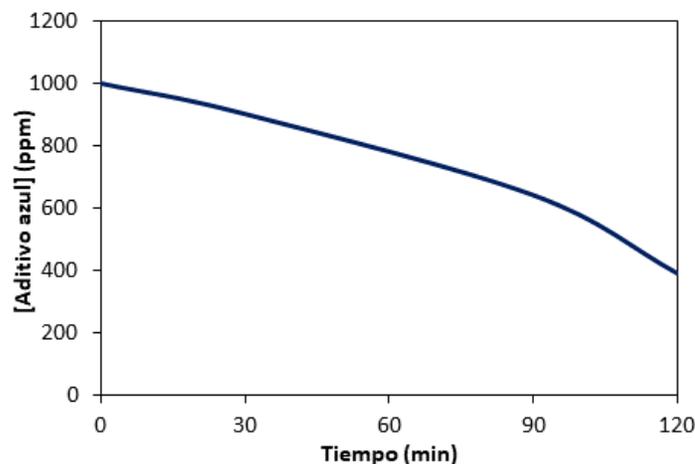
Valor 1_t: Volumen consumido de Diésel en la prueba blanco para un tiempo t.

Valor 2_t: Volumen consumido de Diésel en la prueba con aditivos para un tiempo t.

A partir de los resultados se observa que la reducción del consumo de combustible disminuye con el tiempo para los dos aditivos aplicados. Sin embargo, la reducción del consumo de combustible con el aditivo azul y rojo está dentro de los intervalos de 51.2 a 8.2 % y entre 37.2 a 6.9 %, respectivamente. Por otra parte, al comparar la reducción de consumo promedio de Diésel con respecto al blanco durante un periodo de 60 y 120 minutos de prueba, en la figura 6b se puede evidenciar que el aditivo azul muestra una reducción del 31.3 %, y luego disminuye al 8.6 %. Para el caso del aditivo rojo, se logra observar que la reducción de consumo de Diésel pasa de 24 % a 7.4 % en el transcurso

de 60 a 120 min. Sin embargo, al compararse el efecto de los dos aditivos sobre la reducción del consumo de Diésel promedio en los 120 minutos de prueba, se observa que el aditivo azul redujo el consumo cerca al 19,9 %, en comparación con el aditivo rojo, el cual redujo en un 15,7 %.

Para complementar los resultados anteriores, durante las pruebas de combustión en el generador se tomaron alícuotas de 5 ml en intervalos de 30, 60, 90 y 120 minutos, para el cual se determinó la concentración de los aditivos usando la curva de calibración obtenida mediante espectrofotometría UV-VIS. Los resultados de la figura 7a muestran que el Diésel con aditivo azul inicialmente tenía una concentración de 1.000 ppm, y al pasar el tiempo de las pruebas su concentración disminuyó a 390 ppm al finalizar las 2 horas de reacción. Entre tanto, el Diésel con aditivo rojo, el cual también tenía una concentración inicial de 1.000 ppm presentó una disminución en la concentración a 461 ppm durante el mismo tiempo de reacción, como se observa en la Figura 7b. Lo anterior pudo generarse a la falta de un mayor tiempo y forma de agitación de la mezcla Diésel con el aditivo.



a

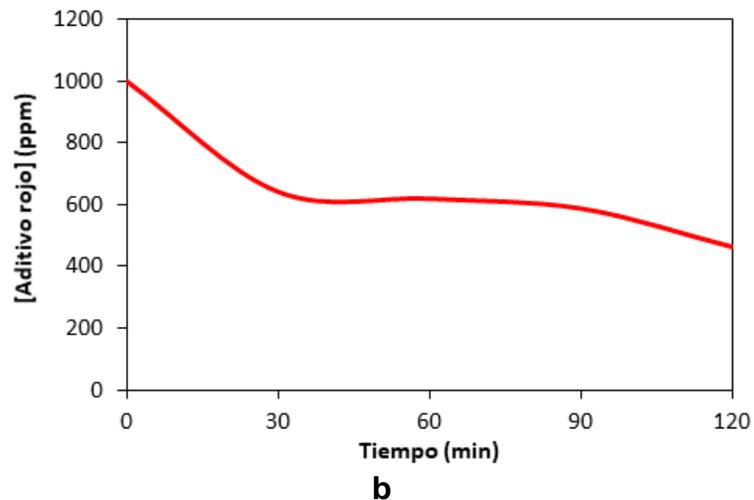


Figura 7. Comportamiento de la concentración de los aditivos en el Diésel en función del tiempo: a- Aditivo Azul y b- Aditivo Rojo.

Durante las pruebas de combustión se consideró el efecto de los aditivos sobre la temperatura del combustible en el motor durante las pruebas de combustión en el generador, para el cual se realizaron mediciones cada 10 minutos durante los 120 minutos de reacción como se muestra en la Figura 8. Los resultados permitieron establecer que el Diésel sin aditivos llegó a una temperatura promedio de 60,4 °C, mientras que, al utilizarse el aditivo rojo se disminuyó a una temperatura de 56,8 °C, equivalente a una reducción del 5,96 %. Pero el efecto más significativo se logró al emplearse el aditivo azul, en donde la temperatura a la que se llegó fue de 54,2 °C, reduciéndose en un 10,26 % en comparación al Diésel de referencia (blanco). Los resultados anteriores pueden estar atribuido a la naturaleza de los aditivos teniendo en cuenta que su estructura química está conformada principalmente por etanol, y normalmente este tipo de estructuras presentan un alto calor latente de la evaporación, propiedad que permite reducir la temperatura del Diésel (Gao et al., 2012).

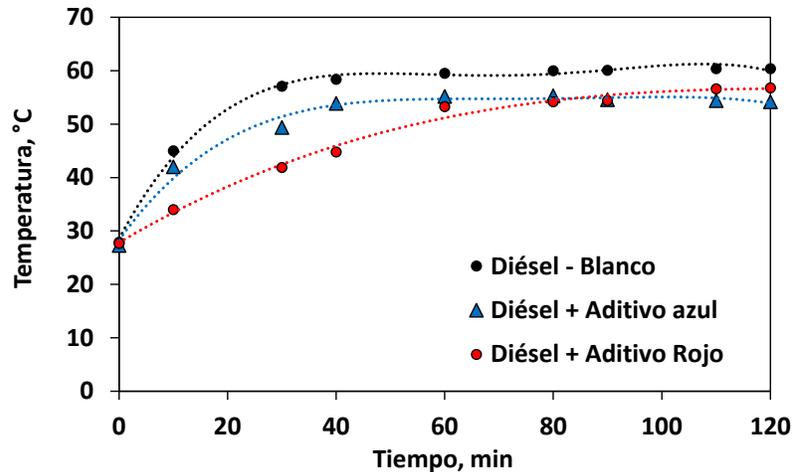


Figura 8. Efecto de los aditivos en la tendencia de la temperatura.

Adicionalmente, en esta investigación se evaluó el Poder Calorífico Superior (PCS) por triplicado bajo la norma ASTM D5865 en una bomba calorimétrica modelo C200, Marca P.A. Hilton Ltd para el Diésel con y sin aditivos. Las mediciones se hicieron a temperatura ambiente (21 °C) y se empleó oxígeno con una concentración de 99,999 % vol, para generar la atmósfera necesaria para la ignición y la determinación de PCS. Los resultados se presentan en la Tabla 1.

Tabla 1. Poder calorífico en mezclas de Diésel.

Combustible	*Densidad PC, Kg/lt	Poder calorífico PC, KJ/kg
Diésel - Blanco	0.8218	42600
Diésel + Aditivo Azul	0.8206	44327
Diésel + Aditivo Rojo	0.8230	43803

* Valor medido con picnómetro en el laboratorio

Los resultados muestran que el poder calorífico de las mezclas de Diésel con aditivo azul y aditivo rojo aumenta considerablemente en comparación con el Diésel de referencia. A su vez, el incremento de esta propiedad es una ventaja dado que si se preparan mezclas

de Diésel con 1000 ppm de aditivo azul y rojo incrementa el rendimiento del combustible en 4.05 y 2.82% en comparación con el Diésel de referencia. En la misma línea de investigación, en otras investigaciones se ha logrado determinar que la naturaleza química de los aditivos aplicados para incrementar el poder calorífico juega un papel importante (Belagali et al., 2014, Heriyanto et al., 2015, Gilani et al., 2017). Por ejemplo, el empleo de nanotubos funcionalizados con grupos amino como *butilamina*, *dodecilamina* y *octadecilamina* incrementa el poder calorífico al incrementar el número de carbonos en la estructura. Por tanto, una dosificación de 80 ppm de estos aditivos permite un incremento del 6,4 %, con respecto al combustible sin aditivo (Gilani et al., 2017).

En forma general, se puede indicar que 18.8 litros (15.45 kg) de Diésel de referencia o blanco pueden producir aproximadamente 658163.18 KJ. De acuerdo con el balance energético, los mismos 18.8 litros de combustible Diésel reformulado con aditivo azul y rojo con concentración de 1000 ppm pueden liberar 833347.6 y 823496.4 KJ, lo cual permite un incremento energético significativo del 26.62 y 25.12 % en comparación con el Diésel de referencia.

3.2 Análisis de la composición de los gases de combustión.

De acuerdo al cromatograma de la figura 9 para los gases productos de la combustión del Diésel sin aditivos a los 30 minutos de prueba, se observa la presencia de gases como CO₂, el cual aparece en un tiempo de retención de 2,613 s. Aunque, los análisis reportados por el laboratorio no reportaron gases de hidrocarburos, en el análisis se reportaron otros picos con tiempos de retención cercanos a 8,900 s y 9,600 s, y su tendencia se puede atribuir a compuestos típicos de combustión como son monóxido de carbono CO, oxígeno O₂ y nitrógeno N₂, teniendo en cuenta que estos compuestos son típicos del proceso de combustión de combustibles.

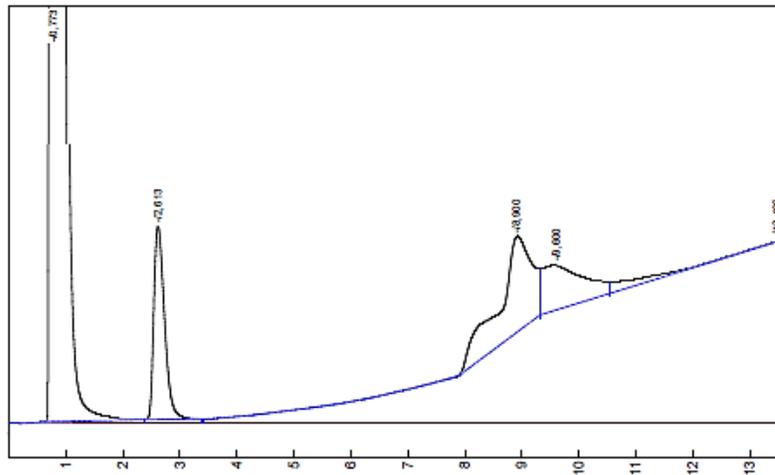


Figura 9. Cromatograma de los gases productos de la prueba de combustión del Diésel de referencia para 30 minutos de reacción.

En el caso de las Figuras 10, se observan las tendencias del porcentaje molar del contenido de CO₂ producto de la combustión del Diésel de referencia y el Diésel con aditivos.

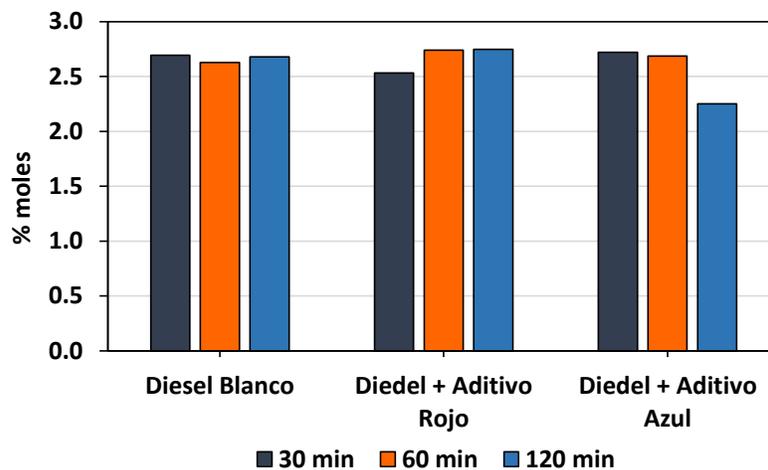
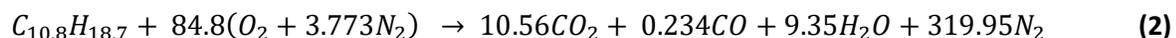


Figura 10. Contenido de CO₂ (% molar) en los gases producto de la combustión del Diésel con y sin aditivos.

El proceso de combustión depende del funcionamiento del motor y la reacción química a partir del aire y la composición del combustible (Rahman et al., 2021). Teniendo en cuenta los resultados del consumo de Diésel con y sin aditivo reportado en la figura 5, se puede deducir que el consumo de combustible varía durante los 120 minutos de prueba en el generador. Por tanto, esta variabilidad de consumo influye en el rendimiento composicional del producto de los gases de combustión. Por otra parte, aunque los gases fueron capturados en bolsas especiales es posible que el tiempo de almacenamiento para el posterior análisis de cromatografía influye en los análisis finales.

Teniendo en cuenta el consumo de Diésel con y sin aditivos en las pruebas de combustión, se decidió analizar el efecto de estos valores sobre la cantidad de emisiones de CO₂ generadas. Para cumplir con este propósito, como base de cálculo se seleccionó la ecuación de combustión del Diésel común reportada en literatura el cual presenta una fórmula elemental promedio C_{10.8}H_{18.7} (Agudelo et al., 2004) como se muestra en la ecuación 2.



En la tabla 2, se reporta la cantidad de emisiones por volumen de combustible usando el peso molecular del combustible (Diésel común) y las densidades del Diésel de referencia y Diésel con aditivos.

Tabla 2. Cantidad de emisiones de CO₂ en las pruebas de combustión de Diésel con y sin aditivos.

Combustible	*Densidad kg/lit	Volumen Consumido lit	Masa Consumida kg	Moles de Diésel	CO ₂ mol	CO ₂ m ³	**CO ₂ Reducido m ³	CO ₂ Reducido %
Diésel - Blanco	0.8218	18.8	15.45	104.18	1100.14	26.90	---	---
Diésel + Aditivo Azul	0.8206	17.2	14.11	95.17	1005.00	24.57	2.33	8.65
Diésel + Aditivo Rojo	0.8230	17.5	14.40	97.12	1025.61	25.07	1.82	6.77

* Valor medido con picnómetro en el laboratorio

** El volumen se determinó con la ecuación de los gases ideales: $PV = nRT$, siendo R: 0.082 (lt.atm)/(°K.mol)

Los resultados muestran que el volumen de emisiones de CO₂ disminuye en 2.33 y 1.82 m³ (en condiciones normales) en las pruebas de combustión del Diésel con aditivo azul y aditivo rojo, con respecto al Diésel de referencia o blanco. En este sentido, se puede indicar que el volumen por metro cubico de las emisiones de CO₂ generadas por las mezclas del Diésel con aditivo azul y rojo reducen el 8.65 y 6.77 %, respectivamente. Por tanto, por cada litro / galón de combustible ahorrado se logra disminuir 1.43 / 5.72 m³ de CO₂.

3.3 Efecto del Diésel con y sin aditivo azul AA sobre la integridad del hierro gris.

Con el propósito de complementar este trabajo, se evaluó el efecto del Diésel de referencia y el Diésel reformulado con el aditivo azul sobre la integridad del hierro gris fundido, siendo este el material preferido en el sector de los combustibles por su costo y propiedades mecánicas. Sin embargo, se ha logrado establecer que el hierro gris presenta una sensibilidad de resistencia química por su alta reactividad y propensión a la corrosión. En la figura 11 y 12 se muestra la posición de los cupones en el reactor, y los cupones de hierro gris antes y después de las pruebas de integridad.



Figura 11. Reactor *batch* para pruebas de integridad: (1) Porta cupones, (2) cupones de hierro gris, (3) Recipiente cilíndrico, (4) Tapa con roscado interno y sello, (5) Válvulas de cierre.



Cupones iniciales

a

Prueba 1 (2 ciclos)



Diésel Blanco



Diésel + Aditivo Azul

Prueba 2 (6 ciclos)



Diésel Blanco



Diésel + Aditivo Azul

Prueba 3 (24 ciclos)



Diésel Blanco



Diésel + Aditivo Azul

b

Figura 12. Cupones de hierro gris: a- Antes de las pruebas de integridad y b- Después de las pruebas de integridad a 2, 6 y 24 ciclos.

A partir del análisis superficial cualitativo representados en las fotografías de la figura 11, se puede observar que a medida que incrementa el número de ciclos los cupones de hierro gris van tomando una coloración más oscura cuando están expuestos al Diésel blanco en comparación al Diésel con aditivo azul. Asimismo, se observa que el cupon número 1 (Cupon superior) el cual no se encuentra sumergido en el combustible tiende a presentar una mayor intensidad a al cambio de coloración. Entre tanto, se puede evidenciar que en el periodo de exposición de 8 a 120 horas del tratamiento térmico no se observan cambios significativos en la superficie del material cuando se aplica el aditivo azul con dosificación de 1000 ppm. Para las pruebas de pérdida de peso se consideraron tres (3) cupones, uno ubicado en la parte superior del portacupones el cual no está sumergido en el combustible, y dos cupones sumergidos en el combustible. Para los cupones sumergidos la pérdida de peso se registró promediando sus valores. La diferencia del peso se determinó con la ecuación 3.

$$\text{Diferencia de peso (\%)}: \frac{100(\text{Valor } 1_t - \text{Valor } 2_t)}{\text{Valor } 1_t} \quad (3)$$

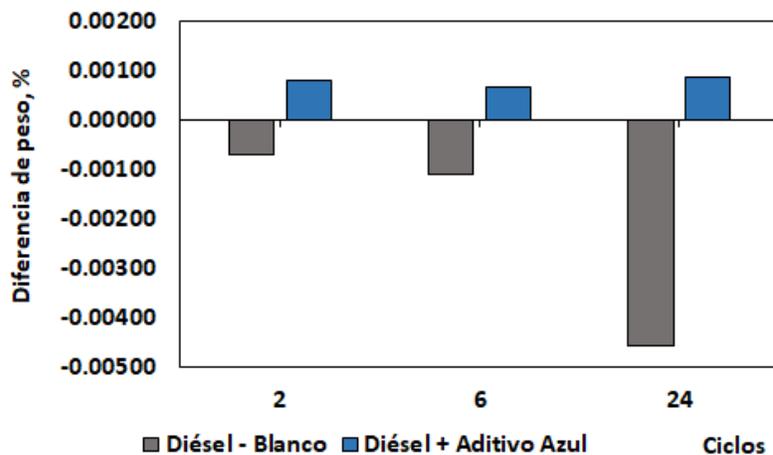
Donde:

Valor 1_t : Peso del cupon inicial para cada prueba.

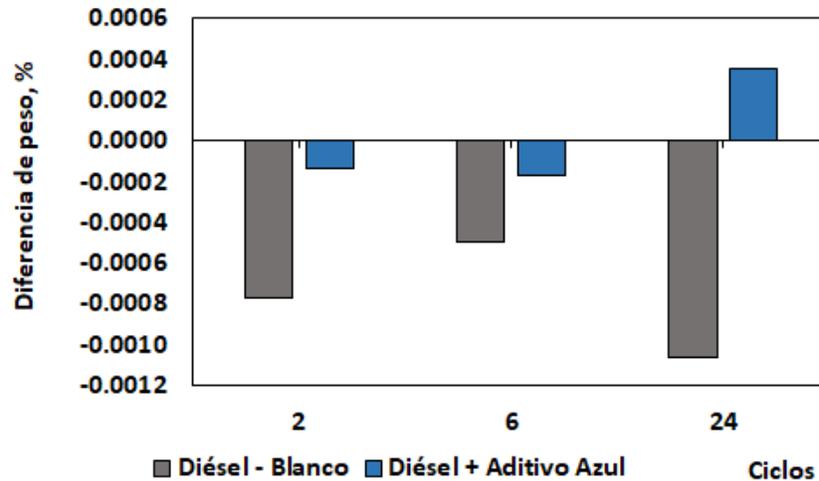
Valor 2_t : Peso del cupon final para un tiempo t o ciclo determinado.

Si en los cálculos se obtiene un valor positivo indica que los cupones están ganando peso en su superficie a partir del medio de inmersión, en caso contrario un valor negativo indica que el cupon pierde peso. En la Figura 13a y b, se observa la diferencia de peso de los cupones sumergidos en el combustible (inferiores) y el cupon de la parte superior.

Los resultados muestran que los cupones sumergidos en Diésel Blanco presentan una tendencia creciente de pérdida de peso. Entre tanto, los cupones sumergidos en Diésel con aditivo azul presentan una ganancia de peso en su superficie. Por otra parte, se observa que los cupones ubicados en la parte superior del portacupones presentan menores perdidas de peso en comparación a los cupones sumergidos tanto en el Diésel como en el Diésel con aditivo. Sin embargo, se puede evidenciar que los cupones ubicados en la parte superior en las pruebas de Diésel formulado con aditivo presentan menores perdidas de peso.



a



b

Figura 13. Diferencia de peso del hierro gris inmerso en combustible Diésel y Diésel con aditivo azul: a- Cupones sumergidos en el combustible (inferiores) y b- Cupon de la parte superior.

El comportamiento de los resultados puede estar asociado al fenómeno de adsorción entre la mezcla de Diésel reformulado con aditivo azul y la superficie del hierro gris. Lo cual indica que la naturaleza química del aditivo tiende a favorecer las fuerzas de interacción. Por tanto, los resultados indican que el aditivo empleado bajo las condiciones de pruebas establecidas promueve la inhibición de la corrosión del hierro gris para el caso de las condiciones de operación establecidas. Todas las pruebas presentaron comportamientos relativamente similares, y es posible que la estabilización de la interfase se deba a la formación de capas de productos orgánicos.

3.3.1 Análisis superficial.

Para el análisis superficial por Microscopia de Electrónica de Barrido SEM-EDS fueron seleccionados los cupones sometidos a condiciones de oxidación térmica para 6 ciclos. En la figura 14 se ilustra la micrografía de hierro gris original a 400 y 50 μm .

Los cupones superior e inferior expuestos en Diésel Blanco durante 6 ciclos presentaron perdidas en peso alrededor de 0.0005 y 0.0011 % (figura 13b). Al contrastar estas

pérdidas con las micrografías de la figura 15 se puede observar que la variación de los tamaños de poro es mayor en el cupon superior. Lo anterior indica que existe mayor desgaste en los cupones inferiores pero la dispersión de fases presenta mayor homogeneidad debido al proceso de reconfiguración de los grafitos que sucede dentro del intervalo de 18 a 200 °C (Amaya et al., 2014).

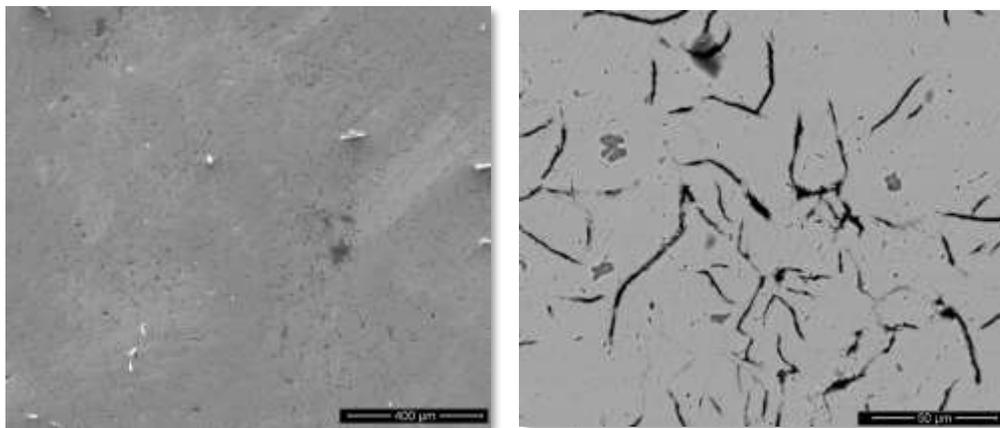
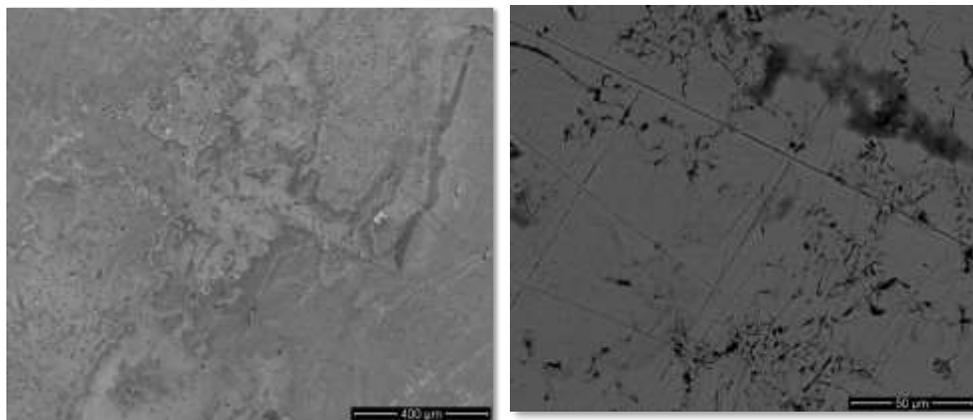


Figura 14. Micrografía de hierro gris a 400 y 50 μm .



a

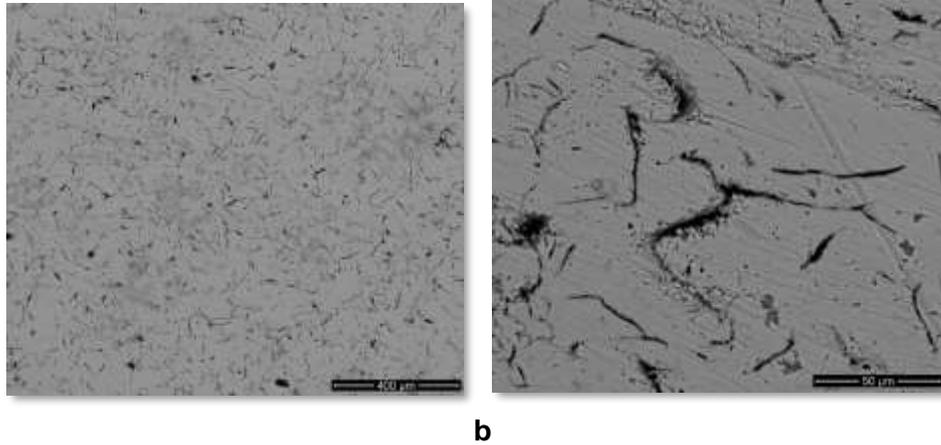
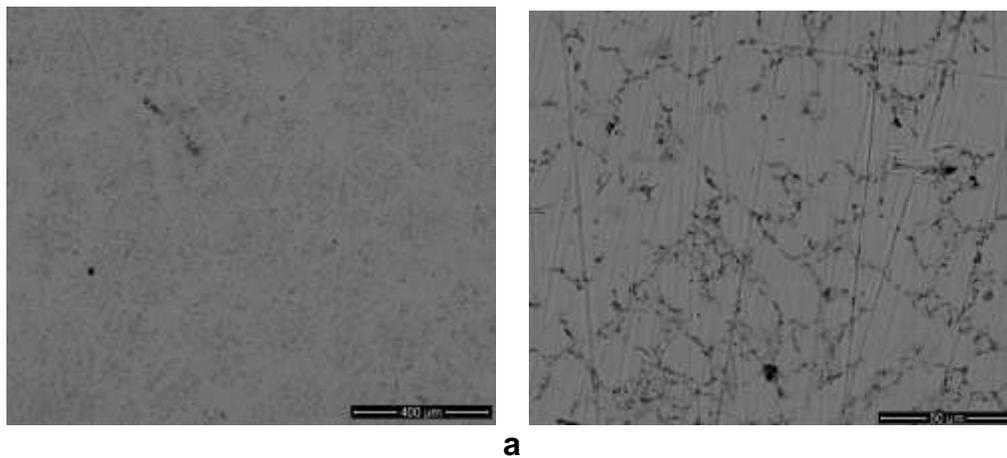
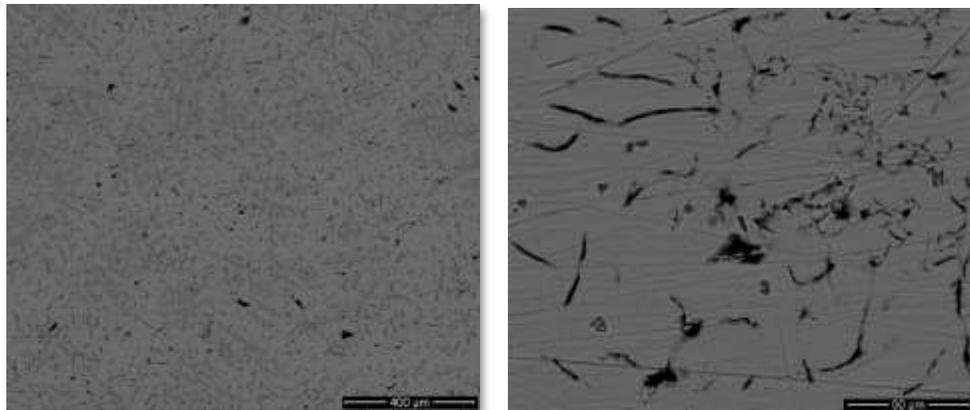


Figura 15. Micrografía de hierro gris a 400 y 50 µm inmerso en Diésel Blanco durante 6 ciclos de reacción: a- Cupon inferior y b- Cupon superior.

Por otra parte, cuando los cupones son expuestos bajo condiciones de mezclas reformuladas con aditivo azul se presenta una menor pérdida de peso en el cupon superior. Sin embargo, los cupones inferiores presentan una ganancia de peso y, a su vez existe reconfiguración de los grafitos, pero las fases dispersas son más homogéneas, en comparación al cupon inmerso en Diésel sin aditivo (figura 16).

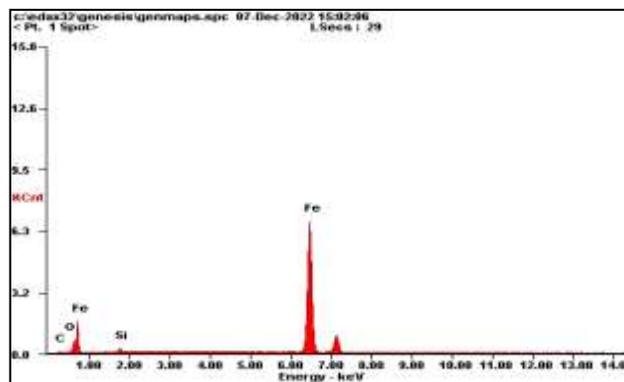




b

Figura 16. Micrografía de hierro gris a 400 y 50 µm inmerso en Diésel con aditivo azul durante 6 ciclos de reacción: a- Cupon inferior y b- Cupon superior

En forma general, los resultados de microscopia de electrónica de barrido indican que los cupones inmersos en Diésel reformulado con aditivo presentan menores efectos superficiales en el hierro gris. Sin embargo, la concentración de la interfase de grafito en el material puede inducir problemas de corrosión con el tiempo de exposición, debido a la formación de picaduras distribuidas aleatoriamente. En la figura 17 se muestra la composición elemental tanto para el hierro gris como para los cupones expuestos en Diésel sin y con aditivo azul.



a

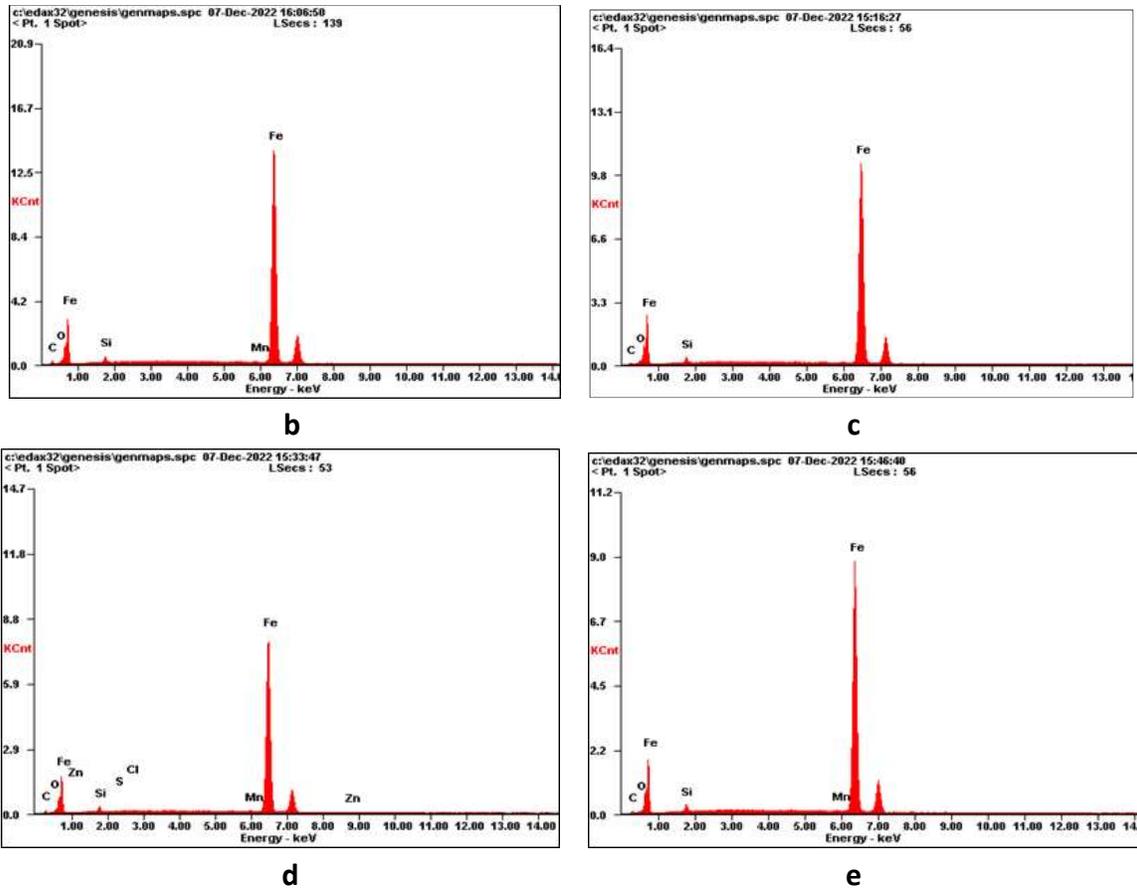


Figura 17. Composición elemental mediante EDS: a-Hierro gris, b-Cupon inferior en Diésel blanco, c-Cupon superior en Diésel blanco, d-Cupon inferior en Diésel con aditivo y e-Cupon superior en Diésel con aditivo.

De acuerdo al análisis de la composición elemental se observa que, después de seis (6) ciclos el hierro gris sufre un proceso de corrosión, con cierta heterogeneidad en sus fases. En la tabla 3, se presenta la composición de los elementos representativos de la aleación del hierro gris y los cupones obtenidos en las pruebas de seis (6) ciclos de exposición.

Tabla 3. Porcentaje en peso de la composición elemental del hierro gris inmerso en Diésel con y sin aditivo azul.

Elemento	Hierro gris	Diésel + aditivo (abajo)	Diésel + aditivo (arriba)	Diésel + sin aditivo (abajo)	Diésel + sin aditivo (arriba)
C	4.83	5.39	2.75	4.68	1.96
O	1.41	1.62	1.32	1.63	1.86
Si	2.37	2	2.24	1.98	2.16
Mn		0.55	0.59	0.56	
Fe	91.39	89.95	93.08	91.14	94.03

Los resultados de los espectros EDS muestran que el Fe es el elemento predominante después de las pruebas de oxidación en todos los cupones, ya que es el elemento mayoritario de la aleación inicial del hierro gris. El siguiente elemento predominante es el carbono, el cual se puede observar que el cupon inmerso en Diésel con aditivo presenta mayor contenido en comparación al hierro gris inicial y el cupon inmerso en Diésel Blanco. Lo anterior permite esclarecer que el aditivo azul induce una mayor interacción entre los compuestos del Diésel reformulado con la superficie de la aleación de hierro gris. Por otra parte, el contenido de los elementos como O, Si y Mn en la tabla anterior están dentro del intervalo de valores reportados para el hierro gris fundido, siendo el intervalo para el Si y Mn de 2.3 a 2.7% y 0.4 a 0.8 %, respectivamente (Oloyede et al., 2015, Salawu et al., 2020).

Los cupones ubicados en la parte superior del reactor presentan una disminución del contenido de carbono, lo cual indica que estos materiales no tienden a interaccionar con los compuestos del Diésel en estado gaseoso. Además, la reducción del contenido de carbono puede estar atribuido al proceso de reconfiguración de los grafitos y su concentración en las grietas formadas, como lo indican los registros superficiales del análisis composición elemental mediante EDS del anexo 1.

Finalmente, a partir de los resultados de las mezclas de Diésel reformuladas con aditivos naturales a base de alcohol suministrados por la empresa ALESCO, se puede deducir que el aditivo azul presenta mejores resultados en cuanto al desempeño del rendimiento del combustible, el cual es una variable de gran interés para el sector energético teniendo en

 	ASESORÍA TÉCNICA PARA EL ANÁLISIS DE LA MEZCLA DE DIÉSEL- ADITIVO SOBRE EL DESEMPEÑO E INTEGRIDAD DE UN MOTOR	UIS - INF - 216 Página 30 de 36
---	--	---

cuenta que es posible obtener un 19.9 % de ahorro del consumo durante dos horas de operación continua. Asu vez, con el uso del aditivo azul con concentración de 1000 ppm es posible obtener un incremento del 4.05 % del poder calorífico en relación al Diésel comercial, y por tanto se obtendría un incremento energético significativo por galón de Diésel reformulado consumido. Lo anterior, permite un beneficio adicional debido a que un ahorro de combustible obtenido gracias a la eficiencia del proceso de combustión acarrea una disminución del volumen de emisiones de CO₂ liberado al ambiente.

Por otra parte, se puede indicar que el uso de aditivo azul con 1000 ppm sobre el Diésel comercial mejora los problemas de integridad sobre el hierro gris fundido, y por tanto mejora la compatibilidad del combustible reformulado con los componentes del motor.

4. Conclusiones

A partir de los resultados obtenidos en esta sección se pueden deducir las siguientes conclusiones:

1. Las pruebas de combustión realizadas en el generador Caterpillar corrobora que las dosificaciones de 1000 ppm de los aditivos azul y rojo suministrados por la empresa ALESCO mejoran el rendimiento de consumo de combustible. Al finalizar la prueba de combustión, se logró determinar que durante dos horas de prueba de combustión los

	ASESORÍA TÉCNICA PARA EL ANÁLISIS DE LA MEZCLA DE DIÉSEL- ADITIVO SOBRE EL DESEMPEÑO E INTEGRIDAD DE UN MOTOR	UIS - INF - 216 Página 31 de 36
---	--	---

aditivos azul y rojo reducen el consumo de combustible alrededor del 20 % y 15.7 %, respectivamente.

2. El rendimiento promedio del combustible Diésel, con base en los valores del poder calorífico de las mezclas con los aditivos azul y rojo permite un incremento energético significativo por galón de Diésel reformulado consumido alrededor del 4.05 y 2.82 %, respectivamente.
3. En relación con las emisiones teóricas de CO₂, se puede decir que al reformular mezclas de Diésel con dosificación de 1000 ppm de los aditivos azul y rojo se reducen las emisiones volumétricas en 8.65 y 6.77 %, respectivamente, con respecto a las emisiones generadas por el Diésel comercial.
4. A partir de los resultados de las pruebas de tratamiento térmico de 6 ciclos y los análisis de Microscopia de Electrónica de Barrido SEM-EDS, se logró evidenciar que la dosificación de 1000 ppm de aditivo azul sobre el Diésel comercial mejora los problemas de integridad y compatibilidad del combustible con los componentes en hierro gris del motor. Así mismo, los resultados muestran que los cupones inferiores inmersos en Diesel con aditivo azul presentan una ganancia de peso y, a su vez existe reconfiguración de los grafitos, y las fases dispersas son más homogéneas. Lo anterior puede estar asociado a que el aditivo azul tiende a generar una mayor interacción entre los compuestos del Diésel reformulado con la superficie de la aleación de hierro gris.

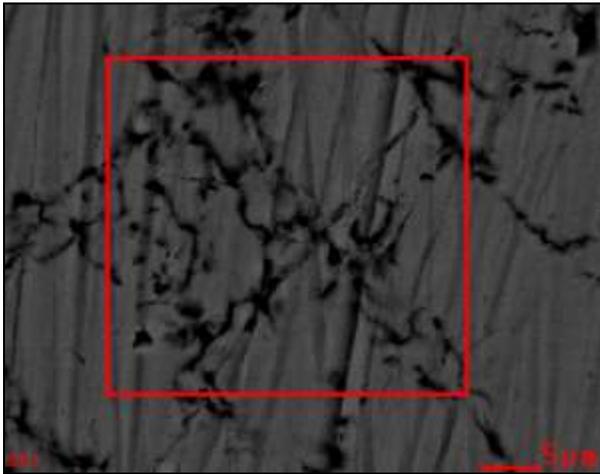
 	ASESORÍA TÉCNICA PARA EL ANÁLISIS DE LA MEZCLA DE DIÉSEL- ADITIVO SOBRE EL DESEMPEÑO E INTEGRIDAD DE UN MOTOR	UIS - INF - 216 Página 32 de 36
---	--	---

5. Referencias

1. Agudelo, J. R., Benjumea, P. N., & Bayer, J. F. P. (2004). Pruebas cortas en ruta en un vehículo tipo microbús con bioDiésel de aceite de palma colombiano. *Scientia et Technica*, 1(24).
2. Augusto Amaya, A., Piamba, O. E., & Jairo Olaya, J. (2014). Estudio de los efectos corrosivos del Diésel y bioDiésel sobre una fundición de hierro gris. *La Revista Latinoamericana de Metalurgia y Materiales, RLMM*, 34(2).
3. Belagali, R., & Dhamanagankar, P. R. (2014, August). Enhancement of performance of Diésel fuel by improving its calorific value by adding Non conventional Additive (NCA). In 2014 International Conference on Advances in Engineering & Technology Research (ICAETR-2014) (pp. 1-5). IEEE.
4. Gao, T., Divekar, P., Asad, U., Han, X., Reader, G. T., Wang, M., ... & Tjong, J. (2012, September). An enabling study of low temperature combustion with ethanol in a Diésel engine. In Internal Combustion Engine Division Fall Technical Conference (Vol. 55096, pp. 217-226). American Society of Mechanical Engineers.
5. Gilani, N., Hendijani, A. D., & Seyedin, F. (2017). Increasing the Heating Value of Ethanol Using Functionalized Carbon Nanotubes. *Journal of Energy Resources Technology*, 139(1).
6. Heriyanto, H., Umam, C., & Margareta, N. (2015, December). Influence of additives on the increase of the heating value of Bayah's coal with upgrading brown coal (UBC) method. In AIP Conference Proceedings (Vol. 1699, No. 1, p. 030026). AIP Publishing LLC.
7. León, Adan. Yovani., Guzmán Monsalve, Alexander., Picón, Hector., Laverde C, Dionisio., Molina Velasco, Daniel. (2020). Reactivity of vacuum residues by thermogravimetric analysis and nuclear magnetic resonance spectroscopy. *Energy & Fuels*, 34(8), 9231-9242.
8. Oloyede, O., Biggs, T., & Mullis, A. (2015). Characterization of rapidly solidified commercial grey cast iron in drop-tube. In Materials Science and Technology Conference and Exhibition 2015, MS and T 2015 (Vol. 1, pp. 843-849). Association for Iron and Steel Technology.
9. Rahman, S. A., Rizwanul Fattah, I. M., Ong, H. C., & Zamri, M. F. M. A. (2021). State-of-the-Art of Strategies to Reduce Exhaust Emissions from Diésel Engine Vehicles. *Energies*, 14(6), 1766.
10. Salawu, E. Y., Ajayi, O. O., Inegbenebor, A. O., Akinlabi, S., Popoola, A. P. I., Akinlabi, E., ... & Uyo, U. O. (2020). Electrochemical study and gravimetric behaviour of gray cast iron in varying concentrations of blends as alternative material for gears in ethanol environment. *Journal of Materials Research and Technology*, 9(4), 7529-7539.

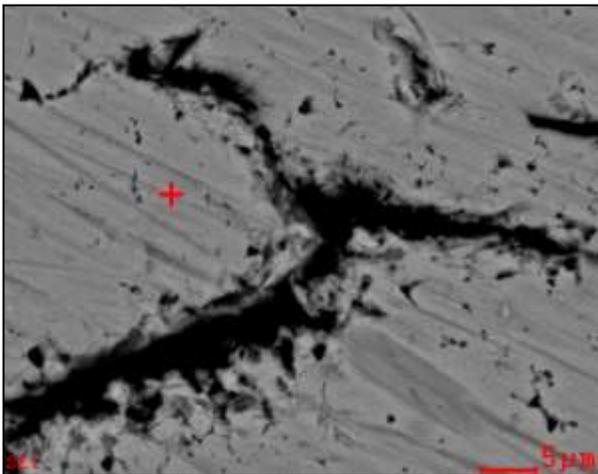
6. Anexos

1. Composición elemental mediante EDS para el hierro gris.

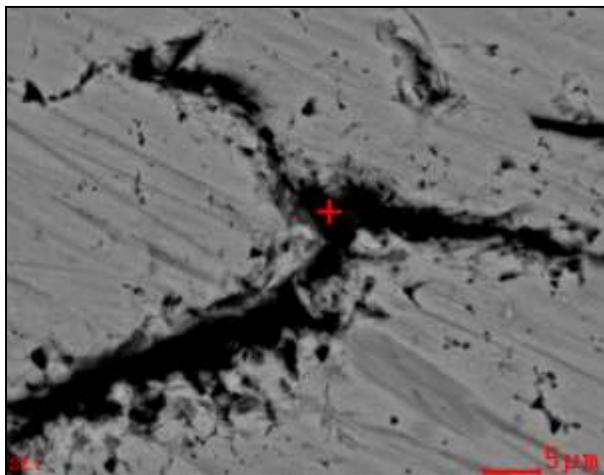


<i>Element</i>	<i>Wt%</i>	<i>At%</i>
<i>CK</i>	05.39	19.92
<i>OK</i>	01.62	04.48
<i>SiK</i>	02.00	03.17
<i>SK</i>	00.06	00.08
<i>ClK</i>	00.13	00.16
<i>MnK</i>	00.55	00.45
<i>FeK</i>	89.95	71.53
<i>ZnK</i>	00.31	00.21
<i>Matrix</i>	Correction	ZAF

2. Composición elemental mediante EDS para el cupon superior en la prueba con Diésel Blanco.

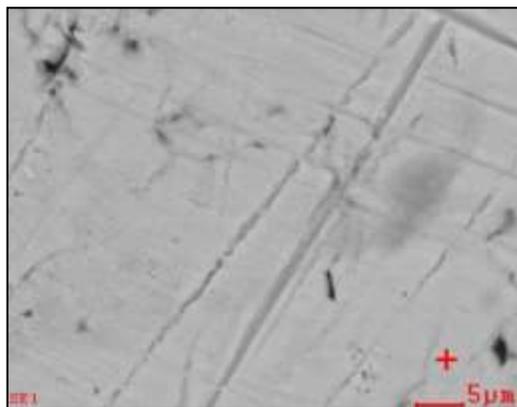


<i>Element</i>	<i>Wt%</i>	<i>At%</i>
<i>CK</i>	01.96	07.98
<i>OK</i>	01.86	05.71
<i>SiK</i>	02.16	03.77
<i>FeK</i>	94.03	82.55

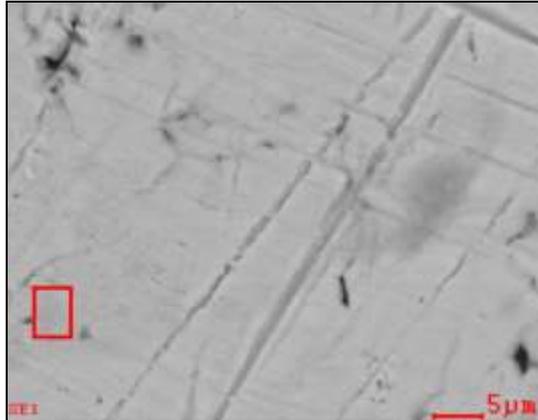


<i>Element</i>	<i>Wt%</i>	<i>At%</i>
<i>CK</i>	26.79	58.79
<i>OK</i>	02.93	04.83
<i>SiK</i>	06.50	06.10
<i>SK</i>	00.34	00.28
<i>ClK</i>	00.28	00.21
<i>MnK</i>	02.32	01.11
<i>FeK</i>	60.31	28.46
<i>ZnK</i>	00.53	00.22

3. *Composición elemental mediante EDS para el cupon inferior en la prueba con Diésel Blanco.*

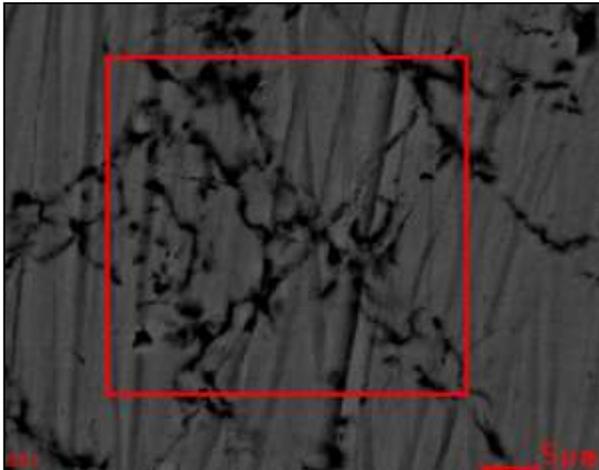


<i>Element</i>	<i>Wt%</i>	<i>At%</i>
<i>CK</i>	04.68	17.68
<i>OK</i>	01.63	04.62
<i>SiK</i>	01.98	03.21
<i>MnK</i>	00.56	00.46
<i>FeK</i>	91.14	74.03



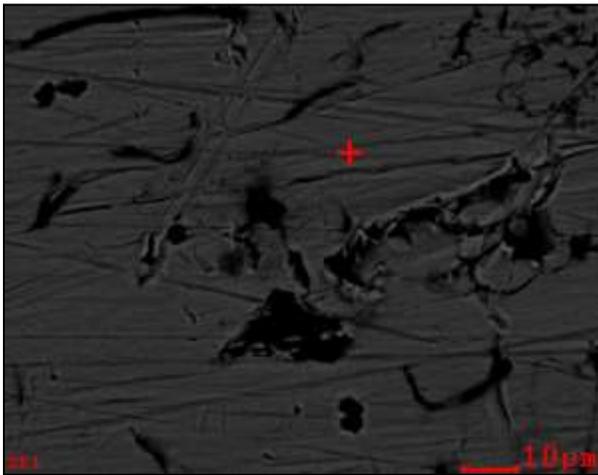
Element	Wt%	At%
CK	04.86	16.30
OK	07.19	18.09
NaK	00.52	00.91
AlK	00.46	00.69
SiK	01.82	02.61
MnK	00.41	00.30
FeK	84.39	60.83

4. *Composición elemental mediante EDS para el cupon inferior en la prueba de Diésel con aditivo azul.*

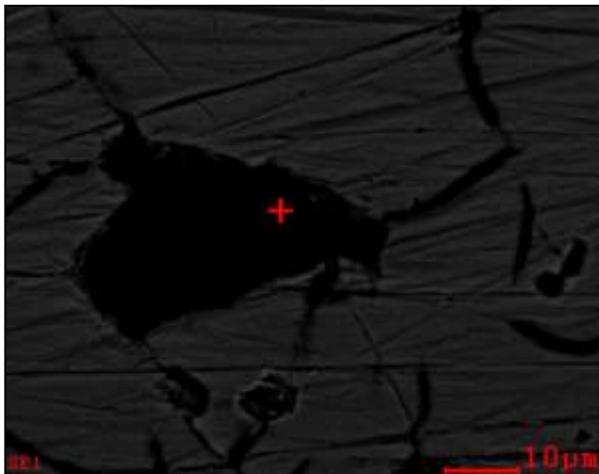


Element	Wt%	At%
CK	05.39	19.92
OK	01.62	04.48
SiK	02.00	03.17
SK	00.06	00.08
ClK	00.13	00.16
MnK	00.55	00.45
FeK	89.95	71.53
ZnK	00.31	00.21

5. Composición elemental mediante EDS para el cupon superior en la prueba de Diésel con aditivo azul.



<i>Element</i>	<i>Wt%</i>	<i>At%</i>
<i>CK</i>	02.75	11.08
<i>OK</i>	01.32	03.99
<i>SiK</i>	02.24	03.86
<i>MnK</i>	00.59	00.52
<i>FeK</i>	93.08	80.54



<i>Element</i>	<i>Wt%</i>	<i>At%</i>
<i>CK</i>	52.94	77.35
<i>OK</i>	09.32	10.22
<i>NaK</i>	00.52	00.39
<i>AlK</i>	00.52	00.34
<i>SiK</i>	00.36	00.23
<i>PK</i>	00.01	00.01
<i>SK</i>	00.04	00.02
<i>ClK</i>	00.17	00.08
<i>MnK</i>	00.49	00.16
<i>FeK</i>	35.62	11.19