



Universidad Nacional Mayor de San Marcos

Universidad del Perú. Decana de América

Facultad de Química e Ingeniería Química

Escuela Profesional de Ingeniería Química

**Validación y aplicación de la Espectroscopia Infrarroja
para medir el número básico en aceites lubricantes con
el propósito de evaluar su capacidad para neutralizar
los ácidos y prevenir la corrosión en los Motores**

TESIS

Para optar el Título Profesional de Ingeniero Químico

AUTOR

Daniel Bernardo CUENCA CHACCA

ASESOR

Dr. Fernando SUCA APAZA

Lima, Perú

2024



Reconocimiento - No Comercial - Compartir Igual - Sin restricciones adicionales

<https://creativecommons.org/licenses/by-nc-sa/4.0/>

Usted puede distribuir, remezclar, retocar, y crear a partir del documento original de modo no comercial, siempre y cuando se dé crédito al autor del documento y se licencien las nuevas creaciones bajo las mismas condiciones. No se permite aplicar términos legales o medidas tecnológicas que restrinjan legalmente a otros a hacer cualquier cosa que permita esta licencia.

Referencia bibliográfica

Cuenca, D. (2024). *Validación y aplicación de la Espectroscopia Infrarroja para medir el número básico en aceites lubricantes con el propósito de evaluar su capacidad para neutralizar los ácidos y prevenir la corrosión en los Motores*. [Tesis de pregrado, Universidad Nacional Mayor de San Marcos, Facultad de Química e Ingeniería Química, Escuela Profesional de Ingeniería Química]. Repositorio institucional Cybertesis UNMSM.

Metadatos complementarios

Datos de autor	
Nombres y apellidos	Daniel Bernardo Cuenca Chacca
Tipo de documento de identidad	DNI
Número de documento de identidad	76152553
URL de ORCID	No aplica
Datos de asesor	
Nombres y apellidos	Fernando Suca Apaza
Tipo de documento de identidad	DNI
Número de documento de identidad	40375320
URL de ORCID	https://orcid.org/0000-0001-7116-8685
Datos del jurado	
Presidente del jurado	
Nombres y apellidos	Jorge Luis Cárdenas Ruíz
Tipo de documento	DNI
Número de documento de identidad	06627695
Miembro del jurado 1	
Nombres y apellidos	Pedro José Romero y Otiniano
Tipo de documento	DNI
Número de documento de identidad	15612279
Datos de investigación	
Línea de investigación	No aplica.
Grupo de investigación	No aplica
Agencia de financiamiento	Sin financiamiento.

Ubicación geográfica de la investigación	Universidad Nacional Mayor de San Marcos Edificio: Facultad de Química e Ingeniería Química
	País: Perú Departamento: Lima Provincia: Callao Latitud: -12.06024774892438 Longitud: -77.08352521269161
Año o rango de años en que se realizó la investigación	Setiembre 2024 – Diciembre 2024
URL de disciplinas OCDE	Química analítica https://purl.org/pe-repo/ocde/ford#1.04.07



UNIVERSIDAD NACIONAL MAYOR DE SAN MARCOS
(Universidad del Perú, DECANA DE AMÉRICA)
FACULTAD DE QUÍMICA E INGENIERÍA QUÍMICA
Central Telefónica: 619-7000

ESCUELA PROFESIONAL DE INGENIERÍA QUÍMICA

ACTA DE SUSTENTACIÓN DE TESIS

Los suscritos miembros del Jurado Calificador nombrados por el señor Presidente del Comité Ejecutivo del "III Programa Ciclo Taller de Titulación Profesional por la Modalidad de Tesis y Trabajo de Suficiencia Profesional para la Facultad de Química e Ingeniería Química 2024-II", bajo la Presidencia del Ing. JORGE LUIS CÁRDENAS RUÍZ; Ing. PEDRO JOSÉ ROMERO Y OTINIANO (Miembro) y el Dr. FERNANDO SUCA APAZA (Asesor); habiendo presentado para tal efecto la TESIS, titulada Validación y aplicación de la Espectroscopia Infrarroja para medir el número básico en aceites lubricantes con el propósito de evaluar su capacidad para neutralizar los ácidos y prevenir la corrosión en los Motores después de SUSTENTADA Y APROBADA la tesis elaborado por el bachiller en Ingeniería Química: CUENCA CHACCA, DANIEL BERNARDO; para optar el TÍTULO PROFESIONAL de INGENIERO QUÍMICO, acordaron calificarlo con la NOTA de:

DIECISIETE

(LETRAS)

17

(NÚMEROS)

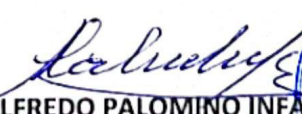
Ciudad Universitaria, 21 de diciembre del 2024


Ing. JORGE LUIS CÁRDENAS RUÍZ

Presidente


Ing. PEDRO JOSÉ ROMERO Y OTINIANO
Miembro


Dr. FERNANDO SUCA APAZA
Asesor


Dr. RUBEN ALFREDO PALOMINO INFANTE
Director de la E.P. de Ingeniería Química





UNIVERSIDAD NACIONAL MAYOR DE

SAN MARCOS

Universidad del Perú, Decana de América

CERTIFICADO DE SIMILITUD

Yo, SUCA APAZA FERNANDO en mi condición de asesor acreditado con la Resolución Decanal N°000027-2025-D-FQIQ/UNMSM de la tesis, cuyo título **Validación y aplicación de la Espectroscopia Infrarroja para medir el número básico en aceites lubricantes con el propósito de evaluar su capacidad para neutralizar los ácidos y prevenir la corrosión en los Motores**, presentado por el bachiller: **Cuenca Chacca, Daniel Bernardo** para optar el título Profesional de Ingeniería Química, CERTIFICO que se ha cumplido con lo establecido en la Directiva de Originalidad y de Similitud de Trabajos Académicos, de Investigación y Producción Intelectual. Según la revisión, análisis y evaluación mediante la plataforma PIDS, el documento evaluado cuenta con el 12% de similitud, nivel **PERMITIDO** para continuar con los trámites correspondientes y para su **publicación en el repositorio institucional**.

Se emite el presente certificado en cumplimiento de lo establecido en las normas vigentes, como uno de los requisitos para la obtención del título correspondiente.

Lima, 07 de enero de 2025

Firma del Asesor

Nombres y Apellidos del Asesor: Fernando Suca Apaza

DNI: 40375320

AGRADECIMIENTOS

Agradezco primero a Dios, por ser mi guía y fortaleza en cada paso de este camino. Su luz ha iluminado mi mente y corazón, dándome la sabiduría, paciencia y perseverancia necesarias para culminar este proyecto.

A mis padres, quienes han sido el cimiento de todos mis logros. A ustedes les debo no solo este paso, sino también todo lo que soy. Su amor incondicional, su apoyo constante y sus sacrificios diarios me han demostrado el significado de la dedicación y el compromiso. Gracias por cada palabra de aliento, por cada consejo lleno de sabiduría que me orientó en los momentos de incertidumbre y, sobre todo, por creer en mí incluso cuando yo mismo dudaba. Este logro es tanto mío como suyo, su ejemplo y su fe en mi capacidad me impulsaron a superar cada obstáculo.

A mi familia, que siempre ha estado a mi lado en los momentos difíciles y en los de alegría. Su compañía y palabras de aliento me han dado fuerzas para superar los desafíos que encontré en este proceso.

A mi jefa de laboratorio, Gina Vega, por brindarme la oportunidad de desarrollar este trabajo en las instalaciones del laboratorio. Su confianza, disposición y apoyo constante han sido fundamentales para realizar de esta investigación. Gracias por abrirme las puertas y permitirme crecer profesionalmente bajo su guía.

A todos ustedes, gracias por ser mi inspiración y mi sustento en esta etapa de mi vida. Este logro también es de ustedes.

RESUMEN

La presencia de azufre, la oxidación y la nitración del aceite causan problemas graves en los motores de combustión interna. En el proceso de combustión, el azufre sufre una serie de reacciones químicas convirtiéndose en ácido sulfúrico que corroe las superficies metálicas, provocando corrosión ácida. Además, la oxidación y nitración del aceite generan sustancias ácidas que también contribuyen a la corrosión de los componentes del motor. Si no se controlan, estos procesos pueden degradar los componentes del motor como los pistones y cilindros, acortando la vida útil del motor. En ese sentido, los lubricantes previenen estos daños, ya que contienen ciertos aditivos cuyo objetivo es neutralizar los ácidos que se producen en la combustión. Esta propiedad se mide a través del Número Base Total (TBN). El TBN cuantifica la reserva alcalina del aceite, y su disminución durante su vida útil es un indicativo de que el aceite se está degradando y perdiendo efectividad para proteger el motor contra la corrosión ácida. El monitoreo periódico del TBN permite optimizar los cambios de aceite sin que se pierda la capacidad protectora del lubricante y prolongando la vida útil del motor.

El método tradicional para medir el TBN es la titulación potenciométrica ASTM D2896, una técnica precisa. Sin embargo, es costosa, contaminante y consume tiempo. Por otro lado, existen métodos alternativos para medir el TBN como la espectroscopia infrarroja (FTIR), cuya ventaja es más rápida, menos costosa, no destructiva y genera menos contaminantes. En ese sentido, el objetivo del presente trabajo es validar un método de ensayo para medir el TBN empleando la FTIR, para lo cual fue necesario realizar una calibración del FTIR con muestras de aceite de distinto grado de degradación, que abarque un amplio rango. Esta calibración se llevó a cabo correlacionando los espectros obtenidos por FTIR con los valores de TBN determinados mediante titulación potenciométrica, que se utilizó como método de referencia. Además, se realizaron

comparaciones directas con la titulación potenciométrica. Comparando ambos métodos, se determina la precisión y exactitud del método implementado. Los resultados obtenidos muestran que el coeficiente de correlación R^2 fue de 0.97, lo que indica una excelente relación entre ambos métodos. Además, se demostró estadísticamente que no existen diferencias significativas entre los resultados de ambos métodos. El error relativo del método implementado fue de 3%, el coeficiente de variación fue de 0.19%, y la desviación estándar fue de 0.0148, lo que demuestra la alta precisión y confiabilidad del método FTIR para medir el TBN en aceites lubricantes.

Palabras clave: Lubricantes, Número básico, FTIR, ASTM D2896, corrosión ácida.

INDICE

I. INTRODUCCION	10
I.1. INTRODUCCION.....	10
I.2. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA.....	12
I.2.1. Formulación del problema	16
Problema General.....	16
Problemas Específico	16
I.3. OBJETIVOS	17
I.3.1. Objetivo general.....	17
I.3.2. Objetivos específicos	17
I.4. JUSTIFICACION.....	18
II. REVISION DE LITERATURA	19
II.1. MARCO TEORICO.....	19
II.1.1. LUBRICANTES.....	19
II.1.2. COMPOSICIÓN DE LOS ACEITES LUBRICANTES.....	19
II.1.2.1. Aceite base	19
II.1.2.2. Aditivos.....	21
II.1.3. FUNCIONES DE LOS LUBRICANTES	22
II.1.4. CLASIFICACIÓN DE LOS ACEITES LUBRICANTES.....	24
II.1.5 PROPIEDADES DE LOS LUBRICANTES.....	25
II.1.6. DEGRADACIÓN DE ACEITES LUBRICANTES.....	26
II.1.6.1. Oxidación del aceite.....	27
II.1.6.2 Causas del proceso de oxidación	28
II.1.6.3. Consecuencias de la oxidación del aceite	29
II.1.6.4. Mecanismos de la reacción de oxidación.....	29
II.1.7. FORMACIÓN DE ÁCIDOS EN ACEITES LUBRICANTES.....	31
II.1.7.1. Oxidación del aceite.....	31
II.1.7.2. Contaminación por gases de combustión.....	31
II.1.7.3. Descomposición de los aditivos.....	32
II.1.7.4. Absorción de agua y formación de ácidos orgánicos.....	32
II.1.8. CORROSION EN MOTORES.....	32
II.1.8.1. Tipos de corrosión	33
II.1.8.2. Neutralización y prevención de la corrosión ácida	35
II.1.8.3. Factores que contribuyen a la formación de ácidos	36

II.1.8.4. Consecuencias de la corrosión	37
II.1.9. NUMERO BÁSICO	41
II.1.9.1. Importancia del número básico en los aceites lubricantes	41
II.1.9.2. Evolución del número básico en aceites usados	42
II.1.9.3. Valores típicos del número básico para diferentes aplicaciones.....	45
II.1.10. ESPECTROSCOPIA	46
II.1.10.1. Espectroscopia infrarroja	48
II.1.10.2. Espectroscopia infrarroja en aceites lubricantes	49
II.1.10.3. Aplicaciones en el análisis de aceites lubricantes.....	49
II.1.10.3. Revisión metodológica.....	51
II.1.11. MÉTODOS TRADICIONALES PARA CUANTIFICAR EL NÚMERO BÁSICO EN ACEITES LUBRICANTES	56
II.1.11.1 Método de prueba estándar para determinar el número base de productos derivados del petróleo mediante titulación potenciométrica con ácido perclórico ASTM D2896	57
II.1.11.2. Comparación de la titulación potencia eléctrica con técnicas modernas De espectroscopia infrarroja para medir el número básico en los lubricantes	58
II.1.12. VALIDACIÓN DE MÉTODOS ANALÍTICOS	59
II.1.12.1. Tipos de validación de métodos.....	59
II.1.12.2. Parámetros para la validación de métodos.....	60
II.2. ANTECEDENTES DEL ESTUDIO	62
II.2.1. Antecedente internacional	62
III. HIPOTESIS Y VARIABLES	63
III.1 Hipótesis	63
III.2. Operacionalización de las variables.....	63
IV. MATERIALES Y METODOS	66
IV.1 Área de estudio	66
IV.2. Diseño de la investigación	66
IV.3. Población y muestra.....	67
IV.4. Desarrollo experimental.....	68
IV.4.1. Equipos.....	68
IV.4.1.2. Desarrollo de la Curva de calibración	69
IV.4.1.3. Procedimiento experimental para la Validación Del Método	74
V. RESULTADOS	76
V.1. Curva De Calibración	76
V.1.1. Resultados de lecturas de espectros de muestras para curva de calibración	76

V.1.2. Resultados de Numero básico por la norma ASTM D2896 de muestras para curva de calibración	76
V.2. Validación Del método	77
V.2.1. Exactitud del método.....	77
V.2.2. Precisión del método	78
V.3. Análisis Estadístico De Los Resultados.....	80
V.3.1. Curva de calibración.....	80
V.3.2. Validación del método.....	84
V.3.2.1. Exactitud del método	84
V.3.2.2. Precisión del método	89
V.4. EVALUACION ECONOMICA	90
V.4.1 Criterios de evaluación.....	90
5.4.2. Cuantificación de costos.....	91
VI.6. DISCUSION DE RESULTADOS	92
Evaluación de las variables para la curva de calibración	92
Validación del método desarrollado	93
Exactitud.....	93
Precisión	93
VII. CONCLUSIONES	95
VIII. RECOMENDACIONES	96
XV. REFERENCIAS BIBLIOGRAFICAS	97

INDICE DE FIGURAS

<i>Ilustración 1 Corrosión ácida del cilindro y cojinete del motor</i>	13
<i>Ilustración 2 Clasificación del aceite base</i>	20
<i>Ilustración 3 Mecanismo de acción del Polímero mejorador del Índice de viscosidad</i>	22
<i>Ilustración 4 Zonas de oxidación del aceite</i>	28
<i>Ilustración 5 Impacto de la corrosión ácida en el motor</i>	38
<i>Ilustración 6 Número básico del lubricante según el contenido de azufre en el combustible</i>	43
<i>Ilustración 7 Evolución del número básico durante la vida útil del lubricante</i>	44
<i>Ilustración 8 Tendencia del número básico durante la vida útil del lubricante</i>	45
<i>Ilustración 9 Esquema de funcionamiento del espectrofotómetro</i>	48
<i>Ilustración 10 Espectro infrarrojo</i>	49
<i>Ilustración 11 Rango Espectroscópico de la oxidación y nitración</i>	52
<i>Ilustración 12 Rango espectroscópico de la sulfatación</i>	53
<i>Ilustración 13 Rango espectroscópico de ciertos contaminantes en el aceite</i>	54
<i>Ilustración 14 Espectro infrarrojo de aceite básico</i>	71
<i>Ilustración 15 Espectro infrarrojo de aceite nuevo de motor</i>	71
<i>Ilustración 16 Espectros infrarrojo para curva de calibración</i>	72
<i>Ilustración 17 Equipo de titulación potenciométrica</i>	74
<i>Ilustración 18 Picos de oxidación, nitración y sulfatación en muestras para calibración</i>	81
<i>Ilustración 19 Relación entre el número básico y las variables oxidación, nitración y sulfatación</i>	81
<i>Ilustración 20 Prueba de normalidad de Anderson Darling</i>	86
<i>Ilustración 21 Diagrama de Grubbs para valores atípicos</i>	86

INDICE DE TABLAS

<i>Tabla 1 Clasificación de los aceites lubricantes</i>	<i>24</i>
<i>Tabla 2 Valores típicos de número básico según aplicación</i>	<i>46</i>
<i>Tabla 3 Parámetros típicos de contaminantes en aceites lubricantes</i>	<i>51</i>
<i>Tabla 4 Cuadro comparativo entre titulación potenciométrica y espectroscopía infrarroja</i>	<i>59</i>
<i>Tabla 5 Características de equipo espectroscopia infrarroja.....</i>	<i>68</i>
<i>Tabla 6 Características de equipo de titulación potenciométrica</i>	<i>68</i>
<i>Tabla 7 Especificaciones de aceite nuevo</i>	<i>69</i>
<i>Tabla 8 Descripción de Muestras para curva de calibración.....</i>	<i>70</i>
<i>Tabla 9 Longitudes de onda de Oxidación, nitración y sulfatación.....</i>	<i>73</i>
<i>Tabla 10 Descripción de muestras para prueba de exactitud.....</i>	<i>75</i>
<i>Tabla 11 Resultados de oxidación, nitración y sulfatación para curva de calibración. 76</i>	
<i>Tabla 12 Resultados de Número básico de muestras para curva de calibración</i>	<i>76</i>
<i>Tabla 13 Resultado de oxidación, nitración y sulfatación para prueba de exactitud....</i>	<i>77</i>
<i>Tabla 14 Resultado de número básico de muestras para prueba de exactitud.....</i>	<i>78</i>
<i>Tabla 15 Resultados de Oxidación, nitración y sulfatación para prueba de precisión. 78</i>	
<i>Tabla 16 Coeficientes de correlación de las variables con el número básico</i>	<i>82</i>
<i>Tabla 17 Valor p de las variables oxidación, nitración y sus interacciones para construcción del modelo.....</i>	<i>83</i>
<i>Tabla 18 Coeficiente de correlación R^2 del modelo.....</i>	<i>84</i>
<i>Tabla 19 Resultados de TBN del modelo hallado y TBN del método de referencia</i>	<i>85</i>
<i>Tabla 20 T de Student.....</i>	<i>87</i>
<i>Tabla 21 Error Relativo</i>	<i>88</i>
<i>Tabla 22 Comparación de costos operativos</i>	<i>91</i>
<i>Tabla 23 Comparación de costos de mantenimiento anual</i>	<i>91</i>
<i>Tabla 24 Comparación de costos totales anual</i>	<i>91</i>

I. INTRODUCCION

I.1. INTRODUCCION

El análisis de aceite es una herramienta de mantenimiento predictivo fundamental y permite una evaluación precisa del estado de un sistema de lubricación, especialmente un motor de combustión interna alternativo (RCE), sin tener que apagarlo. Esta técnica se puede utilizar para estudiar diversos parámetros como oxidación, nitración, viscosidad, metales de desgaste, recuento de partículas, número de acidez total (TAN), número de bases total (TBN), contenido de agua, contenido de carbono, sulfatación, contaminación por glicol y degradación de aditivos. y dilución (gasolina - Diesel) y otros, todos ellos vinculados a técnicas de análisis específicas. Esta información permite establecer correlaciones y anticipar posibles fallos del motor, garantizando que los aceites lubricantes sólo deben sustituirse cuando sea necesario, generalmente cuando un parámetro crítico está fuera de especificación.

Uno de los aspectos más importantes del monitoreo de lubricantes es el número de base total (TBN). El monitoreo del TBN no solo hace que sea más fácil determinar cuándo es necesario reemplazar un lubricante en uso, sino que también evalúa el estado del motor a lo largo de su vida útil. A medida que aumenta la vida útil del motor, aumenta el desgaste de sus componentes, tales como las paredes del cilindro, lo que permite que entren más gases de combustión al cárter, lo que provoca la formación de depósitos en el aceite, lo que a su vez conduce a una reducción del TBN.

Generalmente, el número de bases total (TBN) se determina mediante valoraciones potenciométricas como se describe en ASTM D 4739 y ASTM D-2896. Sin embargo, estos métodos son complicados y costosos, ya que requieren volúmenes de muestra relativamente grandes, personal altamente capacitado y el manejo de reactivos peligrosos, entre otras desventajas.

La introducción de la espectroscopía infrarroja por transformada de Fourier (FTIR) ha permitido el desarrollo de métodos cuantitativos para el análisis de lubricantes. Esto se debe a mejoras en el poder computacional de los instrumentos FTIR, avances en las técnicas de preparación de muestras y la introducción de nuevos métodos quimiométricos que facilitan el análisis cuantitativo. Además, se simplifica el pretratamiento de la muestra y se reduce el tiempo necesario para realizar las mediciones.

1.2. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

A través de los años, la refinación del petróleo en el mundo está en constante evolución ya que el petróleo extraído es más pesado que años anteriores y contienen mayores contaminantes como el azufre, agua, etc. El azufre en el petróleo es un contaminante importante debido a que causa problemas ambientales y en la industria, por lo que se han implementado muchas técnicas para su desulfuración; sin embargo, se ha logrado disminuir pero no eliminarla.

Chaudhuri. (2011) afirma que el alto contenido de azufre en los combustibles causa corrosión en las tuberías y el cilindro del motor. En condiciones ideales, la combustión debería producir solo agua (H_2O) y dióxido de carbono; sin embargo, no sucede así. Las impurezas del combustible generan productos secundarios no deseados. El azufre reacciona con el oxígeno formando Dióxido de azufre (SO_2) y posteriormente se transforma a ácido sulfúrico (H_2SO_4).

Sánchez. (2008) señala que los óxidos de azufre se forman cuando el combustible diésel con azufre se consume en la cámara de combustión de un motor y reaccionan con el vapor de agua para formar el ácido sulfúrico. Si estos vapores de ácidos se condensan, atacan químicamente las superficies del metal de las guías de válvula, las camisas de los cilindros y los cojinetes, al igual que el sulfuro de hidrógeno. Por ejemplo, las camisas de los cilindros se pueden desgastar diez veces más rápido si la temperatura de las camisas de los cilindros es inferior a la temperatura de rociado del ácido sulfúrico y el aceite de lubricación no tiene suficiente reserva de alcalinidad para neutralizar el ácido.

Las siguientes imágenes muestran la corrosión ácida en la superficie de las partes internas del motor. Si bien el rendimiento del motor no se ve afectado, el desgaste corrosivo

produce consume excesivo del aceite y fuga de gases causando la falla prematura del motor.

Ilustración 1 Corrosión ácida del cilindro y cojinete del motor



Fuente: Sánchez, N (2008)

Los ácidos pueden condensarse en las superficies metálicas internas del motor, como las paredes del cilindro, el sistema de escape y el cárter, especialmente cuando funciona a bajas temperaturas o en ciclos cortos. Esto ocurre principalmente en situaciones en las que la temperatura del motor no es lo suficientemente alta para evaporar estos ácidos, lo que los hace depositarse.

El proceso de corrosión ácida en los motores de combustión interna es un problema bien conocido en la industria automotriz y los fabricantes trabajan en distintas soluciones para reducir su impacto, utilizando combustibles de mejor calidad y formulando aceites con aditivos para combatir estos efectos.

Noria (2024) afirma que el número básico (TBN) del aceite es la capacidad del lubricante para neutralizar los ácidos que se generan durante su vida útil, si el número básico del lubricante es alto mayor será la capacidad de neutralizar los ácidos. Actualmente, los

lubricantes tienen valores en promedio entre 5 y 15 de TBN. Durante el uso, el aceite se contamina con sustancias ácidas y en consecuencia el TBN disminuye con el tiempo. Además el autor afirma que si el TBN del aceite decae por debajo del 50% del valor del aceite nuevo, el lubricante pierde la capacidad de proteger al motor contra la corrosión ácida por lo que se requiere el cambio del aceite.

Por esta razón es fundamental monitorear la condición del aceite durante su vida útil. En análisis del lubricante permite detectar signos de contaminación, degradación y desgaste de los componentes del motor y tomar acciones, ya sean preventivas o correctivas. Además, se extiende la vida útil del aceite, reduciendo costos de reposición.

Algunas consecuencias de no realizar el monitoreo del lubricante son, fallas prematuras del quipo, riesgo de corrosión ácida y desgaste, contaminación por partículas externas y/o agua y costos operativos más altos al no identificar los problemas a tiempo.

Entre los parámetros fisicoquímicos analizados para monitorear la condición del aceite, se encuentra la determinación del Número Base Total. Como ya se mencionó, este ensayo cuantifica los componentes básicos del aceite (aditivos) o también llamados reserva alcalina, los cuales neutralizan los ácidos generados durante la combustión previniendo la corrosión del motor.

La mayoría de los ensayos para determinar el TBN del aceite se basan en titulaciones potenciométricas y colorimétricas como las normas ASTM D2896, ASTM 4739, ASTM D974 etc. El problema con estos ensayos es que son complejos y costosos de realizar, ya que requieren volúmenes significativos de solventes orgánicos y ácidos extremadamente corrosivos que son peligrosos y es perjudicial para el medio ambiente (clorobenceno, ácido acético, tolueno, etc.).

Además, muchos de los solventes que se utilizan en estos ensayos no son de fácil adquisición porque son insumos fiscalizados por la SUNAT, por lo que su adquisición está regulada por el estado y se declara periódicamente la compra y desecho de estos solventes. Por otro lado, la sensibilidad de estos métodos disminuye cuando se analizan muestras con interferencias como el hollín.

Por otro lado, la técnica de espectroscopía infrarroja (F-TIR) es utilizada en el análisis del lubricante para monitorear la condición del aceite, permite medir compuestos y procesos como la oxidación, nitración, sulfatación, agua, combustible, degradación de aditivos, etc. La F-TIR presenta ventajas frente a otras técnicas debido al menor tiempo de respuesta, facilidad de uso, menor costo y procesa gran cantidad de muestras en menor tiempo.

La titulación potenciométrica es el método tradicional para medir el TBN; sin embargo, la técnica FTIR es una opción rápida, económica y no destructiva. Para medir mediante la técnica FTIR es necesario realizar una calibración adecuada.

En el presente trabajo se propone implementar un método alternativo para medir el TBN empleando la técnica F-TIR, con el propósito de monitorear la capacidad del aceite para neutralizar los ácidos y prevenir la corrosión en el motor. La característica de esta técnica a implementar es que sea rápido, de bajo costo y que genere menos contaminantes que los métodos tradicionales.

I.2.1. Formulación del problema

Problema General

¿Cómo validar y aplicar la espectroscopia infrarroja para medir el Número Básico en aceites lubricantes, con el fin de evaluar su capacidad para neutralizar ácidos y prevenir la corrosión en los motores?

Problemas Específico

¿Cómo comparar la consistencia de los resultados obtenidos mediante los métodos tradicionales y la espectroscopia infrarroja para medir el número básico?

¿Cómo realizar una evaluación económica que compare la precisión, eficiencia y costos de los métodos tradicionales y la espectroscopia infrarroja para medir el número básico en aceites lubricantes?

I.3. OBJETIVOS

I.3.1. Objetivo general

Aplicar y validar una metodología basada en espectroscopia infrarroja para medir el Número Básico en aceites lubricantes, utilizando como referencia el método estándar ASTM D2896, con el fin de evaluar su capacidad para neutralizar ácidos y prevenir la corrosión en los motores.

I.3.2. Objetivos específicos

Comparar la consistencia de los resultados obtenidos mediante el método estándar ASTM D2896 y la espectroscopia infrarroja para medir el número básico en aceites lubricantes.

Realizar una evaluación económica comparativa del método estándar ASTM D2896 y la espectroscopia infrarroja para medir el número básico, considerando los costos, la precisión y la eficiencia.

I.4. JUSTIFICACION

El análisis de la degradación de los aceites lubricantes toma bastante importancia sobre todo en la industria minera, marítima y en los últimos años también se le ha tomado importancia en el transporte urbano. Los programas de mantenimiento predictivo tienen influencia sobre los costos de mantenimiento. Esta herramienta ayuda a monitorear el estado del aceite lubricante y aplicar medidas correctivas de ser necesario.

La técnica de FT-IR presenta ventajas debido al menor tiempo de análisis, no requiere solventes, emplea poca cantidad de muestra y permite conocer otros parámetros del aceite como la oxidación, nitración y sulfatación

Por lo anteriormente mencionado, la presente investigación es importante basado en las siguientes dimensiones:

Económico

La técnica de espectroscopia infrarroja no emplea solventes orgánicos como las otras técnicas ASTM, por lo que el costo de este ensayo se ve reducido ampliamente. Por ejemplo, para el análisis del TBN por el método de titulación potenciométrica ASTM 2896 se requiere hasta 120 ml de solventes orgánicos (Clorobenceno y ácido acético) y el tiempo de lectura es aproximado 8 minutos.

Por otro lado, el análisis del TBN por el método F-TIR solo requiere solvente para el lavado del equipo y procesa más muestras en menor tiempo.

II. REVISION DE LITERATURA

II.1. MARCO TEORICO

II.1.1. LUBRICANTES

Álvarez, A. (1998) describe como lubricante cualquier material, ya sea sólido, líquido o gaseoso, que puede reducir la fricción entre dos superficies, creando una película entre los componentes para evitar el contacto.

Por otro lado, Santos, E. (1992) afirma que el uso de lubricantes es fundamental en las maquinas, debido a que las piezas del equipo sin la lubricación adecuada presentan un desgaste y en un tiempo corto el equipo queda inoperativo. Con la llegada de la revolución industrial, la lubricación siguió siendo empírica. Los lubricantes utilizados en ese momento eran sencillos, de origen vegetal, animal o mineral. Pero con el avance de la tecnología, aumentaron las exigencias sobre las propiedades de los lubricantes, permitiendo nuevas técnicas y formulaciones en su producción. En ese sentido el petróleo ha sido fundamental en la producción de lubricantes a gran escala, ya que en la actualidad la mayor parte de los lubricantes provienen de la refinación del petróleo.

II.1.2. COMPOSICIÓN DE LOS ACEITES LUBRICANTES.

En líneas generales, los aceites lubricantes se componen de un aceite base (70%-90%) y un paquete de aditivos (30%-10%) que proporciona o potencia propiedades al aceite base.

II.1.2.1. Aceite base

Según el instituto Antofagasta minerals, el aceite base es principal componente del aceite, le confiere la viscosidad y otras características fisicoquímicas como el índice de viscosidad, antioxidante, degradabilidad, etc. Mientras los aditivos cumplan su función, la base lubricante no se degradará si no está contaminada. Sin embargo, una vez agotada,

la base lubricante comienza a degradarse, iniciándose el proceso de oxidación del aceite, donde se generan lacas, barnices y sustancias ácidas, provocando que el aceite se vuelva ácido y sea imprescindible su reposición. La base lubricante puede ser de origen petrolífero o mineral, sintético y vegetal.

Los aceites base se obtienen de la refinación del petróleo y su origen puede ser parafínico, nafténico o aromático.

En el siguiente cuadro se observa la clasificación de los aceites base de acuerdo con sus propiedades. El empleo entre una base y otra dependerá de las especificaciones de los equipos.

Ilustración 2 Clasificación del aceite base

Categorías de Aceite Básico API						
	Categoría	Proceso	Azufre (%)		Moléculas Saturadas (%)	Índice de Viscosidad
Mineral	Grupo I	Refinado con Solventes	>0.03	y/o	<90	80 a 120
	Grupo II	Hidrotratado	<0.03	y	>90	80 a 120
	Grupo III	Hidrotratado	<0.03	y	>90	>120
Sintético	Grupo IV	PAO - Polialfaolefina				
	Grupo V	Todos los aceites básicos no incluidos en grupos I, II, III, o IV				

www.widman.biz

Fuente: *Widman International SRL. (s. f.).*

Los aceites base de origen mineral se extraen del petróleo crudo y su origen puede ser nafténico o parafínico. Por otro lado, los aceites base sintéticos se obtienen a partir de complejos procesos de refinación de aceites vegetales y/o petróleo. Las bases sintéticas pueden ser polialfaolefina, ésteres, glicoles,

II.1.2.2. Aditivos

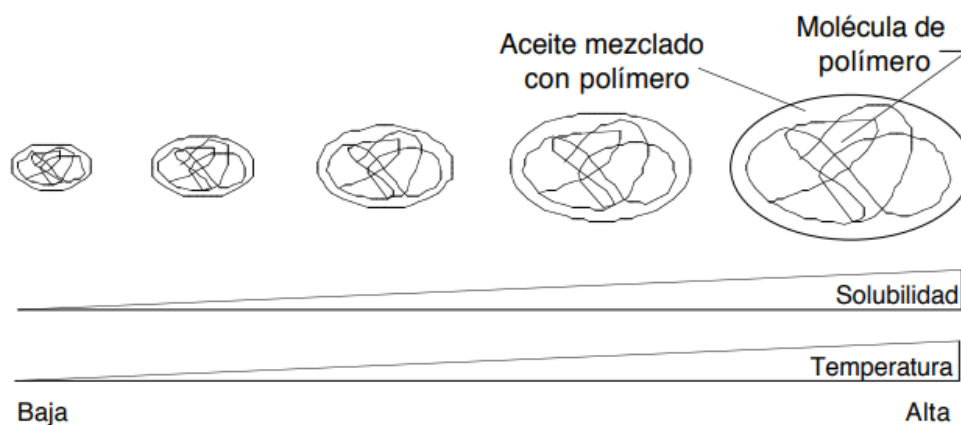
La principal función de los aditivos es mejorar las propiedades fisicoquímicas del aceite base. La concentración de aditivos dependerá del tipo de aceite (motor, industrial, etc.).

En general la concentración es de 10-30%.

A continuación se detallan algunos aditivos.

- **Antioxidantes.** Previenen el envejecimiento prematuro del aceite y evitan la formación de ácidos.
- **Anticorrosivos.** Inhibe la acción corrosiva del aceite sobre algunas superficies de determinados metales.
- **Anti-herumbre.** Previene la formación de óxidos.
- **Mejoradores del índice de viscosidad.** Incrementan la resistencia de la viscosidad a los cambios de temperatura. Estos aditivos pueden regular las variaciones de viscosidad debido a las variaciones de temperatura. Por lo general, se trata de polímeros de alto peso molecular (50 000-125 000) que mantienen su cadena enrollada a bajas temperaturas y se expanden a medida que aumentan las temperaturas, lo que aumenta la viscosidad del aceite. Los beneficios operativos de un lubricante de alta viscosidad son: menos fricción, menos pérdida de lubricante y menos desgaste. En la siguiente imagen se observa el mecanismo del aditivo ante la variación de la temperatura.

Ilustración 3 Mecanismo de acción del Polímero mejorador del Índice de viscosidad



Fuente: *Goncalvez, J (2016)*

- **Detergente.** Los aditivos detergentes evitan la aglomeración de partículas y obstrucción de los filtros. Los aditivos detergentes también neutralizan los ácidos formados por la oxidación o combustión del aceite. Los detergentes se componen de un metal (Al, Ba, Zn y Ca) y un componente aniónico (Sulfonatos, Salicatos, fenatos y carboxilatos)

II.1.3. FUNCIONES DE LOS LUBRICANTES

Martos, J. (2020) afirma que el lubricante cumple muchas funciones dentro de los equipos; sin embargo, las principales son las que se describen a continuación.

Lubricante. Es la principal función del aceite, su función es evitar el desgaste entre dos piezas en contacto. Los diversos componentes como los cojinetes, engranajes, cadenas, motores siempre deben tener un lubricante de por medio mientras estos se encuentran en operación.

- **Refrigerante.** Durante el funcionamiento normal de los equipos, el calor generado por la fricción de las piezas es retirado del sistema por el aceite y la disipa al exterior disminuyendo así el calentamiento. Esta función es muy importante sobre todo en los motores que no tienen un sistema de refrigeración y

la única manera de retirar el calor es a través del aceite. El aceite elimina hasta el 25% del calor total.

- **Sellante.** El lubricante forma una barrera protectora en el equipo y evita que ingresen contaminantes externos como el polvo, el agua, partículas, etc. También sella las zonas donde puedan existir fugas. Un ejemplo de esto son los émbolos de los amortiguadores y la cámara de combustión en los motores de combustión interna.
- **Limpieza.** Durante el funcionamiento normal de los equipos es inevitable la generación de residuos en el interior. Estos residuos pueden ser partículas, lodos, depósitos carbonosos como el hollín, entre otros. Si estos contaminantes se acumulan dentro del equipo provocará la obstrucción o sedimentación en las partes críticas del equipo. Los lubricantes contienen aditivos detergentes y dispersantes que capturan las partículas manteniéndolas dispersas y evitando que formen cúmulos. Esta propiedad junto con un sistema de filtración de partículas facilita la limpieza del equipo manteniéndolo en óptimas condiciones por más tiempo.
- **Anticorrosivo y antidesgaste.** Durante la combustión en los motores o por efecto del agua del ambiente, en el interior de los equipos se forman sustancias ácidas que corroen el equipo. Los lubricantes modernos contienen aditivos diseñados para neutralizar estos ácidos y evitar la corrosión y herrumbre en el interior de los equipos.

II.1.4. CLASIFICACIÓN DE LOS ACEITES LUBRICANTES.

Los aceites lubricantes se clasifican de diferentes maneras según su origen, uso, propiedades químicas y viscosidad. A continuación se detallan las clasificaciones más importantes:

Tabla 1 Clasificación de los aceites lubricantes

Por su origen	•Minerales •Sintéticos •Semisintéticos
Por su aplicación	•Automotriz •Industrial •Marino
Por su grado de viscosidad	•Clasificación SAE e ISO •SAE J300 para motores •SAE J306 para engranajes
Por su grado de desempeño	•Clasificación API •Para motores de gasolina, API SN •Para motores API CJ-4

Fuente: Elaboración propia

La viscosidad se refiere a la resistencia de un fluido a fluir y se mide en unidades SAE y se presenta en el formato "XW-XX". La primera parte antes de la "W" (significa invierno) indica la viscosidad del aceite a bajas temperaturas, mientras que la segunda parte después de la "W" indica la viscosidad a altas temperaturas.

Por ejemplo, si un lubricante tiene clasificación SAE 5W-30, esto significa que tiene una viscosidad baja en climas fríos, lo que hace que el motor arranque más fácilmente en

invierno (SAE 5), y una viscosidad más alta en temperaturas normales de funcionamiento (SAE 30).

II.1.5 PROPIEDADES DE LOS LUBRICANTES

Los aceites lubricantes presentan distintos tipos de propiedades fisicoquímicas. Estas propiedades permiten seleccionar el lubricante adecuado para los distintos tipos de máquinas y condiciones de operación. A continuación se describen las propiedades más importantes de los aceites lubricantes.

- **Viscosidad.** Es la propiedad más importante en el ámbito de los lubricantes. La mayor parte de los sistemas de clasificación se basan en esta propiedad. La viscosidad se define como la resistencia a fluir del líquido y está en función de la fricción interna de sus moléculas. Los aceites muy viscosos consumen más energía en una máquina a diferencia de un aceite menos viscoso que tiene facilidad de movimiento pero se corre el riesgo de provocar desgaste al formarse una película insuficiente entre las piezas. La viscosidad del lubricante depende directamente de la temperatura a la que se encuentra. Por ejemplo, los aceites delgados tienen menor viscosidad y son más fáciles de mover a bajas temperaturas, mientras que los aceites espesos son óptimos para mantener la presión del aceite a altas temperaturas.
- **Índice de viscosidad.** El índice de viscosidad se utiliza para medir el cambio en la viscosidad de un aceite a medida que aumenta la temperatura. Cuanto mayor sea el índice de viscosidad, más estable será la viscosidad del aceite.
- **Punto de inflamación.** El punto de inflamación es la mínima temperatura a la cual los vapores emitidos por el aceite se inflaman en presencia de una flama. Esta

propiedad está en función de la composición del aceite, principalmente de los componentes más volátiles.

- **Punto de congelación.** Es la mínima temperatura en la cual el aceite deja de fluir. Normalmente el aceite es una sustancia líquida, pero a medida que baja la temperatura, la viscosidad del aceite aumenta y hasta alcanzar un estado "sólido". La principal causa de cristalización en un aceite de parafina es la cristalización de componentes parafínicos.
- **Número total ácido (TAN).** El TAN cuantifica el agotamiento de los aditivos y la pérdida de la reserva alcalina. La acidez en el aceite puede ser por la presencia de ácidos orgánicos provenientes de su refinación o por los ácidos originados por la oxidación y agotamiento de los aditivos.

Dado que el aceite está expuesto a altas temperaturas y estrés mecánico, se produce una descomposición y oxidación gradual de su composición. Esto conduce a la formación de lodos y depósitos de carbón, lo que disminuye la viscosidad y descompone los componentes metálicos. Por tanto, es importante medir este parámetro para determinar el grado de protección del aceite. La oxidación de los hidrocarburos en los lubricantes crea productos como cetoácidos corrosivos.

II.1.6. DEGRADACIÓN DE ACEITES LUBRICANTES.

Arteaga, et al. (2018) afirma que el tiempo de vida útil del lubricante es muy importante debido a que influye en la vida útil del motor. Por esta razón, al completar su ciclo el aceite pierde sus propiedades físicas y químicas y la capacidad de proteger al motor.

Gómez (2013) El proceso de degradación implica la pérdida de la capacidad del aceite para realizar sus funciones esenciales como lubricación, refrigeración, limpieza,

protección y sellado. La tasa de degradación del aceite lubricante está influenciada, entre otras cosas, por la oxidación, la nitración, la temperatura, la contaminación, las altas tasas de cizallamiento, los ambientes corrosivos y la pérdida de paquetes de aditivos.

II.1.6.1. Oxidación del aceite

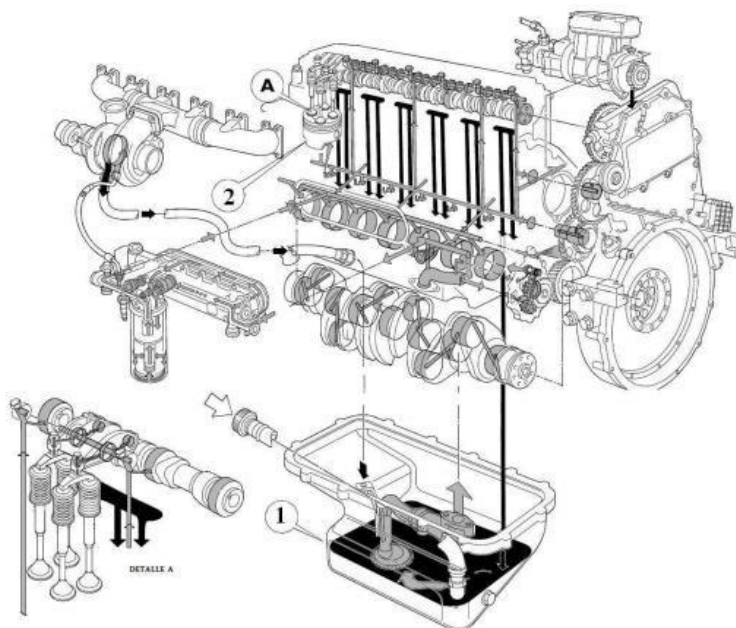
Cabrera & Carrera, (2017) definen la oxidación como un proceso de degradación química que afecta a la mayoría de los elementos orgánicos. Se basa esencialmente en la absorción de átomos de oxígeno por los componentes del lubricante, lo que conduce a su degradación y a la progresiva disminución de las propiedades y beneficios del aceite. Este proceso se ve potenciado por factores como el calor, la luz, el agua y la presencia de contaminantes. La oxidación genera productos ácidos como los óxidos e hidroperóxidos que atacan a los metales del motor e inducen a la formación de lodos, barnices y lacas en general.

Las reacciones de oxidación y reducción, también conocidas como reacciones redox, conducen a la descomposición oxidativa del aceite lubricante. Las reacciones redox son esencialmente reacciones de transferencia de electrones que ocurren entre varios elementos químicos, siendo uno oxidante y el otro reductor. Para que se produzca una reacción en un medio se requiere de un elemento que pueda donar electrones y otro que pueda aceptarlos. Además, se requieren otros factores que puedan acelerar la reacción, como la temperatura de reacción.

En el motor de combustión el oxígeno es el agente oxidante, que junto a las altas temperaturas que llega a alcanzar el motor se dan las condiciones para las reacciones de oxidación. En la siguiente figura se observa el cárter del motor, donde existe una gran cantidad de oxígeno y donde se lleva a cabo la oxidación denominada “Bulk oxidation”. Por otro lado, en la cámara de combustión se alcanzan temperaturas de hasta 300°C, en

esta zona se dan las condiciones para la oxidación del aceite conocida como “thin film oxidation”. Estos dos tipos de oxidación se dan en los aceites de motor, lo que resulta en la formación de ácidos.

Ilustración 4 Zonas de oxidación del aceite



1. Bulk Oxidation; 2. Thin Film Oxidation

Fuente: Gómez, Y (2013)

II.1.6.2 Causas del proceso de oxidación

La temperatura junto con la presencia de oxígeno son los principales factores que promueven la oxidación del aceite en el motor.

Wooton (2007) señala que la velocidad de la reacción se llega a cuadruplicar por cada 10°C de incremento de temperatura. Cuando el aceite se oxida las cadenas de hidrocarburos reaccionan con el oxígeno y se forman sustancias acidas como aldehídos y cetonas en mayor proporción y esteres en menor cantidad.

Los contaminantes externos como el agua pueden actuar como catalizadores en la reacción de oxidación. Más específicamente, el agua tiene la capacidad de disolver

aditivos antidesgaste (como el disulfuro de molibdeno) y producir ácido sulfúrico y ácido hidrosulfónico. En los vehículos con motor de combustión interna, el agua puede reaccionar con los gases de escape y producir ácidos.

Otras sustancias que aceleran la oxidación del aceite son algunos metales que funcionan como catalizadores, como por ejemplo el Cobre y algunos compuestos ferrosos procedente del desgaste del motor.

II.1.6.3. Consecuencias de la oxidación del aceite

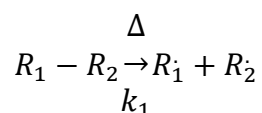
La oxidación del aceite provoca.

- **Acidez**, debido a los productos formados durante la oxidación. Estos ácidos atacan a las superficies metálicas, lo que provoca mayor desgaste del motor. El aumento de la acidez provoca una caída del TBN, que generalmente es cuantificado por el método ASTM D2896.
- **Viscosidad**. La oxidación del aceite provoca que la viscosidad se incremente. Pudiendo llegar a ser hasta el doble o triple del aceite original.
- Formación de los depósitos carbonosos, lodos y barnices en etapas avanzadas de la oxidación. Estos compuestos obstruyen las válvulas, los circuitos y los filtros del motor y finalmente provocan el mal funcionamiento del equipo.
- Color del aceite, se produce un oscurecimiento gradual a medida que avanza la oxidación del lubricante

II.1.6.4. Mecanismos de la reacción de oxidación

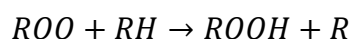
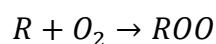
Bilotti, (2016) describe la oxidación en una secuencia de 4 etapas que se detallan a continuación.

1. **Formación de radicales libres.** La oxidación inicia con una fuente de energía que puede ser el calor o la luz. Esta etapa se acelera con la presencia de algunos metales que actúan como catalizadores, afectando principalmente a moléculas insaturadas o aromáticas. Esta etapa se puede representar con la siguiente reacción química.

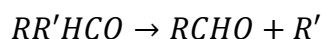
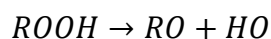


Las moléculas insaturadas (con enlaces dobles o triples entre átomos de carbono) y las moléculas aromáticas (como el benceno y sus derivados) son más reactivas que las moléculas saturadas. Esto ocurre porque los enlaces múltiples en las moléculas insaturadas y la estructura cíclica conjugada de las moléculas aromáticas pueden proporcionar sitios de reacción extra o tener mayor afinidad para ciertas reacciones químicas, lo que las hace menos estable en ciertos contextos.

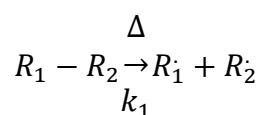
2. **Propagación en cadena.** En esta etapa está involucrada la presencia de oxígeno. Los átomos de carbono muy reactivos (Radicales alquil) reaccionan con el oxígeno y producen radicales alquil peroxi, iniciando una reacción en cadena hasta que el oxígeno se agote.



3. **Ramificación de la cadena.** En esta etapa se forman diversos productos como los aldehídos y las cetonas mediante la polimerización de las moléculas, haciendo que aumente gradualmente la viscosidad del aceite y en una etapa avanzada se formen depósitos de lodos y barnices.



4. **Terminación de la cadena.** Finalmente el proceso termina cuando se juntan dos radicales libres para formar una molécula estable. Esta etapa finaliza debido a que los radicales activos se consumen y no quedan más para nuevas reacciones. Este punto normalmente las moléculas son más ácidas, más viscosas y menos estables que las originales, por lo que disminuyen sus propiedades originales.



II.1.7. FORMACIÓN DE ÁCIDOS EN ACEITES LUBRICANTES

Como ya se explicó anteriormente, los ácidos se forman por la oxidación y contaminación externa durante el funcionamiento del lubricante; sin embargo, existen otras fuentes para la formación de ácidos en los aceites que Fox, (2013) detallan a continuación.

II.1.7.1. Oxidación del aceite

El contacto del aceite con el oxígeno en condiciones de altas presiones y temperaturas, son ambientes propicios para las reacciones de oxidación. Estas generan ácidos orgánicos como los ácidos carboxílicos, lodos, entre otros. Con el tiempo estos se acumulan en el lubricante llegando a afectar las propiedades originales del aceite.

II.1.7.2. Contaminación por gases de combustión

En el proceso de combustión, algunos gases se filtran hacia el cárter y se mezcla con el lubricante. Estos gases contienen sustancias ácidas como óxidos de nitrógeno y dióxido de azufre, que tienen la capacidad de disolverse en el aceite y reaccionar con el agua para

formar ácidos nítricos y sulfurosos. Estos ácidos incrementan la acidez del lubricante y aceleran la degradación del aceite

II.1.7.3. Descomposición de los aditivos

Como se mencionó anteriormente, los aceites contienen aditivos para mejorar las propiedades del lubricante, aditivos como antioxidantes, detergentes y dispersantes cuya función es neutralizar los ácidos y proteger contra la corrosión. Sin embargo, estos aditivos pierden sus propiedades y se descomponen en sustancias acidas durante la vida útil del lubricante y condiciones severas.

Por ejemplo, la degradación de los aditivos detergentes a base calcio y magnesio pueden liberar ácidos contribuyendo a la acidez del aceite.

II.1.7.4. Absorción de agua y formación de ácidos orgánicos

En los sistemas donde el agua puede filtrarse o en condiciones de alta humedad, el aceite puede absorber pequeñas cantidades de agua, lo que facilita la formación de ácidos inorgánicos como el ácido sulfúrico y el ácido nítrico. Estos ácidos son extremadamente corrosivos y llegan a dañar los componentes del motor.

II.1.8. CORROSION EN MOTORES

García, F (2010) menciona que la corrosión se refiere al proceso de descomposición de los metales mediante una reacción electroquímica, es decir Oxidación-reducción, en relación con su entorno.

Es un fenómeno natural e involuntario que afecta principalmente (pero no exclusivamente) a los metales. La velocidad de la reacción depende de la temperatura a la que ocurre y de las propiedades de los elementos involucrados.

La corrosión es un proceso químico que generalmente involucra tres elementos: el objeto corroído, el medio ambiente y generalmente el agua. Sin embargo, también existen compuestos corrosivos, es decir aquellos que pueden provocar corrosión de los materiales con los que entran en contacto directo. La corrosión genera un impacto negativo en la vida útil y rendimiento del motor, debido a que, aumenta el desgaste, reduce la eficiencia y puede llevar a fallos mecánicos prematuros.

II.1.8.1. Tipos de corrosión

II.1.8.1.1. Corrosión Ácida

Jardine, F (1980) explica el proceso de generación de ácidos en los motores de combustión interna son reacciones químicas complejas influenciadas por las propiedades del combustible, el aceite lubricante, las condiciones de funcionamiento del motor y el medio ambiente. Los ácidos producidos en el motor son principalmente el resultado de la combustión de combustibles que contienen azufre y la presencia de agua en el sistema. Esta combinación puede producir ácidos muy agresivos como el ácido sulfúrico, que es particularmente corrosivo para los componentes metálicos del motor.

II.1.8.1.2. Reacción del azufre en el combustible

El azufre está presente en muchos combustibles fósiles como por ejemplo el diésel y algunos tipos de gasolina de baja calidad. al consumirse el combustible en el motor el azufre sufre unas reacciones químicas que se detallan a continuación:

- **Oxidación del azufre.** Cuando se quema el combustible, el azufre reacciona con el oxígeno del ambiente y se transforma en dióxido de azufre (SO_2). Este gas sale junto con los otros gases de escape; sin embargo, una parte del dióxido de azufre se queda dentro del motor.

- **Formación de trióxido de azufre.** El dióxido de azufre que no pudo escapar, en condiciones de alta temperatura y catalizadores metálicos como el óxido de hierro, puede oxidarse aún más y convertirse en trióxido de azufre (SO_3).
- **Formación del ácido sulfúrico.** Cuando el agua ya sea presente en el combustible o el vapor generado en la combustión se mezcla con el trióxido de azufre, estos reaccionan para formar el ácido sulfúrico, un ácido extremadamente corrosivo que ataca principalmente los metales. Estas reacciones pueden llevarse a cabo en la Cámara de combustión del motor, como también en el cárter, donde existe gran cantidad de oxígeno y el aceite se mezcla con los gases de escape que tienen azufre.

II.1.8.1.3. El agua en la formación de ácidos

El agua desarrolla un rol fundamental en la formación de ácidos dentro del motor, funciona para cómo reactivo para formar el ácido sulfúrico y otros ácidos. Existen varias maneras de cómo el agua ingresa al motor, a continuación se detallan algunas de ellas.

- **Condensación de la humedad**

Esto ocurre generalmente en invierno o en ambientes húmedos, cuando el motor se enfría el aire puede condensarse sobre las superficies metálicas internas del motor. El agua condensada reacciona con los gases de combustión para formar ácidos.

- **Agua producto de la combustión.**

En general, la combustión del Combustible genera agua y dióxido de carbono como subproductos naturales. Por cada molécula de hidrocarburo que reacciona, se genera cierta cantidad de agua en forma de vapor. Cuando las altas temperaturas del motor descienden, parte del vapor de agua se condensa principalmente en las

paredes del cilindro y el cárter, donde son los lugares ideales para la formación de ácidos.

- **Agua externa.**

Cuando existe fallas en el sistema de refrigeración, Debido a fugas en la Junta del cabezal. El agua puede ingresar desde el sistema de refrigeración lo que da como resultado que el agua se mezcle con el aceite lubricante generando graves fallas en el motor.

II.1.8.1.4. Formación de otros ácidos

Dependiendo de los aditivos del lubricante y los contaminantes en el combustible, se pueden formar otros ácidos en el motor como por ejemplo:

- **Ácido nítrico (HNO_3)**

en condiciones de altas presiones y temperaturas, el nitrógeno del aire o compuestos de nitrógeno puede reaccionar con el oxígeno para generar óxidos de nitrógeno (NO_x) que se disuelven en el agua y reaccionan hasta formar ácido nítrico, un ácido muy fuerte y corrosivo que ataca a los metales.

- **Ácido carbónico (H_2CO_3)**

El ácido carbónico puede formarse cuando el dióxido de carbono de los gases de combustión se mezcla en el agua. Aunque este ácido es más débil puede llegar a atacar a los metales del motor Y contribuye a la acidez general del medio afectando a la película de aceite de las superficies.

II.1.8.2. Neutralización y prevención de la corrosión ácida

Los lubricantes están diseñados para neutralizar la acidez generada dentro del motor. Los lubricantes modernos contienen aditivos alcalinos que neutralizan los ácidos y es un indicador para medir su efectividad contra la corrosión ácida.

- **Aditivos alcalinos**

Son principalmente los detergentes a bases de magnesio o calcio, estos reaccionan con los ácidos formados en el motor neutralizándolos y evitando que ataquen las superficies metálicas. Estos aditivos son muy importantes cuando se utilizan combustibles con mayor cantidad de azufre y se generan más ácidos como por ejemplo el diésel.

- **Límite del número básico**

Durante la vida útil del aceite, los aditivos van reaccionando con los ácidos y el número básico disminuye. Por lo tanto es importante monitorear Y de ser necesario cambiar el aceite cuándo el número básico decae demasiado, ya que ha perdido su capacidad para neutralizar los ácidos dejando expuesto al motor frente al ataque de los ácidos.

II.1.8.3. Factores que contribuyen a la formación de ácidos

La velocidad de síntesis de ácidos en el motor no se da al mismo ritmo en todas las condiciones, existen factores que aumentan la formación de ácidos:

- **Combustibles de baja calidad**

Es el principal factor en la formación de ácidos en el motor. Aunque ahora existen normas para reducir el contenido de azufre en el combustible, aún existen lugares dónde se encuentra combustibles con alta concentración de azufre.

- **Condiciones ambientales húmedas y frías**

El agua tiende a condensarse en las paredes del motor y el cárter. Esto genera un ambiente propicio para la síntesis de ácidos, Principalmente en los primeros

minutos del funcionamiento del motor, ya que el aceite no alcanza la temperatura ideal para evaporar el agua.

- **Arranques en fríos y trayectos cortos**

Los funcionamientos cortos del motor no permiten que el agua se evapore completamente, facilitando así la acumulación de agua.

- **Aceites inadecuados**

Los aditivos con bajo número básico o escasos aditivos detergentes, no tienen la capacidad para neutralizar los ácidos.

II.1.8.4. Consecuencias de la corrosión

Jardine, F (1980) explica los efectos de la corrosión ácida en los motores de combustión, principalmente aquellos que funcionan con combustibles de baja calidad o en condiciones ambientales extremas. A continuación se detallan algunos de los efectos de la corrosión ácida sobre los distintos componentes del motor.

Daños en las paredes de los cilindros

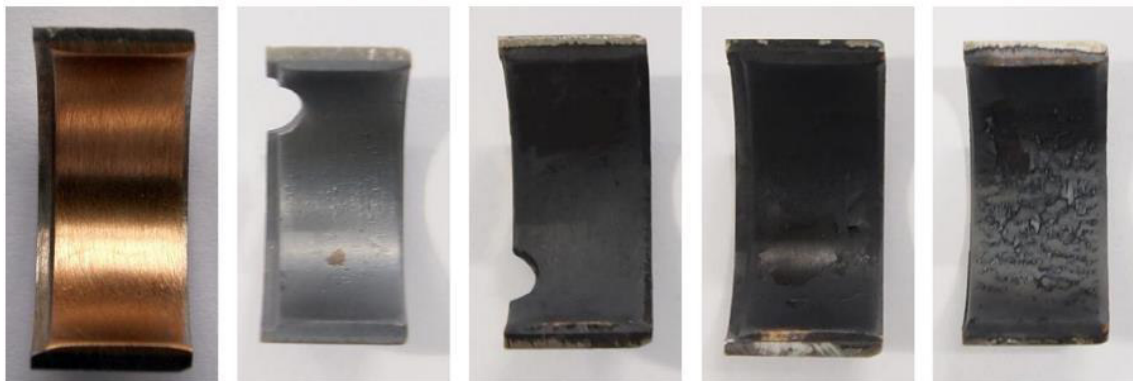
La corrosión afecta a las paredes de los cilindros donde se produce la combustión del combustible. El ácido sulfúrico ataca a las superficies metálicas de los cilindros, produciendo un desgaste irregular. La corrosión se presenta en forma de rugosidades y pequeñas grietas en la superficie del cilindro, afectando la estructura y disminuyendo la eficacia del sellado entre el cilindro y el pistón. Estos efectos son más graves en ambientes húmedos y fríos, donde el agua se condensa en las paredes del cilindro antes del que el motor llegue a su temperatura normal de funcionamiento.

Por otro lado, la corrosión ácida debilita la película de aceite entre las paredes de los cilindros y estos quedan expuestos al contacto directo con los pistones y otros

contaminantes. A la larga, el motor pierde eficiencia por la disminución de la compresión y combustión incompleta.

En la siguiente figura se observan las fotografías de los cojinetes Mostrando los efectos de la corrosión por el ácido, después de 240 horas de experimentos. La primera imagen se muestra el aspecto al principio sin ningún efecto de corrosión o daño visible. Mientras que la última imagen se observan manchas de corrosión más visibles principalmente en los bordes. Estas manchas indican un ataque corrosivo lo cual se le atribuye al ácido.

Ilustración 5 Impacto de la corrosión ácida en el motor



Fuente: Beser, et.al 2014. *Impact of engine oil degradation on wear and corrosion caused by acetic acid evaluated by chassis dynamometer bench tests*

Corrosión en los pistones y anillos

Los anillos y pistones son muy sensibles a la corrosión ácida. La presencia de ácido en el motor junto con la pérdida de la capacidad de proteger del lubricante expone al ataque corrosivo a los anillos y pistones, generando desgaste, fallas en el sellado y en casos extremos agotamiento de los anillos.

Los anillos del pistón en mal estado no tienen la capacidad para mantener una buena compresión en el motor. A medida que el sellado se debilita, los gases se escapan hacia el cárter; este fenómeno es conocido como “blow by”. Este fenómeno disminuye la eficiencia del motor, además, facilita que otros contaminantes lleguen al aceite,

incrementando aún más la corrosión y acelerando el desgaste de los otros componentes del motor.

Daños en el cárter y componentes internos

Los ácidos y el agua pueden acumularse en el cárter del motor, más aún en condiciones ambientales de frío y humedad. El ácido sulfúrico al entrar en contacto con las paredes del cárter causa una corrosión intensa, y da como resultado la formación de óxidos en el cárter y otros componentes internos, como los cojinetes o cigüeñal.

La corrosión del cárter afecta su integridad estructural y otros componentes internos como las válvulas, los resortes y las cadenas de distribución.

Corrosión en los cojinetes y ejes

La presencia de un ambiente ácido en los cojinetes provoca la corrosión y desgaste y da como resultado una mayor fricción y un funcionamiento menos eficiente.

El motor es muy vulnerable cuando arranque en frío, debido a que el lubricante tarda en distribuirse adecuadamente por todo el sistema. Esto deja por unos momentos a los ejes y cojinetes desprotegidos durante el arranque y entra en contacto directo con el ácido, lo que puede generar una corrupción significativa en poco tiempo. Hoy si no se controla los cojinetes terminarán dañándose ya que es irreversible y puede provocar daños irreversibles en el motor.

Deterioro del sistema de válvulas

Las válvulas de admisión también son susceptibles al ataque del ácido, así como también los asientos de las válvulas. La corrosión genera un desgaste que afecta al sellado de las válvulas y afecta la compresión y el flujo de los gases de combustión.

Una válvula corrida pierde la capacidad de sellado hermético y deja que los gases de combustión escapen y disminuye la eficiencia del motor. Además, se pueden formar depósitos en las válvulas e interferir con el movimiento de las válvulas y provocar un mayor desgaste.

Problemas en el sistema de lubricación

La corrosión también afecta al sistema de lubricación debido a que los ácidos disuelven los aditivos del aceite y reducen sus propiedades de protección y lubricación. Estos efectos son más graves aun cuando los ácidos atacan los filtros y llegan a obstruir o deteriorar. Esto hace que la circulación del aceite en el sistema sea más lenta principalmente en condiciones de baja temperatura. Este problema es más grave aún en sistemas de lubricación a presión.

Efecto abrasivo de la corrosión ácida

La corrosión ácida no solo deteriora químicamente los componentes, sino que también tienen efecto abrasivo. Por ejemplo, los óxidos desprendidos de las paredes del metal actúan como abrasivos al estar en contacto metal con metal. Esto genera ralladuras y daños superficiales en los pistones y cilindros y otras partes móviles del motor.

Consecuencias económicas y de mantenimiento

Todos los efectos vistos anteriormente, tiene un costo de mantenimiento y operación de los motores. Si no se detectan los problemas a tiempo se reduce la vida útil del aceite y la frecuencia de cambios de aceite aumenta. La corrosión ácida aumenta los costos de mantenimiento y operación y reduce la eficiencia del motor.

II.1.9. NUMERO BÁSICO

Actualmente los lubricantes modernos están diseñados para trabajar a distintas condiciones de funcionamiento brindando una adecuada lubricación y protección del motor. Estas propiedades se añaden mediante aditivos alcalinos como los detergentes y dispersantes.

El número básico del lubricante mide la capacidad del aceite para neutralizar los ácidos que se forman durante la combustión, principalmente provenientes del azufre del combustible.

El número básico es también conocido como alcalinidad del aceite, y la definición exacta es la cantidad de ácido que se requiere para neutralizar todos los compuestos alcalinos en 1 g de muestra de aceite. Por ejemplo, un número básico de 30 significa que se requiere una cantidad de ácido equivalente a 30 miligramos de hidróxido de potasio para neutralizar los componentes alcalinos de 1 g de muestra de aceite.

II.1.9.1. Importancia del número básico en los aceites lubricantes

Como ya se explicó anteriormente, el número básico es una propiedad que mide la capacidad de neutralizar los ácidos generados durante la combustión u otros procesos químicos. Si estos ácidos no se neutralizan llegan a correr las superficies metálicas del motor causando graves daños a largo plazo.

Noria (2024) afirma que los lubricantes de motor generalmente tienen entre 7 y 12 de número básico y una vez que el número básico cae por debajo del 50% de su valor inicial; este pierde la capacidad de proteger al motor frente al ataque de los ácidos, por lo que requiere su cambio

- **Protección contra la corrosión.**

Un número de básico alto significa que el aceite tiene una mayor capacidad para neutralizar los ácidos; sin embargo, eso también implica que exista una mayor cantidad de cenizas sulfatadas. Por lo que debe haber un equilibrio entre estas dos propiedades.

- **Extensión de la vida útil del aceite.**

Un lubricante con el adecuado número básico es capaz de mantener sus propiedades durante su vida útil. Por lo tanto, los intervalos de cambio del aceite serán más largos sin comprometer al motor

- **Mayor rendimiento del motor**

Los ácidos llegan a formar depósitos en el motor, por lo que un adecuado lubricante evitará que se formen estos depósitos y asegura el funcionamiento eficiente del motor.

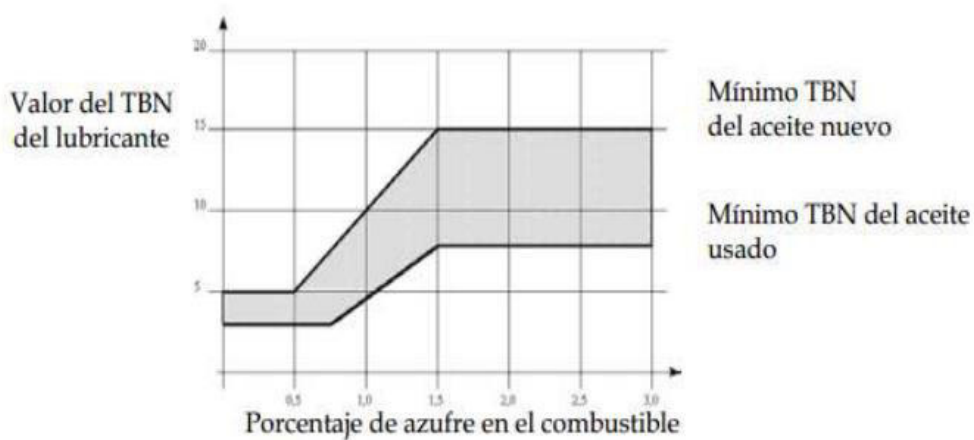
- **Eficiencia en el control de los depósitos**

El número básico adecuado en el lubricante previene la generación de lodos y depósitos que puedan llegar a acumularse en el motor y obstruir el sistema de lubricación, lo que afecta el rendimiento del motor

II.1.9.2. Evolución del número básico en aceites usados

Para elegir el lubricante con el número básico adecuado, el tipo de combustible es el principal factor para considerar. Ya que de este depende el contenido de azufre en el combustible, tal como se muestra en la siguiente imagen.

Ilustración 6 Número básico del lubricante según el contenido de azufre en el combustible



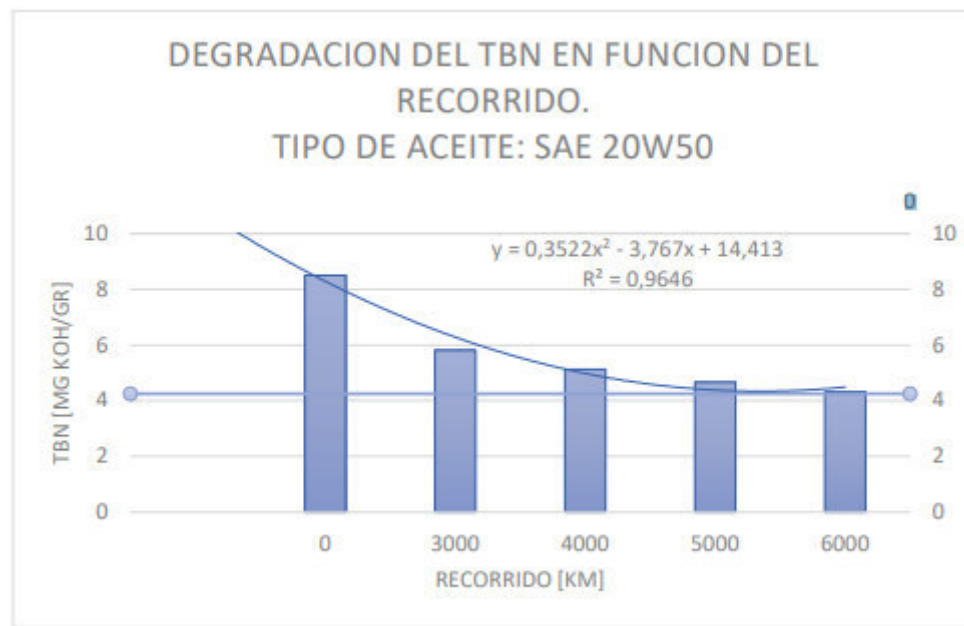
Fuente: Mideros, A. (2013). *Diseño De Un Laboratorio De Análisis De Aceites Lubricantes En La Espol Para Sustentar Programas De Mantenimiento Predictivo*.

El número básico de lubricante se reduce durante su vida útil por diversos factores como:

- Reacción con los ácidos formados en la combustión.
- Contacto con combustible
- Contacto con el agua
- Degradación térmica, etc.

En el trabajo desarrollado por Cabrera & Carrera (2017), evaluaron las tendencias del número básico durante la vida útil del lubricante como se observa en el siguiente gráfico. Después de los 5000 km de recorrido el número básico del lubricante disminuyó al 50% de su valor inicial y por lo tanto ha perdido la capacidad de neutralizar los ácidos.

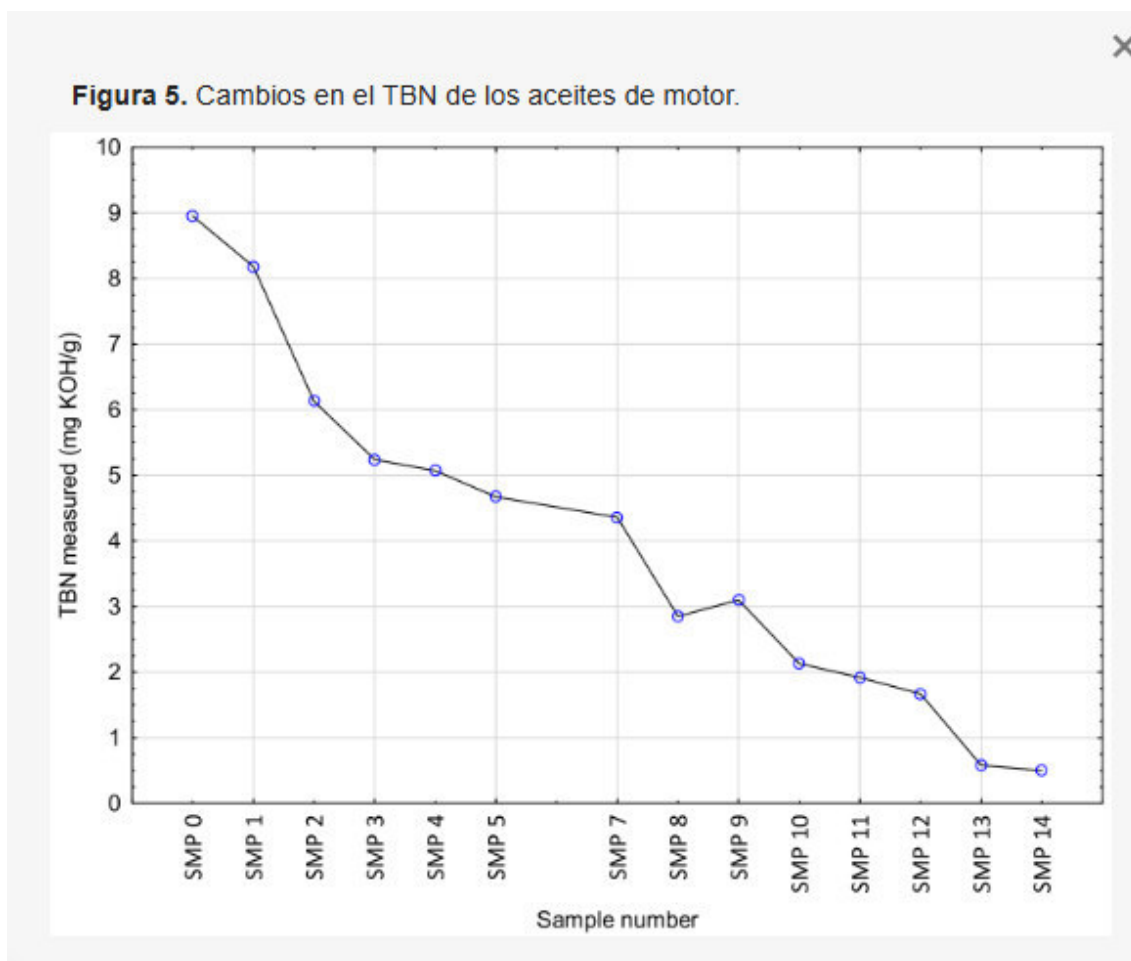
Ilustración 7 Evolución del número básico durante la vida útil del lubricante



Fuente: Cabrera & Carrera (2017) *Análisis De La Degradación Del Aceite De Motor En Taxis De La Ciudad De Cuenca, Por Disolución De Combustible, Sus Causas Y Soluciones.*

En el trabajo realizado por Wolak, A. et, al. (2022) evaluaron la evolución del número básico del aceite de motor y observaron que tuvo una tendencia lineal, como se muestra en la siguiente figura.

Ilustración 8 Tendencia del número básico durante la vida útil del lubricante



Fuente: Wolak, A. et, al. (2022). *Predicción Del Número De Base Total (TBN) Del Aceite De Motor Mediante Espectroscopia FTIR*

En el gráfico se observó una caída rápida de la reserva alcalina. El valor inicial del número básico fue de 8.18 mgKOH/g y el final de la prueba la reserva alcalina estaba en 0.5 mgKOH/g. La pérdida de la reserva alcalina está relacionada con el consumo de los aditivos durante la vida útil del lubricante

II.1.9.3. Valores típicos del número básico para diferentes aplicaciones

A continuación se muestran algunos de los valores típicos para el número básico de un aceite lubricante nuevo según la aplicación.

Tabla 2 Valores típicos de número básico según aplicación

Aplicación	Número básico	Comentarios
Motores de combustión interna (Autos, camiones)	5-12	Los motes Diesel requieren un TBN más alto que los motores a gasolina
Motores marinos	15-70	Motores que utilizan un alto contenido de azufre requieren un TBN más alto.
Aceites para turbinas	0.5-3	Valores más bajos ya que tienen menor exposición a la combustión y/o formación de ácidos
Aceites para compresores	1-5	Depende del tipo de compresor y condiciones de aplicación
Aceites industriales y maquinaria pesada	8-15	Depende del tipo de maquinaria y condiciones de operación
Motores a gas	3-6	El numero básico es bajo debido a menor contenido de azufre en el combustible, a diferencia del diésel

Fuente: *Elaboración propia*

II.1.10. ESPECTROSCOPIA

La espectroscopia es el estudio de la radiación electromagnética y su interacción con la materia, a través de la absorción o emisión de la energía en forma de radiación. Hoy esta técnica analítica instrumental es bastante utilizada para determinar la composición cualitativa y cuantitativa de una muestra. En resumen, consiste en excitar a la materia aplicándole energía (calor, luz, eléctrica, etc.) para producir una transición a un estado de mayor energía, es así que se emite radiación electromagnética al regresar a su estado basal. Esta radiación se puede cuantificar y relacionar a la composición de la muestra. La radiación emitida aporta información sobre la composición de la muestra.

El proceso de absorción de la energía está determinado por la ley de Beer-Lambert. Dicha ley permite cuantificar la concentración del analito en una muestra. La luz atraviesa el medio y su atenuación es proporcional a la concentración del analito en la muestra. Según la ley de beer la absorbancia es directamente proporcional a la concentración (c) del analito y la distancia (b) de la trayectoria del medio de absorción.

$$A = a \cdot b \cdot c$$

Dónde:

$A = \text{absorbancia}$

a : Constante, absorptividad

$b = \text{longitud de la celda}$

c : Concentración

La constante se llama absorptividad molar cuando la concentración se expresa en mol por litro.

$$A = \varepsilon \cdot b \cdot c$$

Dónde:

ε : Absorptividad molar

La transmitancia es la relación entre la intensidad de la radiación incidente sobre la muestra y la intensidad que atraviesa el medio y logra pasar. Es decir, la intensidad de la radiación disminuye de P_0 a P .

$$T = \frac{P}{P_0}$$

La absorbancia está relacionada con la transmitancia por medio de la siguiente ecuación:

$$A = \text{Log} \left(\frac{P_0}{P} \right) = \text{Log} \left(\frac{P_{\text{solvente}}}{P_{\text{solución}}} \right)$$

Donde:

$P_0 = \text{Energía que ingresa a la muestra}$

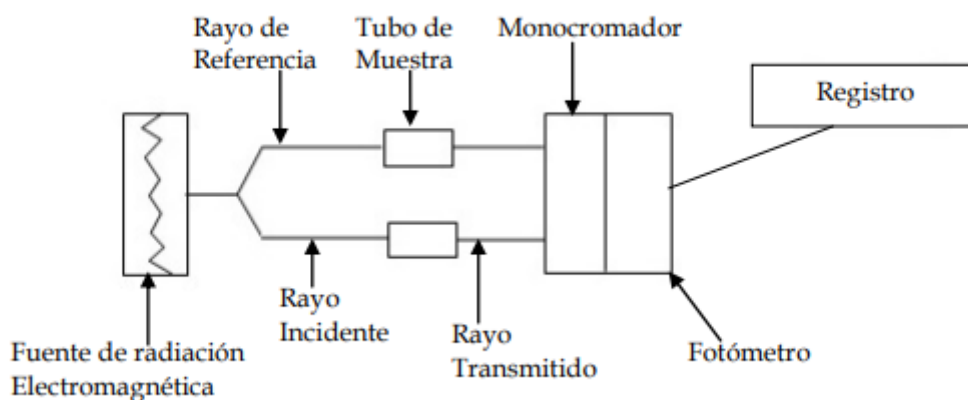
$P = \text{Energía que sale de la muestra}$

II.1.10.1. Espectroscopia infrarroja

La espectroscopia en la región infrarroja permite conocer los compuestos orgánicos e inorgánicos en una muestra, excepto compuestos mononucleares.

El principio de funcionamiento de la espectroscopia infrarroja son las frecuencias de vibración específicas de los enlaces químicos de las moléculas. Estas frecuencias son una respuesta a la energía de la molécula, geometría molecular, masa atómica, entre otros.

Ilustración 9 Esquema de funcionamiento del espectrofotómetro



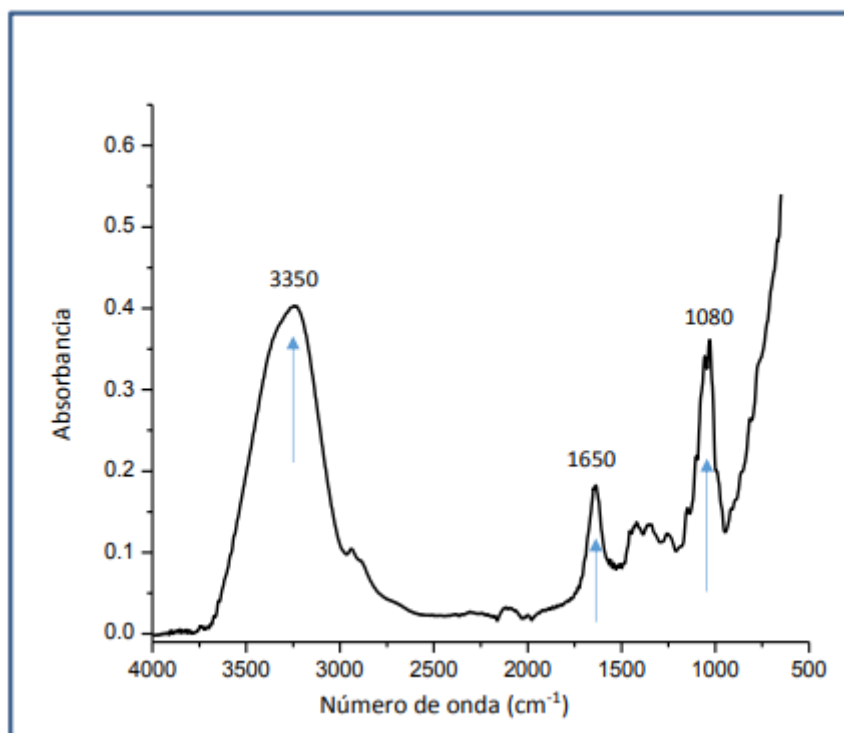
Fuente: Gómez, Y & Tormos, D. (2013) Contribución al desarrollo y mejora para la cuantificación de la degradación en aceites lubricantes usados de MCIA a través de la técnica de espectrometría infrarroja por transformada de Fourier (FT-IR)

En la figura 9 se muestra el esquema del funcionamiento del espectrofotómetro. En el resultado del análisis por espectroscopia infrarroja es un espectro, donde cada pico del espectro es un tipo de vibración o interacción de la luz con el átomo. Estos picos provienen de regiones específicas en los enlaces de las moléculas.

El gráfico del espectro infrarrojo es una secuencia de picos de absorción dentro del espectro infrarrojo, cada pico es el resultado de la vibración de un enlace atómico. En el

gráfico 10 se muestra los picos de absorción más fuertes; en otras palabras, los enlaces vibraron con mayor fuerza a esa longitud de onda para absorber la energía infrarroja.

Ilustración 10 Espectro infrarrojo



Fuente: Mondragón, Pedro (2015). *Principios Y Aplicaciones De La Espectroscopia*

Infrarroja En El Análisis De Alimentos Y Bebidas

II.1.10.2. Espectroscopia infrarroja en aceites lubricantes

La espectroscopia infrarroja permite identificar y medir la presencia de los componentes del aceite. Cada grupo funcional de los aditivos presentes en el aceite tienen bandas de absorción específicas por lo que sirve para identificar dichos compuestos.

II.1.10.3. Aplicaciones en el análisis de aceites lubricantes

- **Cuantificación de la oxidación**

Como se describió anteriormente, la oxidación es el proceso por el cual el aceite se degrada en presencia de oxígeno y altas temperaturas. Medir la oxidación del

aceite es una aplicación fundamental de la espectroscopia infrarroja, debido a que la oxidación es el principal mecanismo de degradación del aceite.

Algunos productos de la oxidación son los ácidos carboxílicos, aldehídos y cetonas. El rango de absorción de estos productos está entre $1700\text{-}1750\text{ cm}^{-1}$.

- **Medida de la sulfatación**

La sulfatación es el proceso por el cual los óxidos del azufre reaccionan con los aditivos del aceite formando sulfonatos, incrementando la acidez del aceite y causando corrosión si no se controla.

La sulfatación se da mayormente en motores que utilizan combustibles con alto contenido de azufre, como el diésel. Las bandas características de la sulfatación están entre $1150\text{-}1180\text{ cm}^{-1}$.

- **Contaminación por agua**

La espectroscopia permite detección rápida y precisa por contaminación del agua.

La cuantificación del agua en el aceite se da en la región comprendida entre $3200\text{-}3600\text{ cm}^{-1}$, que corresponde a las vibraciones de los enlaces O-H de las moléculas de agua.

- **Contaminación por glicol**

La contaminación por glicol se da principalmente por la fuga del refrigerante o anticongelante, lo que puede provocar la formación de depósitos y lodos obstruyendo los filtros del sistema de lubricación. El glicol se detecta entre los $880\text{-}920\text{ cm}^{-1}$, y corresponde a las vibraciones de los grupos funcionales O-H y C-O.

II.1.10.3. Revisión metodológica

II.1.10.3.1. ASTM E 2412 “Standard Practice for Condition Monitoring of Used Lubricants by trend analysis using Fourier transform Infrared (FT-IR) spectrometry”

Esta norma permite determinar distintos contaminantes como: agua, hollín, refrigerante, combustible, etc. Además permite medir la degradación del aceite por oxidación, nitración sulfatación.

La celda utilizada por este método puede ser de seleniuro de zinc, fluoruro de bario, bromuro de potasio, y una longitud de celda entre 0.080-0.120 mm. Fuera de este rango, se pueden leer muestras; sin embargo, baja la sensibilidad y la no linealidad de los datos.

En el cuadro se muestra los distintos parámetros con sus respectivas longitudes de onda.

Tabla 3 Parámetros típicos de contaminantes en aceites lubricantes

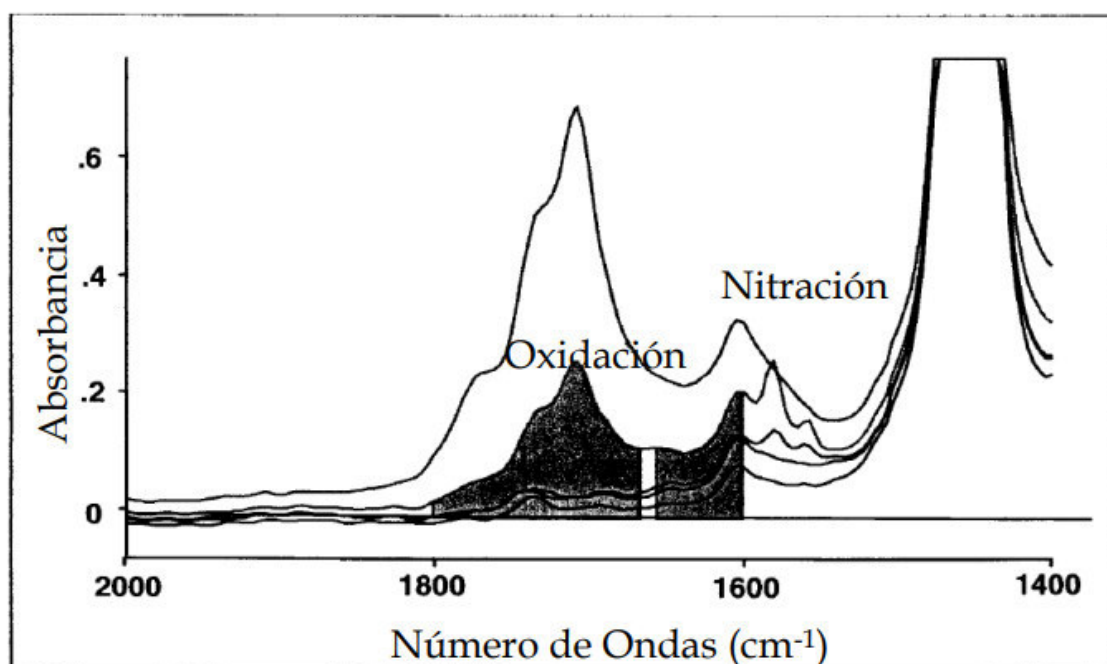
Parámetro	Rango del Número de Onda	Línea base cm-1	Reporte
Agua	3 500 - 3 150 cm ⁻¹	4 000 – 3 680 cm ⁻¹ 2 200 – 1 200 cm ⁻¹	Reportar
Hollín	2 000 cm ⁻¹	Ninguna	Valor x 100
Oxidación	1 800 - 1 670 cm ⁻¹	2 200 – 1 900 cm ⁻¹ 650 – 550 cm ⁻¹	Reportar
Nitración	1 650 - 1 600 cm ⁻¹	2 200 – 1 900 cm ⁻¹ 650 – 550 cm ⁻¹	Reportar
Aditivos antidesgaste	1 025 - 960 cm ⁻¹	2 200 – 1 900 cm ⁻¹ 650 – 550 cm ⁻¹	Reportar
Gasolina	755 - 745 cm ⁻¹	780 – 760 cm ⁻¹ 750 – 730 cm ⁻¹	Reportar
Diesel (JP-5, JP-8)	815 - 805 cm ⁻¹	835 – 825 cm ⁻¹ 805 – 795 cm ⁻¹	Reportar
Productos sulfatados	1 180 – 1 120 cm ⁻¹	2 200 – 1 900 cm ⁻¹ 650 – 550 cm ⁻¹	(Valor + 2) x 100

Etilenglicol	1 100 - 1 030 cm-1	1 130 – 1 100 cm-1 1 030 – 1 010 cm-1	Reportar
--------------	--------------------	--	----------

Fuente: Gómez, A (2013)

La oxidación, nitración y productos de sulfatación se pueden cuantificar utilizando la metodología “Direct Trending” o método de tendencias. La nitración y oxidación se puede detectar en el rango 1800-1600 cm-1 como se aprecia en la imagen 11.

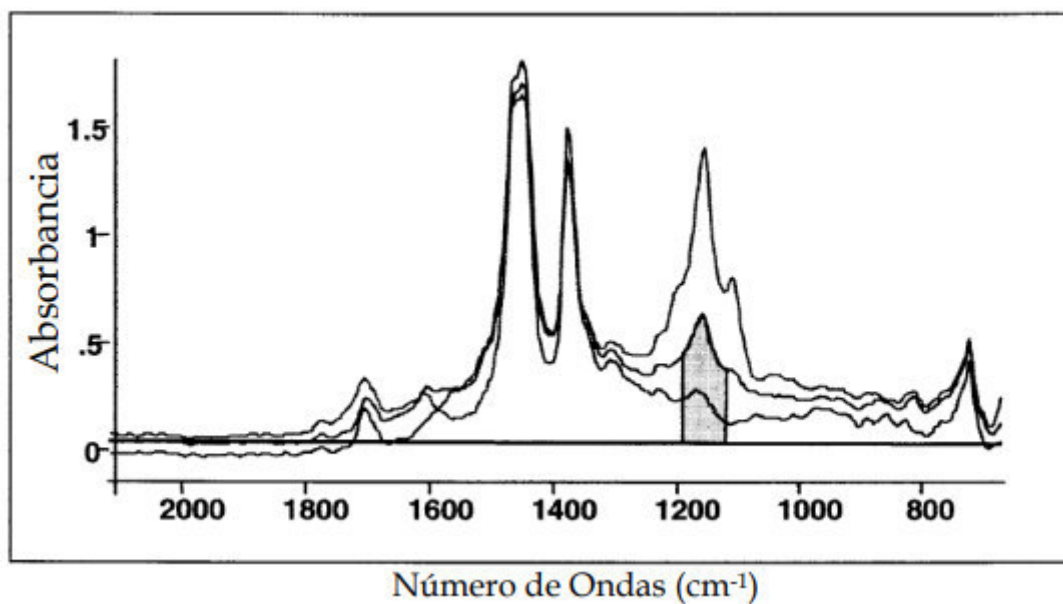
Ilustración 11 Rango Espectroscópico de la oxidación y nitración



Fuente: Gómez, A (2013)

Por otro lado, el rango característico de los productos de sulfatación está entre 1180-1120 cm-1 cómo se observa en la imagen 12.

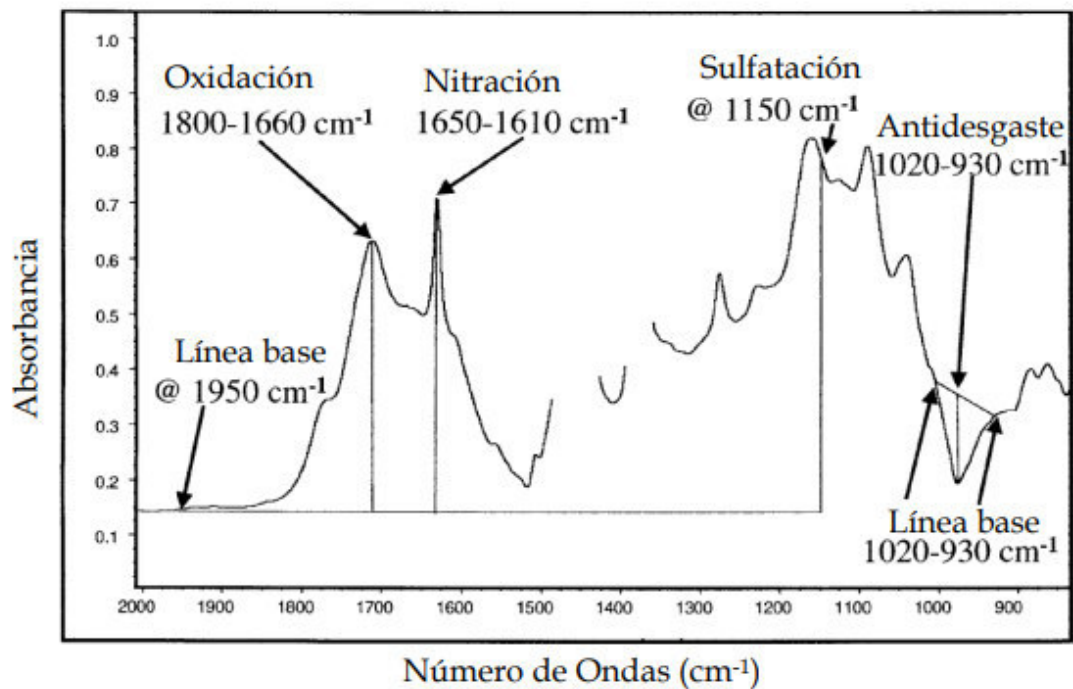
Ilustración 12 Rango espectroscópico de la sulfatación



Fuente: Gómez, A (2013)

Como se estudió anteriormente, la longitud de onda característica de la oxidación es 1730 cm^{-1} y está relacionada con los productos de degradación del aceite como los ácidos carboxílicos, cetonas, ésteres, aldehídos. Para la medida de la oxidación, La línea base se toma a 1950 cm^{-1} Evalúa la altura del máximo pico entre 1800-1650 cm^{-1} . De forma análoga, los productos nitrogenados de oxidación tienen fuerte variación a 1630 cm^{-1} y la medición se hace identificando el pico máximo en el rango de 1650-1610 cm^{-1} , con línea base ubicada entre 1950 -1900 cm^{-1} . Lo anterior mencionado se muestra en la imagen 13.

Ilustración 13 Rango espectroscópico de ciertos contaminantes en el aceite



Fuente: Gómez, A (2013)

II.1.10.4. Ventajas y limitaciones de la espectroscopia infrarroja en aceites lubricantes

Como se ha descrito anteriormente, la espectroscopia infrarroja es una herramienta que ayuda en el análisis de los aceites lubricantes. Por su facilidad para identificar y monitorear los cambios que existen en el aceite. Sin embargo; esta técnica presenta algunas ventajas y limitaciones que Petro Industry News. (s. f.). describe a continuación.

II.1.10.4.1 Ventajas

- **Rapidez para proporcionar resultados**

La espectroscopia infrarroja proporciona resultados en minutos, facilitando el análisis en tiempo real. Es ideal en los programas de mantenimiento ya que permite detectar cambios antes de que ocurran fallos que afecten al equipo.

- **Cuantificación de múltiples parámetros**

Como se explicó anteriormente, la espectroscopia infrarroja permite medir varias propiedades al mismo tiempo. Como por ejemplo, la oxidación, nitración, sulfatación, contenido de glicol, contenido de combustible, presencia de agua, degradación del aceite, contenido de hollín, entre otros.

- **Análisis no destructivo**

La espectroscopia infrarroja requiere un volumen mínimo de muestra (2-3 ml) Y facilita repetir los análisis ya que los resultados se almacenan para las comparaciones futuras.

- **Versatilidad**

En el equipo de espectroscopia infrarroja, se utiliza para distintos tipos de muestras como aceites nuevos, aceites usados, aceites base, aditivos, entre otros.

- **Fácil transporte**

Actualmente, los equipos de espectrofotometría son portátiles y de fácil transporte, lo que permite realizar los análisis in situ.

- **bajos costos de operación**

El análisis no requiere reactivos adicionales, lo que reduce significativamente el costo del ensayo; sin embargo, el costo inicial es elevado.

II.1.10.4.2. Limitaciones

- **Espectros complejos en el análisis de aceites usados**

La composición de los aceites usados es una mezcla compleja entre aditivos y aceite de base, esto dificulta separar los contaminantes y los productos de degradación del aceite inicial.

- **Interferencias en los espectros**

Los aceites usados presentan interferencias que pueden incluir en la generación de los espectros. Las interferencias pueden ser agua, hollín, diésel y refrigerantes. Estas interferencias pueden enmascarar señales como la oxidación.

- **Necesidad de muestras patrón (referencias)**

para obtener resultados confiables, el espectro debe compararse con el aceite nuevo (referencia) Para interpretar los resultados.

- **Limitación estructural**

Esto es una limitación sobre todo si se quiere analizar a detalle algunos aditivos o contaminantes, la espectroscopia infrarroja puede identificar grupos funcionales más no puede identificar la estructura molecular completa.

- **No mide el desgaste metálico**

La técnica de espectroscopia infrarroja no cuantifica el contenido metálico del aceite, para determinar el contenido metálico se realizan otras técnicas como la emisión atómica o plasma acoplado.

II.1.11. MÉTODOS TRADICIONALES PARA CUANTIFICAR EL NÚMERO BÁSICO EN ACEITES LUBRICANTES

Actualmente los métodos más utilizados para la medida del número básico del lubricante son los métodos potencio métricos y colorimétricos. Estos métodos permiten medir con mayor precisión los componentes básicos medios y fuertes del lubricante.

II.1.11.1 Método de prueba estándar para determinar el número base de productos derivados del petróleo mediante titulación potenciométrica con ácido perclórico

ASTM D2896

Este método sirve para determinar el número básico en lubricantes realizando una titulación potencia métrica utilizando ácido perclórico cómo titulante. A continuación se describen los materiales y reactivos que describe la norma.

Equipos

- Electrodo de vidrio, con ph de 0 a 11
- electrodo de referencia, electrodo de plata/cloruro de plata (Ag/AgCl)
- Medidor de titulación potencia métrica de registro manual o automático
- Agitador, ya sea mecánico o eléctrico
- Bureta, 20 ml de capacidad
- vaso precipitado para titulación

Reactivos

- Agua, tipo I, II, III o superior. Sirve para la limpieza de los equipos utilizados.
- Ácido acético glacial
- anhídrido acético
- clorobenceno
- ácido perclórico 0.1N
- Biftalato de potasio
- perclorato de sodio como electrolito, sirve como puente salino entre el electrodo de vidrio y el electrodo de referencia.

Para preparar la solución titulante, se mezcla 8.5 ml de ácido perclórico con 500 ml de ácido acético y 30 ml de anhídrido acético, finalmente se agrega ácido acético hasta completar 1 L y se deja reposar durante 24 horas.

Procedimiento

Se pesa una porción de muestra y se diluye en 20 ml de clorobenceno y 40 ml de ácido acético. Posterior a ello, se titula en una solución de ácido perclórico utilizando un medidor de titulación potenciométrica.

Cálculo

El número básico se calcula de la siguiente manera.

$$BN, mg KOH/g = \frac{(E - F) \cdot N_A \cdot 56.1}{S}$$

Donde:

E: Volumen de sol titulante gastado

F: Volumen de blanco gastado

N_A: Normalidad del ácido

S: Peso de la muestra

II.1.11.2. Comparación de la titulación potencia eléctrica con técnicas modernas

De espectroscopia infrarroja para medir el número básico en los lubricantes

Una de las ventajas de la titulación potencia métrica es la precisión y exactitud del método. Es mundialmente conocida por proporcionar resultados exactos y precisos, esto lo convierte en un método ideal en estudios donde se requiere gran exactitud. Además la titulación potenciométrica Se desarrolla mejor en aceites que tienen aditivos complejos. Por otra parte, también presenta ciertas limitaciones. Como se describió el método anterior, este requiere de reactivos altamente peligrosos como el ácido perclórico, clorobenceno y ácido acético. Esto representa un peligro para la salud humana y seguridad del laboratorio. Otra desventaja son los procesos largos de titulación, la titulación toma tiempo debido a que se tiene que preparar las soluciones y condicionar la muestra antes

de la medición. Además, si bien la titulación permite medir el número básico del aceite, no se puede conocer a detalle los componentes presentes ni los contaminantes.

A continuación se muestra un cuadro comparativo entre la titulación potenciométrica y la espectroscopia infrarroja para medir el número básico en aceites lubricantes.

Tabla 4 Cuadro comparativo entre titulación potenciométrica y espectroscopía infrarroja

Característica	Titulación Potenciométrica	Espectroscopia FTIR
Precisión	Alta precisión, estándar internacional	Moderada, depende de la calibración
Rapidez	Relativamente lenta (~15 minutos por muestra)	Rápido (~5 minutos por muestra)
Seguridad	Requiere reactivos peligrosos (ácido perclórico, acético, etc.)	No destructivo, sin reactivos peligrosos
Información complementaria	Solo número básico	Número básico, oxidación, nitración, agua, sulfatación
Costo inicial	Bajo (equipos básicos)	Alto (equipos FTIR)
Facilidad de operación	Requiere experiencia técnica	Relativamente fácil, automatizable
Aplicaciones	Normativa y estándares industriales	Monitoreo rápido y en línea, análisis múltiple

Fuente: *Elaboración propia*

II.1.12. VALIDACIÓN DE MÉTODOS ANALÍTICOS

Goncalves, J (2016) menciona que la validación de métodos analíticos consiste en realizar un conjunto de pruebas para determinar el comportamiento de un método creado. Es decir, determinar las fuentes de variación, el error sistemático y aleatorio de un procedimiento. Un método validado asegura que sea fiable y robusto para mantener la calidad de los resultados.

II.1.12.1. Tipos de validación de métodos

A continuación se describen 3 tipos de validación según Goncalvez, J (2016).

- **Validación prospectiva.**

Hace referencia al diseño o creación de un método de análisis dirigido a un proceso específico.

- **Validación retrospectiva**

Este tipo de validación se realiza cuando por mucho tiempo se ha estado utilizando un método analítico, pero éste no cuenta con evidencia experimental y documentada sobre su robustez y veracidad.

- **Revalidación**

Se realiza cuando un método previamente validado ha sido modificado en alguna parte de su proceso o existen variaciones en algunos de los instrumentos, reactivos o materiales utilizados originalmente

II.1.12.2. Parámetros para la validación de métodos

La velocidad de un método validado se puede asegurar según muchos parámetros, a continuación se detallan algunos de ellos:

- **Precisión**

Lucrecia, L (2012) define la precisión la distancia de los resultados obtenidos de un conjunto de mediciones; es decir, cuan agrupados están los resultados sin estar relacionado con el valor real.

- **Exactitud**

La exactitud es la diferencia entre el resultado de una prueba utilizando el método validado y el valor real. La exactitud mide el grado en que el método implementado proporciona valores cercanos a los reales.

- **Repetibilidad**

La repetibilidad es la diferencia de dos resultados obtenido bajo las mismas condiciones operativas (lugar, analista, reactivos, etc.)

- **Reproducibilidad**

es la diferencia de 2 resultados obtenidos bajo condiciones operativas distintas (analista, condiciones ambientales, equipos y materiales, etc.)

- **Linealidad**

La linealidad mide la capacidad del método implementado para obtener resultados proporcionales a la concentración de la muestra en un rango determinado. La linealidad se mide con el coeficiente de determinación R^2 .

- **Especificidad o Selectividad**

Hace referencia a la capacidad del método para medir la muestra en presencia de otros componentes como contaminantes o interferencias

- **Robustez**

Es la resistencia del método a los cambios introducidos deliberadamente (hola condiciones ambientales, pH, etc.) La robustez se mide Modificando los parámetros del método implementado y observando si afectan significativamente los resultados.

II.2. ANTECEDENTES DEL ESTUDIO

II.2.1. Antecedente internacional

En el estudio realizado por Goncalves, J (2016). “Desarrollo de una metodología para la determinación del Número Básico Total en aceites lubricantes mediante espectroscopia FTIR” se preparó soluciones patrón a distintas concentraciones para obtener la curva de calibración en un rango de 3 a 25 mg KOH/g. El coeficiente de calibración de la curva de calibración fue 0.9908. Así mismo, se evaluó los límites de cuantificación y detección del método implementado, los cuales fueron 0.62 y 0.18 mg KOH/g respectivamente. Finalmente, en este estudio se evaluó la repetibilidad del método mediante de los resultados, los cuales se encontraron entre el 2 y 8%. Los resultados del método implementado se validaron mediante la norma oficial ASTM D2896, no existen diferencias significativas a un nivel de confianza de 95%.

III. HIPOTESIS Y VARIABLES

III.1 Hipótesis

III.1.1. Hipótesis Principal

La técnica de espectroscopia infrarroja, al ser validada y aplicada, permitirá medir de manera precisa y eficiente el Número Básico en aceites lubricantes, brindando una opción de bajo costo y tiempo.

III.1.2. Hipótesis Secundaria

La técnica de espectroscopia infrarroja proporcionará resultados consistentes y confiables para medir el Número Básico en aceites lubricantes, lo que permitirá validar su aplicación como una herramienta eficaz para monitorear la capacidad del aceite para neutralizar ácidos y prevenir la corrosión en los motores

III.2. Operacionalización de las variables

Aplicación y Validación De La Espectroscopia Infrarroja Para Medir El Número Básico En Aceites Lubricantes Con El Propósito De Evaluar Su Capacidad Para Neutralizar Los Ácidos Y Prevenir La Corrosión En Los Motores						
PROBLEMA	OBJETIVOS	HIPOTESIS	VARIABLES		INDICADORES	TECNICAS DE RECOLECCION DE DATOS
			DEPENDIENTE	INDEPENDIENTE		
PROBLEMA PRINCIPAL ¿Cómo validar y aplicar la espectroscopia infrarroja para medir el Número Básico en aceites lubricantes, con el fin de evaluar su capacidad para neutralizar ácidos y prevenir la corrosión en los motores?	OBJETIVO GENERAL Validar y aplicar la espectroscopia infrarroja para medir el Número Básico en aceites lubricantes, con el fin de evaluar su capacidad para neutralizar los ácidos y prevenir la corrosión en los motores.	HIPOTESIS PRINCIPAL La técnica de espectroscopia infrarroja, al ser validada y aplicada, permitirá medir de manera precisa y eficiente el Número Básico en aceites lubricantes, brindando una opción de bajo costo y tiempo.	Medición del TBN (Número Básico en aceites lubricantes)	Técnica de medición del TBN (Espectroscopia infrarroja vs. Métodos tradicionales)	Prueba de veracidad	Espectroscopia infrarroja ASTM D2896
PROBLEMA SECUNDARIO ¿Cómo comparar la consistencia de los resultados obtenidos mediante los métodos tradicionales y la espectroscopia infrarroja para medir el número básico? ¿Cómo realizar una evaluación económica que compare la precisión, eficiencia y costos de los métodos tradicionales y la espectroscopia infrarroja para medir el número básico en aceites lubricantes?	OBJETIVO ESPECIFICO Comparar la consistencia de los resultados obtenidos mediante los métodos tradicionales y la espectroscopia infrarroja para medir el número básico en aceites lubricantes. Realizar una evaluación económica comparativa de los métodos tradicionales y la espectroscopia infrarroja para medir el número básico, considerando los costos, la precisión y la eficiencia.	HIPOTESIS SECUNDARIA La técnica de espectroscopia infrarroja proporcionará resultados consistentes y confiables para medir el Número Básico en aceites lubricantes, lo que permitirá validar su aplicación como una herramienta eficaz para monitorear la capacidad del aceite para neutralizar ácidos y prevenir la corrosión en los motores			Precisión Exactitud	Espectroscopia infrarroja ASTM D2896

IV. MATERIALES Y METODOS

IV.1 Área de estudio

Los ensayos de la presente investigación se realizarán en el laboratorio de la empresa Blending SAC. El rubro económico de dicha empresa es la producción, análisis empaçado y distribución de aceites lubricantes y grasas.

Los ensayos tendrán una duración de 30 días, debido a que se realizará un seguimiento temporal al método implementado para observar los cambios y/o tendencias de los resultados.

IV.2. Diseño de la investigación

El presente trabajo de investigación es de enfoque cuantitativo por lo siguiente:

La percepción de la realidad de la investigación es del tipo objetiva excluyente porque minimiza las opiniones individuales del investigador, de tal modo que las conclusiones obtenidas en este trabajo tengan como único fundamento la evidencia o los hechos. Bajo este enfoque se explican la correlación entre los resultados del método TBN ASTM D2896 y el método TBN F-TIR.

El diseño de la presente investigación está dividido en dos partes:

La primera parte de la tesis se enfoca en el desarrollo de una curva de calibración para medir el número básico utilizando la técnica de espectroscopia infrarroja Estableciendo una comparación con el método oficial de la norma ASTM.

La segunda parte de la tesis está orientado a la validación de la curva de calibración obtenida, para lo cual se evalúan los parámetros de precisión y exactitud para asegurar su validez y aplicación.

IV.3. Población y muestra

La población del presente estudio son los aceites de motor usados de distintas máquinas, con composición química similar y distintos niveles de degradación, condiciones de operación, niveles de oxidación, que son características de los aceites usados. Los aceites de motor seleccionados para desarrollar la curva de calibración fueron seleccionados aleatoriamente para garantizar la representatividad de las muestras.

Según la literatura, para generar una curva de calibración se necesitan como mínimo 10 datos; sin embargo, en el trabajo se utilizaron 11 muestras para Asegurar la correlación de los resultados.

IV.4. Desarrollo experimental

IV.4.1. Equipos

La propuesta para la adquisición de los espectros tiene como referencia el método ASTM E2412. Esta propuesta se ha desarrollado utilizando un espectrofotómetro infrarrojo que se detalla a continuación.

Tabla 5 Características de equipo espectroscopia infrarroja

Especificaciones del equipo	
Marca	Perkins Elmers
Rango espectral	4000 cm ⁻¹ a 460 cm ⁻¹
Resolución	4 cm ⁻¹
Longitud de camino óptico, mm	0.1
Material de la celda	Selenuro de Zinc (ZnSe)
Interfase	Transmision

Fuente: Propia

La propuesta metodológica para medir el Numero básico tiene como referencia el método ASTM D2896. Esta propuesta se ha desarrollado utilizando un equipo de titulación potenciométrica cuyas especificaciones se detallan a continuación.

Tabla 6 Características de equipo de titulación potenciométrica

Especificaciones del equipo	
Marca	Metrohon
Rango de medida	TBN mgKOH/g > 300
Resolución	0.1

Fuente: *Elaboración propia*

Equipos e instrumentos adicionales

- Balanza analítica marca Mettler Toledo
- Baguetas
- Vasos de precipitado 120 ml

Reactivos y muestras

- Ácido acético glacial

- Ácido perclórico, 0.1N
- Anhídrido Acético
- Clorobenceno
- Agua, grado HPLC
- Heptano
- Alcohol isopropílico

La solución titulante para medir el número básico se obtiene mezclando 8.5 ml de ácido perclórico con 500 ml de ácido acético y 30 ml de anhídrido acético. Se diluye a 1 L con ácido acético. Finalmente se deja reposar durante 24 horas.

Para el solvente de titulación se mezcla ácido acético glacial con clorobenceno en relación de 1 a 2 respectivamente y se deja reposar la mezcla durante 24 horas.

IV.4.1.2. Desarrollo de la Curva de calibración

Selección de muestras

Especificaciones iniciales del aceite nuevo

Chevron, (2024) El aceite seleccionado para el presente estudio es Delo 400 XLE SB SAE 15W-40 de la marca Chevron. Es un aceite para motores de 4 tiempos alimentados con diésel o gasolina, diseñado para trabajar en carreteras. El aceite tiene una extensa gama de especificaciones que abarcan distintos tipos de industrias como minería, petróleo, agricultura marina, entre otros. DELO 400 XLE SB SAE 15W-40 cumple las especificaciones de API CK-4, CJ-4, CI-4, SN, Volvo, Cummins, Caterpillar, etc. En el siguiente cuadro se observan las propiedades fisicoquímicas del aceite.

Tabla 7 Especificaciones de aceite nuevo

SAE	15W-40
Densidad 15°C, Kg/L	0.87
Viscosidad cinemática 40°C, cst	110
Viscosidad cinemática 100°C, cst	14.9

Viscosidad de arranque en frío, -20°C, mPa/s	5200
Indice de viscosidad	141
Punto de inflamación, °C	230
Punto de Fluidez, °C	-39
Número Base, mgKOH/g	8.3

Fuente: Chevron Lubricants, (2024)

Descripción de muestras utilizadas para curva de calibración

Para los patrones de calibración se seleccionaron aleatoriamente 11 muestras de aceite de motor obtenidas a partir de diferentes unidades de equipos y distintos niveles de degradación. Los detalles de cada muestra utilizada para la curva de calibración se describen a continuación:

Tabla 8 Descripción de Muestras para curva de calibración

Muestra	Equipo	Marca	Fecha De Muestreo	Horas De Uso De Aceite
Muestra 1	CAMIÓN	HITACHI	06/10/2024	358.80
Muestra 2	CAMIÓN	CATERPILLAR	07/10/2024	566.40
Muestra 3	CAMIÓN	HITACHI	08/10/2024	390.80
Muestra 4	CAMIÓN	HITACHI	14/10/2024	514.00
Muestra 5	CAMIÓN	HITACHI	17/10/2024	571.40
Muestra 6	CAMIÓN	CATERPILLAR	19/10/2024	143.30
Muestra 7	CAMIÓN	HITACHI	22/10/2024	103.80
Muestra 8	CAMIÓN	CATERPILLAR	24/10/2024	254.30
Muestra 9	CAMIÓN	HITACHI	27/10/2024	227.80
Muestra 10	CAMIÓN	CATERPILLAR	29/10/2024	349.30
Muestra 11	CAMIÓN	CATERPILLAR	04/11/2024	462.30

Fuente: *Elaboración propia*

Procedimiento experimental

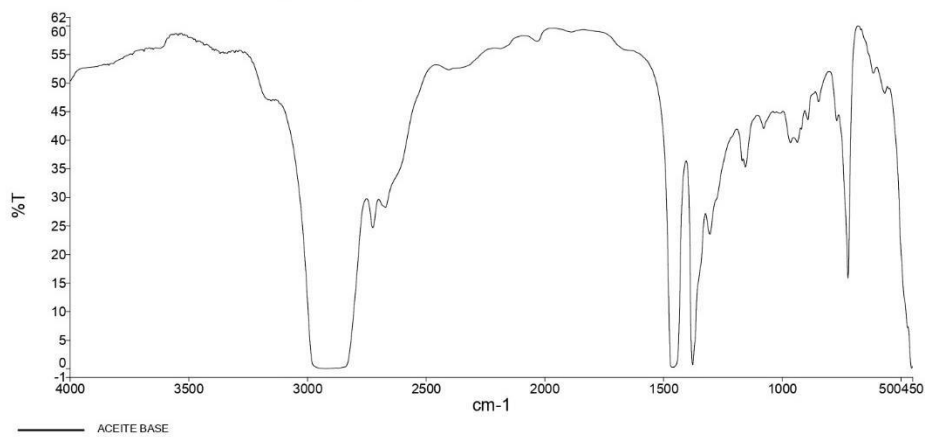
Preparación de muestras para espectroscopia

Cada muestra se rotuló con un código único para asegurar la trazabilidad durante el proceso. Previo a la lectura, las muestras fueron homogenizadas. Para lo cual se utilizó un agitador orbital durante 10 minutos.

Adquisición de los espectros infrarrojos

Para cargar la celda con muestra se procede de la siguiente manera: Se programa al equipo realizar un lavado de la celda con heptano, seguidamente se programa la lectura de una muestra de aceite básico (aceite sin aditivos), esto es para verificar que el equipo esté realizando las lecturas correctamente.

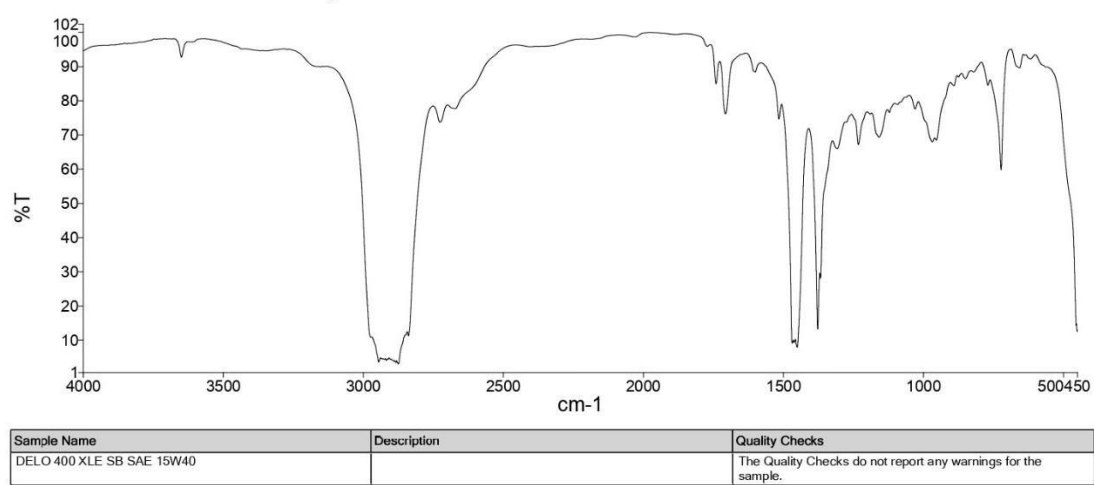
Ilustración 14 Espectro infrarrojo de aceite básico



Fuente: *Propia*

Seguidamente se realiza una lectura del aceite nuevo Delo 400 XLE SB SAE 15W-40, y se almacenó su espectro (S₀) en la base de datos del equipo como línea base.

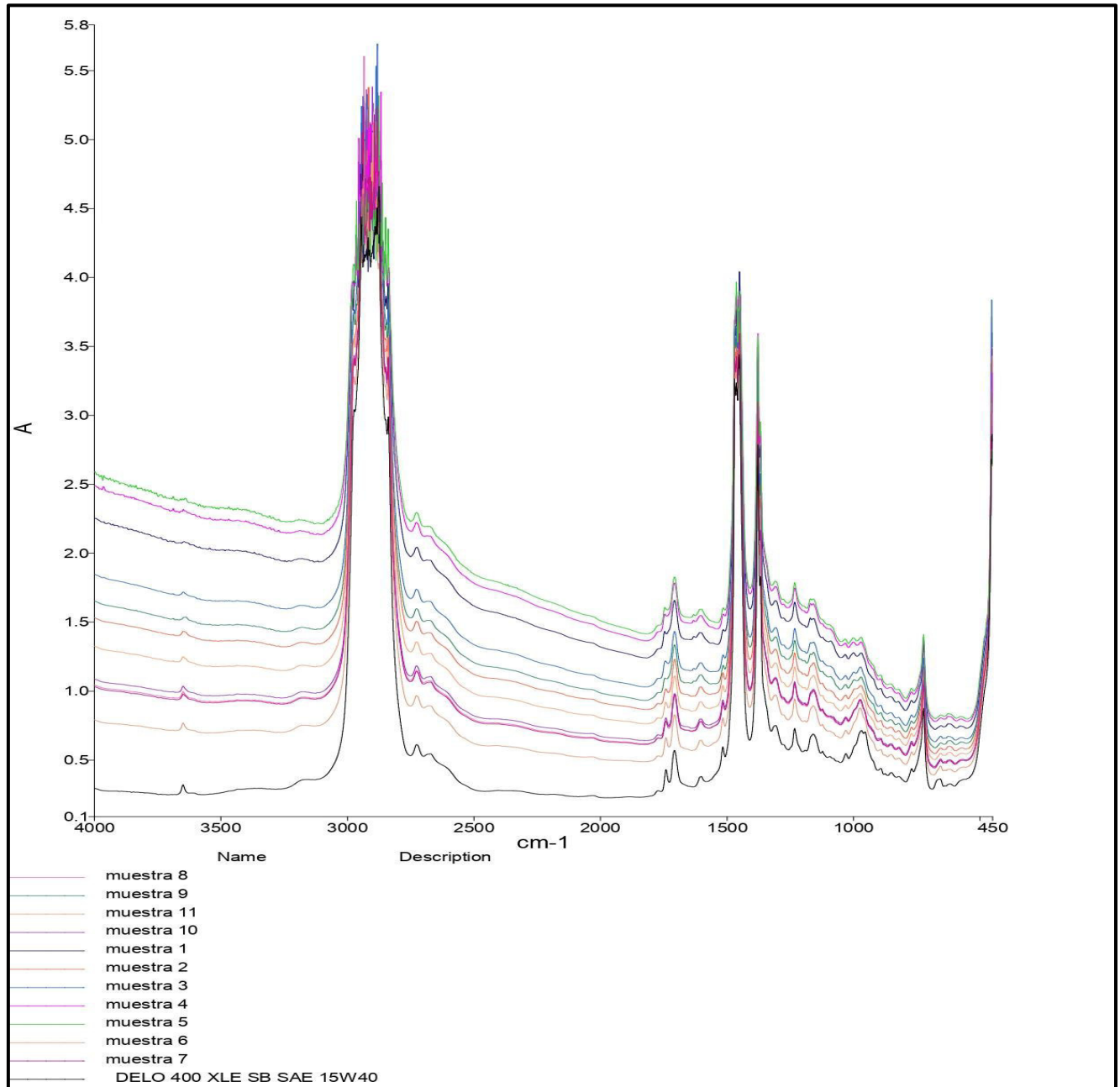
Ilustración 15 Espectro infrarrojo de aceite nuevo de motor



Fuente: *Propio*

Se tomaron 10 ml de cada una de las 11 muestras y se programó en el equipo para realizar las lecturas continuas, se almacenó los espectros como $S_{1,2,...11}$. Internamente el equipo restó $S_0 - S_{1,2,...11}$ para producir un espectro diferencial S_d .

Ilustración 16 Espectros infrarrojo para curva de calibración



Fuente: *Elaboración propia.*

Para la generar la curva de calibración se toman los picos de absorbancia en las siguientes longitudes de onda.

Tabla 9 Longitudes de onda de Oxidación, nitración y sulfatación

Oxidación	1730 cm ⁻¹
Nitración	1650 cm ⁻¹
Sulfatación	1150 cm ⁻¹

Medida del número básico según la norma ASTM D2896

Se tituló cada una de las 11 muestras para la curva de calibración, para lo cual se pesa una porción de muestra de aceite (0.8 – 1.2 gr) de aceite. Seguidamente se diluye con 20 ml de ácido acético y 40 ml de Clorobenceno. Se lleva a agitación magnética por 5 minutos para asegurarse que la muestra se haya diluido completamente.

Posterior, se lleva a titulación potenciométrica, se registra el cambio de potencial eléctrico, el volumen de ácido gastado en la titulación y la masa de la muestra. Finalmente se limpia los electros utilizados con heptano y agua.

Ilustración 17 Equipo de titulación potenciométrica



Fuente: *Propia.*

IV.4.1.3. Procedimiento experimental para la Validación Del Método

Para asegurar la validez de los resultados de la metodología implementada se evaluaron dos parámetros de calidad. La exactitud y la precisión

La exactitud se determinó comparando los resultados del método implementado versus los resultados de la norma ASTM D2896. Por otro lado, la precisión se determinó mediante la repetitividad de los resultados.

Procedimiento experimental para el estudio de la exactitud del método

Después de obtener la curva de calibración, se realizó el estudio de exactitud para evaluar que tan cerca están los resultados que arroja la curva de calibración del valor tomado como referencia o valor verdadero (ASTM D2896).

Para realizar el estudio de exactitud se tomaron 15 muestras aleatoriamente y se obtuvieron los espectros siguiendo el mismo procedimiento descrito anteriormente. En paralelo se determinó el número básico de las muestras siguiendo el procedimiento de la norma ASTM D2896. Los detalles de las muestras utilizadas para el estudio de exactitud se muestran en la siguiente tabla.

Tabla 10 Descripción de muestras para prueba de exactitud

Muestra	Equipo	Marca	Fecha De Muestreo	Horas De Uso De Aceite
V1	CAMIÓN	CATERPILLAR	09/08/2024	414
V2	CAMIÓN	CATERPILLAR	09/08/2024	359
V3	CAMIÓN	HITACHI	11/08/2024	436
V4	CAMIÓN	CATERPILLAR	11/08/2024	462
V5	CAMIÓN	CATERPILLAR	14/08/2024	524
V6	CAMIÓN	HITACHI	15/08/2024	514
V7	CAMIÓN	CATERPILLAR	15/08/2024	489
V8	CAMIÓN	CATERPILLAR	16/08/2024	513
V9	CAMIÓN	HITACHI	17/08/2024	43
V10	CAMIÓN	HITACHI	19/08/2024	85
V11	CAMIÓN	HITACHI	26/08/2024	319
V12	CAMIÓN	CATERPILLAR	27/08/2024	496
V13	CAMIÓN	HITACHI	18/09/2024	593
V14	CAMIÓN	CATERPILLAR	19/09/2024	168
V15	CAMIÓN	CATERPILLAR	27/09/2024	350

Fuente: Elaboración propia

Procedimiento experimental para el estudio de precisión del método

Para determinar la precisión del método se analizó una muestra (Rep_1) bajo las mismas condiciones operativas durante 3 días. Con este análisis se busca determinar la capacidad del método para arrojar resultados consistentes y asegurar la validez de los resultados.

Se tomaron 5 lecturas de espectros cada día durante 3 días, manteniendo las mismas condiciones operativas (Temperatura, humedad, condiciones del equipo, etc.)

V. RESULTADOS

V.1. Curva De Calibración

V.1.1. Resultados de lecturas de espectros de muestras para curva de calibración

La espectroscopia infrarroja detecta grupos funcionales a lo largo del rango espectral, estos grupos pueden ser identificados y cuantificados debido a su absorbancia. En la siguiente tabla se muestran los resultados de absorbancia (S_d) de los patrones de calibración.

Tabla 11 Resultados de oxidación, nitración y sulfatación para curva de calibración

Muestra	NITRACION 1650 cm^{-1}	OXIDACION 1730 cm^{-1}	SULFATACION 1150 cm^{-1}
Muestra 1	18.87	17.95	7.62
Muestra 2	9.55	8.02	6.52
Muestra 3	14.66	13.65	5.87
Muestra 4	19.09	18.10	8.11
Muestra 5	18.55	17.14	6.89
Muestra 6	4.22	2.86	0.00
Muestra 7	7.52	6.37	0.00
Muestra 8	6.18	4.44	0.00
Muestra 9	14.17	13.84	6.07
Muestra 10	6.54	4.24	0.00
Muestra 11	8.08	6.06	5.67

Fuente: *Elaboración propia*

V.1.2. Resultados de Numero básico por la norma ASTM D2896 de muestras para curva de calibración

En la siguiente tabla se muestran los resultados del número básico de las muestras utilizadas para la curva de calibración.

Tabla 12 Resultados de Número básico de muestras para curva de calibración

Muestra	Masa gramos	Volumen ml	Concentración Ac perclórico	Número básico mgKOH/g
Muestra 1	0.8425	1.1448	0.0997	7.60

Muestra 2	1.2593	1.8597	0.0997	8.26
Muestra 3	0.9253	1.3367	0.0997	8.08
Muestra 4	0.9902	1.3526	0.0997	7.64
Muestra 5	1.1147	1.5485	0.0997	7.77
Muestra 6	1.8542	2.6620	0.0997	8.03
Muestra 7	0.9582	1.3945	0.0997	8.14
Muestra 8	0.7582	1.0926	0.0997	8.06
Muestra 9	0.9317	1.3160	0.0997	7.90
Muestra 10	1.1402	1.6410	0.0997	8.05
Muestra 11	1.0057	1.4582	0.0997	8.11

Fuente: *Elaboración propia*

V.2. Validación Del método

V.2.1. Exactitud del método

La exactitud del método se evaluó con 15 muestras. Se obtuvieron los espectros y en paralelo se midió el número básico por la norma ASTM D2896. En la siguiente tabla se muestran los resultados de las 15 muestras.

Tabla 13 Resultado de oxidación, nitración y sulfatación para prueba de exactitud

Muestra	MUESTRAS PARA PRUEBA DE EXACTITUD		
	NITRACION 1650 cm ⁻¹	OXIDACION 1730 cm ⁻¹	SULFATACION 1150 cm ⁻¹
V1	6.84	4.21	0.00
V2	6.82	4.54	4.29
V3	12.60	9.54	7.90
V4	7.10	4.32	4.38
V5	8.27	5.27	5.11
V6	18.68	17.02	6.52
V7	8.27	6.20	6.00
V8	8.58	6.41	6.13
V9	4.82	3.18	0.00
V10	7.05	4.93	0.00
V11	11.58	9.94	5.08
V12	5.40	2.39	0.00
V13	19.95	18.02	8.61
V14	4.33	2.08	0.00
V15	6.71	3.66	0.00

Fuente: *Elaboración propia*

Tabla 14 Resultado de número básico de muestras para prueba de exactitud

Muestra	Masa g	Volumen ml	Concentración Ac perclórico	Número básico mgKOH/g
V1	1.1128	1.5837	0.0997	7.96
V2	0.8243	1.1510	0.0997	7.81
V3	1.0085	1.3722	0.0997	7.61
V4	1.1958	1.6569	0.0997	7.75
V5	0.9941	1.4699	0.0997	8.27
V6	0.8709	1.1585	0.0997	7.44
V7	1.0549	1.4768	0.0997	7.83
V8	0.9723	1.3733	0.0997	7.90
V9	1.0284	1.4893	0.0997	8.10
V10	0.8247	1.2046	0.0997	8.17
V11	0.9628	1.3651	0.0997	7.93
V12	1.0985	1.5771	0.0997	8.03
V13	1.1482	1.5643	0.0997	7.62
V14	0.8537	1.2516	0.0997	8.20
V15	0.9382	1.3352	0.0997	7.96

Fuente: *Elaboración propia*

V.2.2. Precisión del método

cómo se mencionó anteriormente, la exactitud se evaluó con la repetitividad del método.

Para lo cual se obtuvieron 15 lecturas de una muestra que se te detallan a continuación.

Tabla 15 Resultados de Oxidación, nitración y sulfatación para prueba de precisión

	NITRACION 1650 cm⁻¹	OXIDACION 1730 cm⁻¹	SULFATACION 1150 cm⁻¹
Rep1	5.183	3.026	3.78
Rep2	5.137	2.952	3.53
Rep3	5.206	2.995	4.58
Rep4	5.165	2.869	1.77
Rep5	5.184	3.088	5.70
Rep6	5.129	2.907	4.29
Rep7	5.042	2.846	2.88
Rep8	5.208	2.93	2.81
Rep9	5.017	2.815	4.68
Rep10	4.972	2.684	3.99
Rep11	5.318	3.039	5.07
Rep12	5.061	2.778	4.74
Rep13	5.059	2.844	2.43
Rep14	5.081	2.711	3.19

Rep15	5.119	2.848	1.48
-------	-------	-------	------

Fuente: *Elaboración propia*

V.3. Análisis Estadístico De Los Resultados

V.3.1. Curva de calibración

La espectroscopia infrarroja es una técnica analítica que permite identificar y cuantificar los grupos funcionales de una muestra debido al fenómeno de absorción de la luz a longitudes de onda específicas.

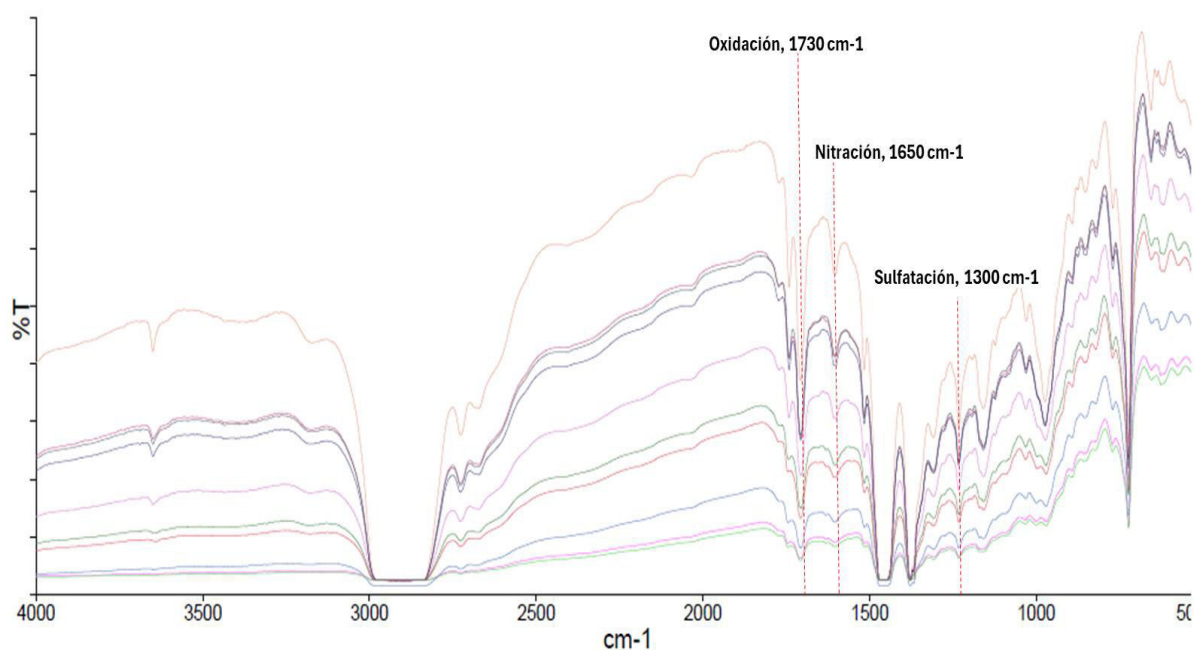
La oxidación, nitración y sulfatación son procesos químicos que afectan las propiedades del lubricante, entre ellas el número básico. Este parámetro es indispensable para evaluar la capacidad del aceite para neutralizar los ácidos y evitar la corrosión.

La oxidación ocurre cuando el lubricante reacciona con el oxígeno a altas temperaturas, como producto de esta reacción se producen ácidos orgánicos. Por otro lado, la nitración es el producto de la reacción de los óxidos de nitrógeno generados en la combustión interna del motor. Los productos de la nitración degradan el aceite disminuyendo el número básico.

La sulfatación es el proceso por el cual los compuestos azufrados del combustible reaccionan con los componentes alcalinos del aceite, reduciendo el número básico del lubricante. Este fenómeno es de suma importancia sobre todo en combustibles con alto contenido de azufre como los combustibles marinos.

En la figura 18 se muestran los espectros de los patrones de calibración, en el cual se observa una fuerte reacción a los 1730 cm^{-1} . La vibración a esta longitud de onda está asociada al grupo carbonilo de un anión carboxilato COO^- .

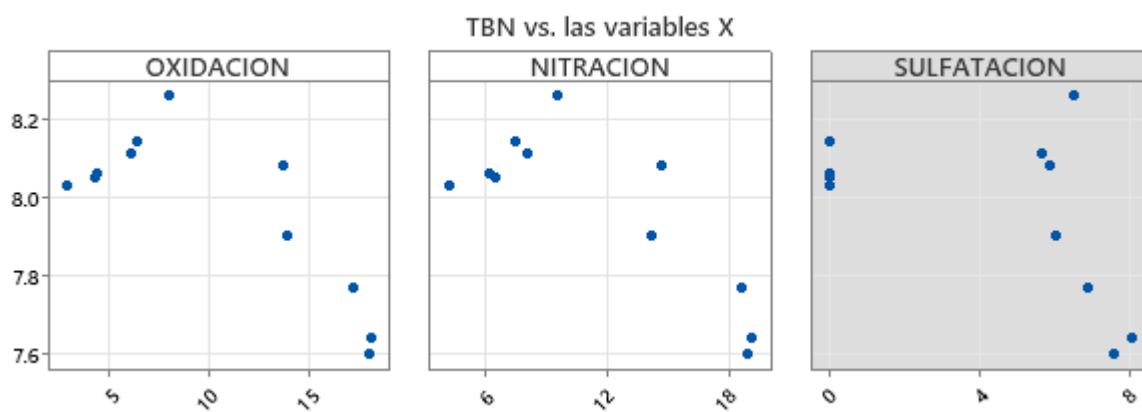
Ilustración 18 Picos de oxidación, nitración y sulfatación en muestras para calibración



Fuente: *Elaboración propia*

En la figura 19 se observa las relaciones entre la oxidación nitración y sulfatación y el número básico.

Ilustración 19 Relación entre el número básico y las variables oxidación, nitración y sulfatación



Fuente: *Elaboración propia*

De los gráficos anteriores se observa que la nitración y la oxidación presentan tendencias lineales; sin embargo, la sulfatación versus el TBN no tiene el comportamiento esperado. Por lo que se procedió a hacer un análisis de correlación

de las 3 variables versus el TBN. Para determinar el coeficiente de correlación se utilizó la ecuación 1.

$$r = \frac{n \sum (x_i y_i) - \sum x_i \sum y_i}{\sqrt{[n \sum x_i^2 - (\sum x_i)^2] \cdot [n \sum y_i^2 - (\sum y_i)^2]}} \dots \dots (1)$$

Donde:

x_i : Oxidación, nitración, sulfatación

y_i : Número básico

n : 11

Reemplazando los resultados de la tabla 11 y 12 en la ecuación 1 se obtiene la tabla 16.

Tabla 16 Coeficientes de correlación de las variables con el número básico

COEFICIENTE DE CORRELACION	
OXIDACION VS TBN	-0.79114438
NITRACION VS TBN	-0.79484896
SULFATACION VS TBN	-0.52370593
Fuente: Elaboración propia	

Según la literatura el rango de coeficiente de correlación es -1 a 1, el valor negativo indica que existe una correlación inversa y los valores cercanos al cero indican que no existe correlación. De la tabla 16 se deduce que la sulfatación es la que presenta menor correlación con el TBN, por lo que no se tomará en cuenta esta variable para determinar la ecuación de regresión para el TBN.

Para encontrar la curva de calibración se utilizó el programa minitab. Se utilizó un procedimiento de regresión escalonada. Primero, el modelo evalúa las variables (oxidación, nitración y sulfatación) qué tienen mayor relación con el TBN. Después se valúa si se agregan las interacciones de las variables al modelo. El criterio para agregar o rechazar una variable al modelo es el siguiente:

Valor $P < 0.05$, se incluye al modelo

Valor $P > 0.1$, se elimina del modelo

Sí el término de interacción de 2 variables es significativo, el modelo debe incluir cada término lineal por separado, aun cuando éstos no sean estadísticamente significativos.

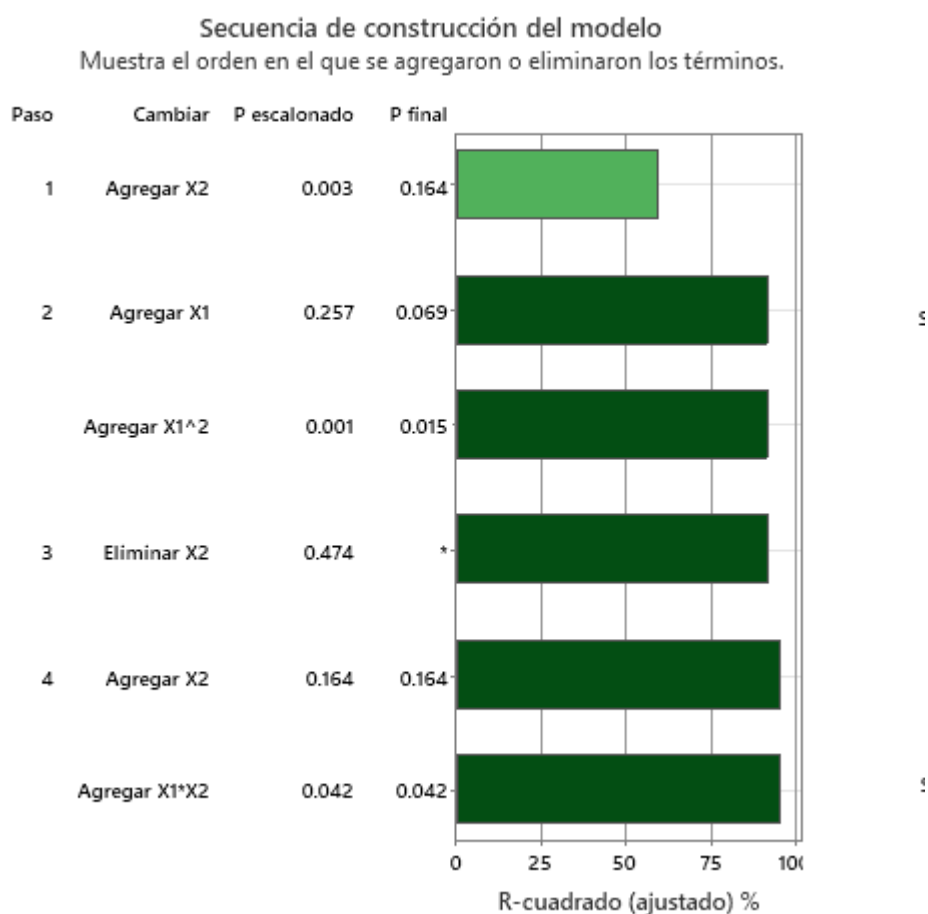
En la siguiente tabla se muestra las variables y sus interacciones.

Donde:

X1: oxidación

X2: Nitración

Tabla 17 Valor p de las variables oxidación, nitración y sus interacciones para construcción del modelo



Fuente: Elaboración propia

Utilizando el criterio anterior, Las variables que se eliminan son la nitración y oxidación. Sin embargo, la interacción de estas dos variables (oxidación-nitración) es significativa para el modelo, por lo que finalmente no se eliminan.

Finalmente, se obtiene la ecuación final del modelo.

$$TBN = 7.943 + 0.2209X_1 - 0.1420X_2 - 0.02554 \cdot X_1^2 + 0.01953X_1X_2 \dots \dots (2)$$

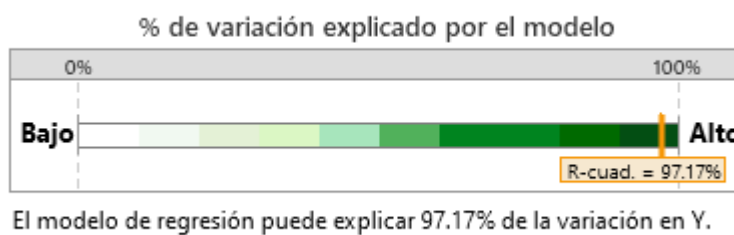
Donde:

X_1 : Oxidación

X_2 : Nitración

El R cuadrado que se obtuvo para el modelo fue de 97.13%, lo que indica que El modelo se ajusta muy bien a los datos.

Tabla 18 Coeficiente de correlación R^2 del modelo



Fuente: Elaboración propia

V.3.2. Validación del método

V.3.2.1. Exactitud del método

Para calcular la exactitud del método validado existen muchas pruebas y enfoques estadísticos. En el presente estudio se utilizó la prueba de veracidad y error relativo

Prueba de veracidad

Para evaluar la exactitud del método, es necesario primero evaluar su veracidad; es decir, determinar si existen diferencias significativas entre el método implementado y el método oficial.

La veracidad se evalúa utilizando el sesgo entre el TBN del modelo calculado y el TBN de la norma. El $TBN_{REFERENCIA}$ se calculó reemplazando la tabla 13 en la ecuación 2.

Tabla 19 Resultados de TBN del modelo hallado y TBN del método de referencia

Muestra	$TBN_{REFERENCIA}$	$TBN_{VALIDADO}$	Sesgo
V1	7.96	8.01	-0.05
V2	7.81	8.06	-0.25
V3	7.61	8.28	-0.67
V4	7.75	8.01	-0.26
V5	8.27	8.08	0.19
V6	7.44	7.86	-0.42
V7	7.83	8.16	-0.33
V8	7.90	8.17	-0.27
V9	8.10	8.00	0.10
V10	8.17	8.09	0.08
V11	7.93	8.22	-0.29
V12	8.03	7.81	0.22
V13	7.62	7.82	-0.20
V14	8.20	7.85	0.35
V15	7.96	7.94	0.02

Fuente: *Elaboración propia*

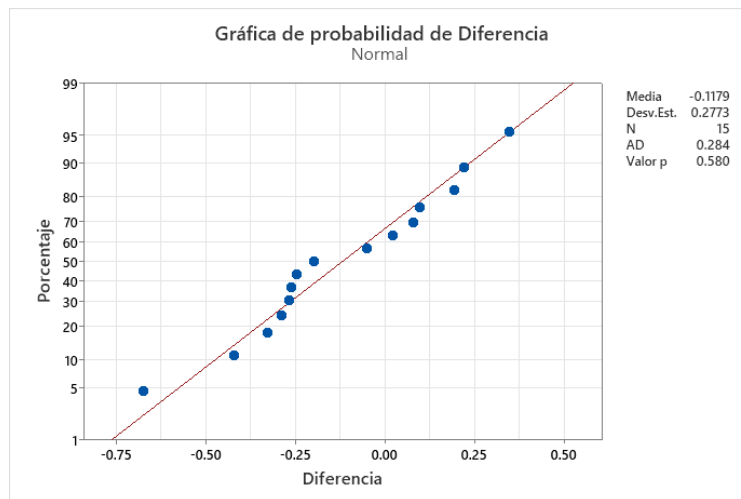
Se realiza la prueba de normalidad al sesgo con la prueba de Anderson Darling

Para esta prueba las hipótesis son las siguientes:

H_0 : *Los datos presenta distribucion normal*

H_1 : *Los datos presenta distribucion no normal*

Ilustración 20 Prueba de normalidad de Anderson Darling



Fuente: *Elaboración propia*

De la figura 20 se concluye que se acepta la hipótesis nula, ya que $P > 0.05$. Por lo tanto, los datos presentan distribución normal.

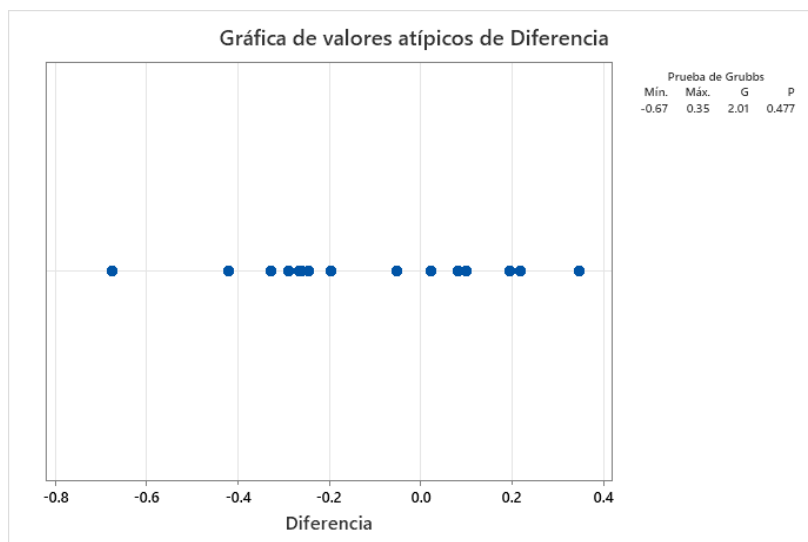
Después se evalúa si existen datos atípicos, para lo cual se utiliza la prueba de diagrama de GRUBBS.

Para esta prueba, las hipótesis son las siguientes:

H_0 : todos los valores de los datos provienen de la misma población normal

H_1 : el valor más pequeño o más grande es un valor atípico

Ilustración 21 Diagrama de Grubbs para valores atípicos



Fuente: *Elaboración propia*

De la Figura 21 se concluye que se acepta la hipótesis nula, ya que $P > 0.05$ Por lo tanto no existen valores atípicos.

Finalmente para evaluar la veracidad de los datos se utiliza el estadístico T de student, asumiendo la media hipotética cero.

Para esta prueba las hipótesis son las siguientes:

H_0 : La media de las diferencias es igual a cero

H_1 : La media de las diferencias es distinto a cero

Tabla 20 T de Student

Estadísticas descriptivas					Prueba	
			Error estándar de la media	IC de 95% para μ	Hipótesis nula $H_0: \mu = 0$	
					Hipótesis alterna $H_1: \mu \neq 0$	
N	Media	Desv.Est.			Valor T	Valor p
15	-0.1179	0.2773	0.0716	(-0.2715; 0.0357)	-1.65	0.122

μ : media de población de Diferencia

Fuente: *Elaboración propia*

Por lo tanto se acepta la hipótesis nula, entonces se concluye que el método es veraz ya que no hay diferencias significativas entre los resultados del modelo y los resultados del método tomado como referencia.

Error relativo

Es otra medida importante para evaluar la exactitud del método validado, sirve para determinar cuánto se desvía el método validado en comparación con el valor real.

El error relativo se calcula de la siguiente manera:

$$Error\ Relativo = \frac{|TBN_{VALIDADO} - TBN_{REFERENCIA}|}{|TBN_{REFERENCIA}|} \times 100 \dots (3)$$

Por lo tanto

Tabla 21 Error Relativo

Muestra	TBN_{REFERENCIA}	TBN_{VALIDADO}	Error relativo
V1	7.96	8.01	0.6%
V2	7.81	8.06	3.1%
V3	7.61	8.28	8.9%
V4	7.75	8.01	3.4%
V5	8.27	8.08	2.4%
V6	7.44	7.86	5.6%
V7	7.83	8.16	4.2%
V8	7.90	8.17	3.4%
V9	8.10	8.00	1.2%
V10	8.17	8.09	1.0%
V11	7.93	8.22	3.6%
V12	8.03	7.81	2.7%
V13	7.62	7.82	2.6%
V14	8.20	7.85	4.2%
V15	7.96	7.94	0.3%

Fuente: *Elaboración propia*

Después de calcular el error relativo para cada muestra, se obtiene el error relativo promedio de todas las muestras.

$$Error\ Relativo\ Promedio = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n Error\ relativo \dots (4)$$

Reemplazando:

$$Error\ Relativo\ Promedio = 3\%$$

Un error relativo bajo alrededor de cero sugiere que el método validado es muy preciso y exacto en comparación con el método oficial. El error relativo máximo considerado aceptable depende de muchos factores como el área de aplicación, tipo de Industria, normativa utilizada, entre otros. Por ejemplo, en la industria farmacéutica el error relativo máximo considerado aceptable es 5%. Para las normas ISO 17025 el error relativo máximo considerado aceptable es 3%.

V.3.2.2. Precisión del método

La precisión del método es una medida de la dispersión de los resultados obtenidos cuando el análisis se repite bajo condiciones similares. La precisión se puede medir con varios indicadores como la desviación estándar y el coeficiente de variación (CV).

Desviación estándar (s)

Mide la dispersión de los resultados.

$$s = \sqrt{\frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2} \dots \dots (5)$$

De la tabla

Muestra	TBN _{VALIDADO}
Rep1	7.95
Rep2	7.94
Rep3	7.94
Rep4	7.92
Rep5	7.96
Rep6	7.93
Rep7	7.93
Rep8	7.93
Rep9	7.93
Rep10	7.91
Rep11	7.94
Rep12	7.92
Rep13	7.93
Rep14	7.90
Rep15	7.92

Reemplazando en la ecuación 5

$$s = 0.0148$$

Coeficiente de Variación (CV)

El coeficiente de variación está dado por:

$$CV = \frac{\text{Desviacion estandar}}{\text{Promedio}} \times 100 \dots \dots (6)$$

Reemplazando en la ecuación anterior

$$CV = 0.19\%$$

V.4. EVALUACION ECONOMICA

V.4.1 Criterios de evaluación

Costo de los equipos

ASTM D2896: Equipo de titulación \$/10 000

FTIR: Espectrofotómetro FTIR \$/ 15 000

Costo de los consumibles por muestra

ASTM D2896: Solventes y reactivos (\$4/muestra)

FTIR: Limpieza de celdas y consumibles (\$0.5/muestra)

Costo de mantenimiento anual

ASTM D2896: \$1069 (calibración del potenciómetro y mantenimiento del sistema de titulación)

FTIR: \$2720 (mantenimiento del espectrómetro)

Costo por análisis de mano de obra

ASTM D2896: 15 minutos por muestra (\$10/hora de técnico) → \$5/muestra

FTIR: 2 minutos por muestra (\$10/hora de técnico) → \$0.2/muestra

Costo de entrenamiento

ASTM D2896: Capacitación en el método (\$100 por operador)

FTIR: Capacitación en el manejo del espectrómetro (\$60 por operador)

Capacidad de análisis

ASTM D2896: 4 muestras/hora

FTIR: 30 muestras/hora

5.4.2. Cuantificación de costos

costos operativos

Tabla 22 Comparación de costos operativos

Método	Consumibles/muestra	Mano de obra/muestra	Total por muestra
ASTM D2896	\$4.00	\$5.00	\$9.00
FTIR	\$0.50	\$0.20	\$0.70

Mantenimiento anual

Tabla 23 Comparación de costos de mantenimiento anual

Método	Costo de mantenimiento
ASTM D2896	\$1,069.00
FTIR	\$2,720.00

Modelo comparativo (1000 muestras/año)

Costos totales anual

Tabla 24 Comparación de costos totales anual

Método	Operativo (1000 muestras)	Mantenimiento	Total Año
ASTM D2896	\$9000	\$1069	\$11069

FTIR	\$700	\$2720	\$3420
------	-------	--------	--------

VI.6. DISCUSION DE RESULTADOS

Evaluación de las variables para la curva de calibración

Para el proceso de la validación del método de espectroscopia para medir el número básico en lubricantes, inicialmente, se utilizaron 3 variables potenciales de degradación del aceite (oxidación, medida a 1730 cm⁻¹, nitración a 1650 cm⁻¹ y sulfatación a 1150 cm⁻¹) para determinar la curva de calibración del número básico. Como patrones de calibración se utilizó Muestras de aceite usado del aceite Chevron delo SAE15W-40 con distintos grados de degradación. Después de realizar un análisis de correlación entre las variables y el TBN medido por la norma oficial, se encontró que la sulfatación no aportaba significativamente a la variable de respuesta

El coeficiente de correlación de la sulfatación fue de -0.52, siendo la más baja de las 3 variables. Esta baja correlación entre la sulfatación y el TBN puede ser explicada debido a que los valores de sulfatación fueron cero en varias muestras. Estos valores cercanos a cero pueden ser por la baja concentración de sustancias sulfatadas en las muestras analizadas o por la baja sensibilidad del equipo. Otra posible causa puede ser la composición del aceite; es decir, los aditivos del aceite no generan desechos de sulfatación significativos.

Además, el número básico disminuye principalmente por los compuestos ácidos que se generan durante la oxidación y la nitración y estos reaccionan con los componentes básicos del aceite reduciendo la reserva alcalina total. (Martínez, 2010).

Al eliminar la variable de sulfatación del modelo inicial, este mejoró significativamente alcanzando un coeficiente de determinación R^2 de 0.97. Lo que indica que el método de espectroscopia infrarroja es una técnica confiable para medir el número básico del lubricante y la alta capacidad para explicar la variabilidad del número básico.

Validación del método desarrollado

Exactitud.

Para determinar la exactitud se realizó el análisis de 15 muestras con distintos grados de degradación Tanto por el método validado como el método oficial. Después, se compararon estadísticamente los resultados obtenidos para analizar la veracidad, y Se demostró que no existían diferencias significativas entre los resultados de ambos métodos. Esto demuestra que los resultados del método validado son equivalentes estadísticamente al método oficial. Este hallazgo es comparable a los resultados de otras investigaciones que han validado técnicas de espectroscopia infrarroja en aceites lubricantes (Gómez et al, 2015)

Después, se calculó el error relativo promedio que fue del 3%, lo cual se considera aceptable en comparación con otros métodos analíticos, Ya que cumple con el estándar internacional $<5\%$ (Eurachem, 2014).

Precisión

La precisión del método validado se determinó realizando 15 lecturas repetidas a una muestra utilizando el método validado. Los resultados arrojaron un coeficiente de variación de 0.19% y desviación estándar de 0.0 148, lo que demuestra una excelente repetibilidad de los resultados. Según la ICH (2005) un coeficiente de variación $< 1\%$ se considera de alta precisión en métodos analíticos.

El método validado es una alternativa confiable y segura para medir el número básico del lubricante. Además, ofrece ventajas importantes en términos de costo y tiempo de análisis. Su capacidad para medir el número básico rápidamente, lo convierte en una herramienta fundamental para el monitoreo de los aceites lubricantes, ayudando así a prevenir la corrosión en los motores y prolongar la vida útil.

Cabe recalcar que el método validado es específico para el aceite que se utilizó y no puede extenderse a otros tipos de aceite, debido a que los aceites lubricantes tienen distintas composiciones químicas según su formulación. Esto lo señala (Smith et al, 2018) Los modelos en espectroscopia infrarroja deben validarse única y exclusivamente para cada tipo de aceite ya que las distintas composiciones pueden resultar en lecturas incorrectas o sesgadas. H₂O

Evaluación económica

Un análisis comparativo entre los métodos ASTM D2896 y FTIR para la medición de TBN resalta diferencias significativas en costo y eficiencia. FTIR tiene un costo inicial más alto (\$15 060 frente a \$10 100) y un mantenimiento anual más costoso (\$2720 frente a \$1069), pero costos operativos significativamente más bajos por muestra (\$0,70 frente a \$10,00). También es más eficiente, capaz de procesar 30 muestras por hora en comparación con ASTM D2896, que procesa 4 muestras por hora.

En un escenario de procesamiento de 1000 muestras por año, FTIR es más económico, con un costo total durante el primer año de \$11069 en comparación con \$3420 para ASTM D2896. Por lo tanto, FTIR es una alternativa rentable y eficiente para laboratorios de gran volumen, mientras que ASTM D2896 es más adecuada para laboratorios con baja demanda o restricciones presupuestarias iniciales.

VII. CONCLUSIONES

El presente trabajo de investigación logró validar con éxito la aplicación de la técnica de espectroscopia infrarroja para medir el número básico en lubricantes, Se demostró que es una alternativa confiable y eficiente en comparación con los métodos tradicionales. Se demostró estadísticamente que no existen diferencias significativas entre el método validado y el método oficial ASTM, Lo que refuerza los resultados de precisión y exactitud del método implementado.

La curva de calibración encontrada obtuvo un valor de R^2 de 97% lo que indica que dicho modelo explica el 97% de la variabilidad de los resultados. Por otro lado el error relativo encontrado fue de solo el 3% y el coeficiente de variación de 0.19%, Estos resultados indican que el método validado Es una herramienta confiable para medir el número básico.

Respecto a los costos, técnica de espectroscopia infrarroja tiene ventaja sobre otros métodos tradicionales para medir el número básico. Ya que permite hacer mediciones más rápidas, Menos costosas y con resultados precisos y confiables, contribuyendo así al monitoreo del número básico de los aceites lubricantes para prevenir la corrosión en los motores

VIII. RECOMENDACIONES

Se recomienda ampliar el rango de muestras utilizadas para la calibración del FTIR, incorporando aceites con diferentes formulaciones, niveles de aditivos y grados de degradación, para garantizar la aplicabilidad del método a una mayor variedad de aceites lubricantes en el mercado.

Investigar otras posibles aplicaciones de la espectroscopia infrarroja en el análisis de aceites lubricantes, como la medición de otros parámetros químicos (viscosidad, presencia de combustible, refrigerante) que también contribuyan al monitoreo del desempeño del aceite.

Desarrollar un protocolo claro y estandarizado para el uso del FTIR en la medición del TBN, asegurando que el método sea reproducible y fácilmente implementado en diferentes laboratorios.

XV. REFERENCIAS BIBLIOGRAFICAS

- Alejandro Mideros Romero. (2013). Diseño de un laboratorio de análisis de aceites lubricantes en la Espol para sustentar programas de mantenimiento predictivo. Escuela Superior Politécnica del litoral
- Álvarez Cardona, A, Cortés Marín, E y Álvarez Mejía, F. (1998). Criterios para la selección y aplicación de lubricantes.
- Arteaga, C., Trías, E., & Mendoza, A. (2018). Análisis de Lubricantes. https://www.academia.edu/es/5187356/AN%C3%81LISIS_DE_ACEITES_LUBRICANTES
- Bilotti, F. (2024, mayo 16). La oxidación del lubricante: ¿Cómo prevenirla y garantizar la salud de tu motor o maquinaria industrial? Com.ar. <https://ingenierialiquida.castrolargentina.com.ar/castrol/la-oxidacion-del-lubricante-como-prevenirla-y-garantizar-la-salud-de-tu-motor>
- Cabrera, J., & Carrera, J. (2017). Análisis de la Degradación del Aceite de taxis en la ciudad del Cuenca por dilución de combustible, sus causas y soluciones
- Campus Centinela, 2020. Manual de desarrollo técnico mecánico lubricación. <https://www.campuscentinela.cl/biblioteca-aprendices/file/MANTENIMIENTO%20PLANTA%20CONCENTRADORA/Mec%C3%A1nico%20%20MANUAL%20TECNICO%20MECANICO%20LUBRICACION%20%20NIVEL%20INTERMEDIO.pdf>
- Francisco Javier Garcia, (2010). Mantenimiento de motores de combustión interna. Ediciones Paraninfo
- Frank Jardine (1980) "Engine Corrosion—Its Causes and Avoidance"
- Gómez, Y. (2013). Contribución al desarrollo y mejora para la cuantificación de la degradación en aceites lubricantes usados de MCIA a través de la técnica de espectrometría infrarroja por transformada de Fourier (FT-IR) [Tesis de doctorado, Universidad Politecnica de Valencia]. <https://riunet.upv.es/bitstream/handle/10251/19244/tesisUPV4033.pdf?sequence=1&isAllowed=y>
- Grupos API: aceite básico. (s. f.). Widman International SRL. <https://www.widman.biz/Seleccion/basicos.php>

- harlotte Besser, Karoline Steinschütz, Nicole Dörr, Franz Novotny-Farkas, Günter Allmaier, Impact of engine oil degradation on wear and corrosion caused by acetic acid evaluated by chassis dynamometer bench tests, *Wear*, Volume 317, Issues 1–2, 2014, Pages 64-76,
<https://www.sunderlandco-op.on.ca/Resource-Centre/item/the-importance-of-total-base-number>
- Juan Antonio martos, 2020. Lubricación de equipos y procesos en la industria metalúrgica.
- Licda Lucrecia Arriola. Validación de métodos analíticos, fisicoquímicos y microbiológicos. Guatemala, 2012. Pág 6, 45, 46, 53.
- Noria corporation [Noria]. (2024, 7 abril). El número básico de su lubricante. Noria. Recuperado 9 de octubre de 2024, de <https://noria.mx/lube-learn/el-numero-basico-de-su-lubricante/#:~:text=Generalmente%2C%20mientras%20mayor%20sea%20el,cual%20es%20una%20buena%20caracter%C3%ADstica>.
- Petro Industry News. (s. f.). Advancements in Lubrication Oil Condition Monitoring through FTIR Spectroscopy. Petro Online. <https://www.petro-online.com/article/analytical-instrumentation/11/anton-paar-gmbh/advancements-in-lubrication-oil-condition-monitoring-through-ftir-spectroscopy/3408>
- Ray Chaudhuri, U. (2011). Fundamentals pf petroleum and petrochemical engineering. Boca Ratón: Taylor & Francis Group.
- Sánchez, N. (2008). Motores Diesel. Influencia del contenido de azufre en el combustible. <https://maquinasdebarcos.blogspot.com/2008/12/motores-diesel-influencia-del-contenido.html>
- Wolak, Artur, Jarosław Molenda, Kamil Fijorek y Bartosz Łankiewicz. 2022. “Predicción del Número Base Total (TBN) del Aceite de Motor mediante Espectroscopía FTIR” *Energías* 15, no. 8: 2809. <https://doi.org/10.3390/en15082809>
- Wooton, D. (2007). The lubricant’s nemesis – oxidation. *Practicing Oil Analysis Magazine*. IX, 5-6.