



Disminución del material particulado menor a 10 μm presente en el combustible diésel almacenado en la estación de servicio de una empresa minera mediante el análisis técnico de tecnologías de filtración ofertados en el mercado para reducir los tiempos de inactividad en la flota de vehículos y equipos mineros

Lapo Pineda, Mariuxi Alejandra

Departamento de Ciencias de la Energía y Mecánica

Carrera de Ingeniería en Petroquímica

Trabajo de titulación, previo a la obtención del título de Ingeniera en Petroquímica

Ing. Donoso Quimbita, Caterine Isabel, Msc.

31 de julio del 2020



**DEPARTAMENTO DE CIENCIAS DE LA ENERGÍA Y MECÁNICA
CARRERA DE INGENIERÍA PETROQUÍMICA**

CERTIFICACIÓN

Certifico que el trabajo de titulación, **“Disminución del material particulado menor a 10 μm presente en el combustible diésel almacenado en la estación de servicio de una empresa minera mediante el análisis técnico de tecnologías de filtración ofertados en el mercado para reducir los tiempos de inactividad en la flota de vehículos y equipos mineros”** fue realizado por la señorita **Lapo Pineda, Mariuxi Alejandra** el cual ha sido revisado y analizado en su totalidad por la herramienta de verificación de similitud de contenido; por lo tanto cumple con los requisitos legales, teóricos, científicos, técnicos y metodológicos establecidos por la Universidad de las Fuerzas Armadas ESPE, razón por la cual me permito acreditar y autorizar para que lo sustente públicamente.

Latacunga, julio de 2020

Ing. Donoso Quimbita, Caterine Isabel, MSc.

C. C.: 050250753-6



Urkund Analysis Result

Analysed Document: Tesis Alejandra Lapo Pineda.docx (D76438249)
Submitted: 7/16/2020 4:09:00 PM
Submitted By: loretaibarra@yahoo.es
Significance: 2 %

Sources included in the report:

Tesis Hidrocarburo Condensado (1).pdf (D23136473)
TESIS PROPUESTA DE IMPLEMENTACION.docx (D26829941)
TESIS ALTAMIRANO PABON.pdf (D22894717)
<https://red.uao.edu.co/bitstream/10614/8286/1/T06239.pdf>
https://sswm.info/sites/default/files/reference_attachments/SAGARPA%20s.f.%20Tanques%20de%20almacenamiento%20en%20concreto%20y%20mamposter%C3%ADa.pdf
<https://www.academia.edu/29509597/>
MANUAL_DE_INSPECCION_MANTENIMIENTO_Y_REPARACION_DE_TANQUES_ATMOSFERICOS_A
PI_653_VICEPRESIDENCIA_DE_SERVICIOS_Y_TECNOLOG
<https://docplayer.es/amp/91700223-Brenda-aguirre-ortega.html>

Instances where selected sources appear:

12

A handwritten signature in blue ink, reading 'Caterine Donoso Quimbita', with a dotted line underneath.

**Ing. Donoso Quimbita, Caterine Isabel, MSc.
DIRECTOR**



**DEPARTAMENTO DE CIENCIAS DE LA ENERGÍA Y MECÁNICA
CARRERA DE INGENIERÍA PETROQUÍMICA**

RESPONSABILIDAD DE AUTORÍA

Yo, **Lapo Pineda, Mariuxi Alejandra**, con cédula de ciudadanía n° 172318397-4, declaro que el contenido, ideas y criterios del trabajo de titulación: **Disminución del material particulado menor a 10 μ m presente en el combustible diésel almacenado en la estación de servicio de una empresa minera mediante el análisis técnico de tecnologías de filtración ofertados en el mercado para reducir los tiempos de inactividad en la flota de vehículos y equipos mineros** es de mi autoría y responsabilidad, cumpliendo con los requisitos legales, teóricos, científicos, técnicos, y metodológicos establecidos por la Universidad de las Fuerzas Armadas ESPE, respetando los derechos intelectuales de terceros y referenciando las citas bibliográficas.

Latacunga, julio de 2020

Lapo Pineda, Mariuxi Alejandra

C.C.: 172318397-4



**DEPARTAMENTO DE CIENCIAS DE LA ENERGÍA Y MECÁNICA
CARRERA DE INGENIERÍA PETROQUÍMICA**

AUTORIZACIÓN DE PUBLICACIÓN

Yo **Lapo Pineda, Mariuxi Alejandra**, con cédula de ciudadanía n° 172318397-4, autorizo a la Universidad de las Fuerzas Armadas ESPE publicar el trabajo de titulación: **Disminución del material particulado menor a 10 μm presente en el combustible diésel almacenado en la estación de servicio de una empresa minera mediante el análisis técnico de tecnologías de filtración ofertados en el mercado para reducir los tiempos de inactividad en la flota de vehículos y equipos mineros** en el Repositorio Institucional, cuyo contenido, ideas y criterios son de mi responsabilidad.

Latacunga, julio 2020

.....
Lapo Pineda, Mariuxi Alejandra

C.C.: 172318397-4

DEDICATORIA

Dedico este trabajo de titulación a mis amados padres, por su sabiduría, sacrificios, enseñanzas, dedicación y profundo amor que ha permitido realizarme de manera personal y profesional.

A mis abuelitas Angelita Pineda y Rosita Barriga por su presencia y consentirme en mis primeros años de vida, e infinitas bendiciones desde el cielo.

Alejandra Lapo Pineda

AGRADECIMIENTOS

Agradezco a mi madre Rosita Pineda y mi padre Darwin Lapo, quienes con su amor incondicional me han apoyado y enseñado a aferrarme a mis sueños a pesar de los diversos obstáculos que estén involucrados.

A mis tías Angélica, Mariana y Miriamcita, quienes siempre han estado pendientes de mí y me han aconsejado cariñosamente.

A mis tíos César, José, Manuel y Miguel, por enseñarme que un oficio laboral debe ser una pasión que impulse a mi superación.

A mis amigas Kimy y Jessi, por su valiosa amistad que, a pesar de la distancia, jamás perdió su esencia.

A mis amigos Wladimir, Cristian, Willam y Jorge, con quienes compartí la universidad y, me alegran con sus ocurrencias y franquezas.

También, a Juan Pablo quien con su cariño y apoyo ha estado en los momentos más importantes de mi vida universitaria.

Un infinito agradecimiento a la Ing. Caterine Donoso por su entusiasmo y carisma por colaborarme como tutora en el presente proyecto.

Gracias al Ing. Carlos Tasipanta, Ing. Washington Siza e Ing. Jaime Paspuel por su paciencia y consejos.

Agradezco a la empresa Lundin Gold por su colaboración y haberme brindado todas las facilidades para elaborar el presente trabajo. En especial al Ing. Iván Salinas, Ing. José Balacco, Ing. Ricardo Lozoya, Ing. Franklin Cueva e Ing. Karina Alarcón.

Gracias al Sr. Byron Romero, Sr. Gonzalo Castillo, Sr. Anderson Chamba y Sr. Jorge Armijos por su indudable colaboración.

Alejandra Lapo Pineda

ÍNDICE DE CONTENIDOS

1	CARÁTULA	1
2	CERTIFICACIÓN	2
3	REPORTE URKUND	3
4	RESPONSABILIDAD DE AUTORÍA	4
5	AUTORIZACIÓN DE PUBLICACIÓN.....	5
6	DEDICATORIA.....	6
7	AGRADECIMIENTOS	7
8	ÍNDICE DE CONTENIDOS.....	8
9	ÍNDICE DE TABLAS	11
10	ÍNDICE DE FIGURAS	12
11	ÍNDICE DE ECUACIONES.....	14
12	RESUMEN	15
13	ABSTRACT.....	16
14	INTRODUCCIÓN.....	17
14.1	Antecedentes.....	17
14.2	Planteamiento del Problema.....	18
14.3	Justificación e Importancia.....	19
14.4	Objetivos.....	20
14.4.1	<i>Objetivo General</i>	20
14.4.2	<i>Objetivos Específicos</i>	20
15	FUNDAMENTACIÓN TEÓRICA.....	21
15.1	Diésel	21
15.1.1	<i>Clasificación del Diésel</i>	21
15.2	Caracterización del Diésel	22
15.2.1	<i>Densidad</i>	23
15.2.2	<i>Viscosidad Cinemática a 40 °C</i>	23
15.2.3	<i>Punto de Inflamación</i>	23
15.2.4	<i>Contenido de Agua y Sedimentos</i>	24

15.2.5	<i>Contenido de Residuo de Carbón sobre el 10% del Residuo de la Destilación</i>	24
15.2.6	<i>Contenido de Cenizas</i>	24
15.2.7	<i>Temperatura de Destilación del 90%</i>	25
15.2.8	<i>Contenido de Azufre</i>	25
15.2.9	<i>Corrosión a la Lámina de Cobre</i>	25
15.2.10	<i>Índice de Cetano Calculado</i>	26
15.2.11	<i>Conteo y Clasificación de Partículas</i>	26
15.3	Contaminantes del Combustible	29
15.3.1	<i>Agua</i>	29
15.3.2	<i>Hongos y Bacterias</i>	29
15.3.3	<i>Cera o Parafina</i>	30
15.3.4	<i>Alquitranes</i>	30
15.3.5	<i>Sedimentos y Otros Sólidos</i>	30
15.4	Tanques de Almacenamiento	30
15.4.1	<i>Componentes de un Tanque de Almacenamiento</i>	32
15.5	Métodos de Separación	35
15.5.1	<i>Filtración</i>	35
15.6	Mapa de Innovación	38
15.7	Proceso de Análisis Jerárquico (AHP)	39
15.7.1	<i>Criterios para Determinar la Mejor Tecnología o Proceso</i>	40
15.7.2	<i>Pasos del Método AHP</i>	41
16	METODOLOGÍA EXPERIMENTAL	43
16.1	Descripción de la Estación de Servicio del Proyecto Fruta del Norte	43
16.2	Muestreo de Combustible	54
16.3	Caracterización de Combustible	55
16.3.1	<i>Materiales y Equipos</i>	56
16.3.2	<i>Determinación de las Propiedades del Combustible Diésel</i>	56
16.4	Análisis de Tecnologías de Filtración	67

		10
16.4.1	<i>Sistema de Prefiltrado Instalado en Estación de Servicio</i>	68
16.4.2	<i>Tecnología de Filtración de Donaldson</i>	68
16.4.3	<i>Tecnología de Filtración de Fscheme & Harvard</i>	70
16.5	Selección Técnica de la Mejor Tecnología de Filtración	72
16.5.1	<i>Mapa de Innovación</i>	72
16.5.2	<i>Matriz para la Selección de la Mejor Tecnología</i>	73
16.5.3	<i>Implementación de la Mejor Tecnología de Filtración</i>	74
17	ANÁLISIS Y DISCUSIÓN DE RESULTADOS	75
17.1	Caracterización del Combustible Diésel Premium	75
17.1.1	<i>Propiedades Fisicoquímicas del Combustible Diésel Premium</i>	75
17.1.2	<i>Densidad</i>	76
17.1.3	<i>Clasificación de Partículas</i>	77
17.1.4	<i>Conteo de Partículas</i>	78
17.2	Análisis de tecnologías de filtración	79
17.2.1	<i>Sistema de Prefiltrado Instalado en la Estación de Servicio</i>	79
17.2.2	<i>Tecnologías Ofertadas por el Mercado</i>	80
17.3	Selección Técnica de la Mejor Tecnología de Filtración	80
17.3.1	<i>Propuesta Técnica de Tecnologías de Filtración</i>	80
17.3.2	<i>Método AHP</i>	82
17.3.3	<i>Implementación de la Tecnología Seleccionada</i>	85
17.3.4	<i>Conteo de Partículas</i>	89
16.3.5	<i>Resultado Final</i>	93
18	CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES	95
18.1	Conclusiones	95
18.2	Recomendaciones	96
19	REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS	97
20	ANEXOS	103

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1. <i>Requisitos de diésel según NTE INEN 1489:2012</i>	22
Tabla 2. <i>Rangos de partículas según estándar ISO 4406</i>	27
Tabla 3. <i>Interpretación de escala de ponderación para matrices de comparación.</i> .	40
Tabla 4. <i>Matriz para la selección de la mejor tecnología</i>	42
Tabla 5. <i>Detalle de accesorios y circuitos de control del tanque con cubeto.</i>	44
Tabla 6. <i>Detalle de accesorios y circuitos de control del tanque de doble pared</i>	45
Tabla 7. <i>Detalle de equipos perteneciente a cada surtidor</i>	51
Tabla 8. <i>Equipos empleados en la caracterización de muestras de diésel</i>	56
Tabla 9. <i>Etiquetado de muestras para el análisis de conteo de partículas</i>	67
Tabla 10. <i>Matriz de comparación de tecnología para cada criterio</i>	73
Tabla 11. <i>Matriz A, matriz de comparación de criterios de selección</i>	74
Tabla 12. <i>Matriz para selección de la mejor tecnología.</i>	74
Tabla 13. <i>Resultados de caracterización de muestras de diésel premium</i>	75
Tabla 14. <i>Medición de la densidad de las dos muestras de diésel premium</i>	76
Tabla 15. <i>Resultados de la clasificación de partículas de la muestra 1</i>	77
Tabla 16. <i>Resultados de la clasificación de partículas de la muestra 2</i>	77
Tabla 17. <i>Resultados del análisis de conteo de partículas</i>	78
Tabla 18. <i>Resultados del conteo de partículas empleando el Purificador AK-4000</i> .	79
Tabla 19. <i>Matrices de comparación según especialista</i>	82
Tabla 20. <i>Matrices de comparación según autora del estudio</i>	83
Tabla 21. <i>Matriz de comparación de criterios de selección según especialista</i>	83
Tabla 22. <i>Matriz de comparación de criterios de selección según autora</i>	84
Tabla 23. <i>Peso de los criterios de selección según especialista y autora</i>	84
Tabla 24. <i>Matriz de selección de la mejor tecnología.</i>	84
Tabla 25. <i>Datos para el análisis ANOVA</i>	85
Tabla 26. <i>Análisis de Varianza para la selección de la mejor tecnología</i>	85
Tabla 27. <i>Resultados del sistema de prefiltrado</i>	91
Tabla 28. <i>Rango Beta y eficiencia de mangas filtrantes durante recepción de combustible</i>	91
Tabla 29. <i>Resultados del proceso de diálisis del tanque ES002</i>	92
Tabla 30. <i>Rango Beta y eficiencia de mangas durante diálisis del ES002</i>	92
Tabla 31. <i>Comparación de conteo de partículas en tanques de almacenamiento</i> ...	93
Tabla 32. <i>Comparación de niveles de limpieza en el tanquero</i>	94

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1. <i>Estándar de color de cobre</i>	267
Figura 2. <i>Nivel de limpieza ISO 18/16/13</i>	288
Figura 3. <i>Clasificación de partículas</i>	288
Figura 4. <i>Principales dimensiones geométricas de un tanque horizontal</i>	311
Figura 5. <i>Partes, accesorios y elementos de un tanque de almacenamiento</i>	322
Figura 6. <i>Entrada hombre, ϕ: 600 mm</i>	322
Figura 7. <i>Funcionamiento de una válvula de venteo</i>	333
Figura 8. <i>Respiradores de ventilación de emergencia</i>	333
Figura 9. <i>Indicador de nivel</i>	344
Figura 10. <i>Soportes de un tanque</i>	344
Figura 11. <i>Tamaño de las partículas comunes</i>	366
Figura 12. <i>Bahía de combustible diésel premium del Proyecto Fruta del Norte</i>	433
Figura 13. <i>Distribución de los tanques de almacenamiento (vista superior)</i>	433
Figura 14. <i>Tanque de almacenamiento con cubeto individual</i>	444
Figura 15. <i>Tanque de almacenamiento con doble pared</i>	45
Figura 16. <i>Reloj indicador Morrison Bros</i>	466
Figura 17. <i>Alarma de ventilación Morrison Bros</i>	466
Figura 18. <i>Circuito de control de nivel en tanque de almacenamiento</i>	477
Figura 19. <i>Diagrama de tuberías para el almacenamiento y distribución de combustible en la estación de servicio</i>	48
Figura 20. <i>Diseño del Purificador AK-4000, partes y dimensiones</i>	49
Figura 21. <i>Funcionamiento del Purificador AK-4000</i>	500
Figura 22. <i>Filtro CIM-TEK 40013 y elemento filtrante 30033</i>	522
Figura 23. <i>Dimensiones del filtro CIM-TEK 40013, cabezal y carcasa</i>	522
Figura 24. <i>Dimensiones del elemento filtrante CIM-TEK 30033</i>	533
Figura 25. <i>Filtro CIM-TEK 40186 emplea un elemento filtrante 30034</i>	533
Figura 26. <i>Dimensiones de la carcasa del filtro CIM-TEK 40186 de alto flujo</i>	54
Figura 27. <i>Dimensiones del elemento filtrante 30034</i>	544
Figura 28. <i>Refrigerador TLC15</i>	577
Figura 29. <i>Baño de temperatura constante CT-2000 y viscosímetro Routine</i>	588
Figura 30. <i>Viscosímetro capilar Cannon-Fenske</i>	588
Figura 31. <i>OptiFlash-Pensky Martens</i>	59
Figura 32. <i>Probador automatizado de destilación ad-7</i>	60
Figura 33. <i>Centrífuga para petróleos Digtor 21 C</i>	611
Figura 34. <i>Probador automatizado de residuos de micro carbón ACR-M3</i>	622

Figura 35. <i>Horno de mufla eléctrico.</i>	63
Figura 36. <i>Espectrofotómetro X-Supreme 8000.</i>	64
Figura 37. <i>Recipiente de presión de corrosión de la tira de cobre, NTB Classic ...</i>	655
Figura 38. <i>Analizador automatizado de residuos, LaserNet Q230.</i>	666
Figura 39. <i>Ensamble de cabezales con ocho filtros.</i>	688
Figura 40. <i>Dirección del flujo en el ensamble de ocho filtros.</i>	69
Figura 41. <i>Portafiltros con cuatro elementos filtrantes</i>	70
Figura 42. <i>Partes del portafiltros FS-HF-2-400</i>	71
Figura 43. <i>Partes de elemento filtrante</i>	71
Figura 44. <i>Curvas de destilación para muestra 1 (a) y muestra 2 (b).</i>	766
Figura 45. <i>Mapa de innovación para la selección de la mejorar tecnología de filtración.</i>	811
Figura 46. <i>Filtro Harvard Fschem modelo FS-HF #2-400 (vista frontal y posterior).</i>	86
Figura 47. <i>Filtro FS-HF #2-400 anexo al Filtro AK-4000</i>	866
Figura 48. <i>Apertura y cierre de válvulas para el sistema de prefiltrado</i>	877
Figura 49. <i>Apertura y cierre de válvulas para el sistema de diálisis</i>	888
Figura 50. <i>Contador de partículas portátil, marca Schroeder.</i>	889
Figura 51. <i>Pruebas del sistema de prefiltrado.</i>	889
Figura 52. <i>Pruebas del sistema de diálisis.</i>	90
Figura 53. <i>Comparación visual de muestras, tomadas en el proceso de diálisis.</i> ..	900

ÍNDICE DE ECUACIONES

Ecuación 1. <i>Caída de presión a través de una torta de filtración</i>	37
Ecuación 2. <i>Caída de presión a velocidad constante</i>	37
Ecuación 3. <i>Volumen de filtración en función de velocidad y tiempo</i>	37
Ecuación 4. <i>Caída de presión en función del volumen</i>	37
Ecuación 5. <i>Resistencia de una torta filtrante</i>	37
Ecuación 6. <i>Relación Beta de filtración</i>	38
Ecuación 7. <i>Eficiencia de filtración</i>	38
Ecuación 8. <i>Índice de consistencia</i>	41
Ecuación 9. <i>Índice de consistencia aleatorio</i>	42
Ecuación 10. <i>Razón de consistencia</i>	42
Ecuación 11. <i>Viscosidad cinemática</i>	58
Ecuación 12. <i>Punto de inflamación corregido</i>	59
Ecuación 13. <i>Volumen final en la prueba de contenido de agua y sedimentos</i>	62
Ecuación 14. <i>Porcentaje de contenido de residuo de carbón en una muestra</i>	63
Ecuación 15. <i>Porcentaje de contenido de cenizas</i>	64
Ecuación 16. <i>Índice de cetano calculado</i>	66

RESUMEN

El presente trabajo tiene como propósito reducir el contenido de material particulado en el combustible diésel premium almacenado en una estación de servicio perteneciente a una empresa minera, mediante una tecnología de filtración. Se llevó a cabo los siguientes pasos: descripción de la estación de servicio, caracterización de muestras del combustible, análisis de dos tecnologías de filtración, selección e implementación de la mejor tecnología ofertada. La caracterización del combustible se realizó en base a las propiedades físicas y químicas establecidas en la norma NTE INEN 1489 y, conteo de partículas según el estándar ISO 4406. Al determinar que el nivel de contaminación del combustible supera el código de limpieza ISO 18/16/13 señalado en la Carta Mundial de Combustibles, se analizó dos tecnologías de filtración ofertadas en el mercado nacional considerando los equipos propios de la estación y su consumo de combustible. Para la selección de una de las tecnologías se empleó el Proceso de Análisis Jerárquico, donde se evaluaron seis criterios, entre ellos: peso económico y valor agregado al producto final. Se implementó la tecnología que obtuvo mayor ponderación y ésta permite filtrar el combustible durante la recepción del producto y realizar su mantenimiento en periodos programados denominado diálisis. Posterior a un mes de la implementación del equipo se redujo el material particulado menor a 10 μm en el combustible almacenado en un porcentaje superior al 76% en comparación a las condiciones iniciales; con esto se previene la prematura obstrucción de filtros en los vehículos y equipos mineros.

PALABRAS CLAVE:

- **DIÉSEL PREMIUM**
- **FILTRACIÓN**
- **CONTEO DE PARTÍCULAS**
- **ESTÁNDAR ISO 4406**
- **NTE INEN 1489**

ABSTRACT

The purpose of this work is to reduce particulate matter content in premium diesel fuel stored in a service station belonging to mining company, by means of a filtration technology. The following steps were carried out: description of the service station, characterization of fuel samples, analysis of two filtration technologies, selection and implementation of the best technology offered. The characterization of fuel was based on physical and chemical properties established in the NTE INEN 1489 standard and the particle count according to the ISO 4406 standard. When it was determined that the level of fuel contamination exceeded the ISO 18/16/13 cleaning code set forth in the World Fuel Charter, two filter technologies offered on the national market were analyzed, considering the station's own equipment and its fuel consumption. For the selection of one of the technologies, the Analysis Hierarchical Process was used, where six criteria were evaluated, among them: economic weight and added value to the final product. The technology that obtained the highest weight was implemented and this allows the fuel to be filtered during the reception of the product and its maintenance in programmed periods so-called dialysis. One month after the implementation of the equipment, particulate matter less than 10 µm in the stored fuel was reduced by more than 76% compared to the initial conditions; this prevents premature clogging of filters in mining vehicles and equipment.

KEYWORDS:

- **PREMIUM DIESEL**
- **FILTRATION**
- **PARTICLE COUNT**
- **ISO 4406 STANDAR**
- **NTE INEN 1489**

INTRODUCCIÓN

Antecedentes

En la actualidad se analiza la problemática implícita del avance de la tecnología en los motores diésel, los cuales requieren para su operación un combustible de elevado nivel de limpieza, es decir, diésel libre de suciedad que difícilmente puede ser proporcionado por las refinerías estatales porque el nivel de limpieza no es un requisito en el control de calidad y el hidrocarburo es vulnerable a la suciedad durante el largo circuito de transporte recorrido hasta su disposición final; razón por la cual es recomendable filtrar el diésel antes de ser suministrado al usuario final para mejorar significativamente la calidad del combustible, disminuir su contaminación y aumentar la vida útil de los motores (Tinoco, 2018).

El diésel es un combustible derivado del petróleo y en Ecuador se distribuyen tres variedades, para ser usados en el transporte terrestre, marino y plantas de generación eléctrica. En el trabajo de Hsu (2006) se analizaron las propiedades del diésel, como: número de cetano, punto de ebullición, punto de enturbiamiento, punto de fluidez, densidad viscosidad, color; además, la composición química para correlacionarlas con los problemas de rendimiento, estabilidad de almacenamiento, calidad e impacto ambiental. Por otra parte, Basté (2013) estudió los principales contaminantes del diésel debido a su alta vulnerabilidad a la contaminación durante el bombeo o transferencia y la importancia de la filtración para reducir los problemas causados por los contaminantes, como el desgaste acelerado de los componentes del sistema de combustible de un vehículo.

El material particulado es uno de los principales contaminantes en los combustibles, muy nocivo porque genera desgaste en piezas de los motores que originan fallas; las partículas pueden ser analizadas mediante pruebas de tamaño y forma empleando un contador de partículas para determinar el nivel de contaminación de acuerdo estándar ISO 4406 mediante un código de limpieza (Kučera, Aleš, & Pexa, 2016).

En el trabajo de Euclides Rogel (2014) se analizó el efecto de un tren de filtración en la recepción de combustible de aviación o jet fuel, constituido por cuatro tipos de filtros: pre-filtro micrométrico, filtro de arcilla, filtro micrométrico y filtro separador coalescente; cada uno con un propósito específico para cumplir los requisitos de la norma técnica NTE INEN 2070. Los resultados demuestran que el filtro de arcilla garantiza el cumplimiento de la norma ecuatoriana 2070.

Y finalmente en el trabajo de Nunes y Romero (2015) se evalúan los sistemas de microfiltración de marcas comerciales, Parker Racor y Diésel Limpio con tres proveedores diferentes en estaciones de servicio de Colombia, para reducir las emisiones de gases contaminantes y ahorrar combustible; obteniendo una reducción de hasta el 36,4% de azufre, 73,1% de humedad y 100% de sedimentos.

Planteamiento del Problema

En el sector minero, el diésel es uno de los principales combustibles para el funcionamiento productivo y de transporte. En una mina subterránea, el uso de combustibles convencionales trae consigo problemas y costos de ventilación para lograr condiciones de confort, ambientales y termo-ambientales adecuadas para los trabajadores, la operación de equipos e instalaciones subterráneas. Los mineros subterráneos están expuestos a serios riesgos para la salud por su exposición a partículas de diésel contenidas en los gases de escape liberados por los vehículos pesados diésel y equipos empleados en el transporte de personal y maquinaria de explotación (Córdoba y Molina, 2011).

En un vehículo minero, los motores actuales requieren un combustible estrictamente más limpio para operar de manera eficiente y evitar prematuras obstrucciones del filtro primario instalado en el equipo, que tan solo elimina partículas mayores a 4 micras y las partículas de menor tamaño pasan a través de él generando un problema en el sistema de inyección ya que toda partícula actúa como un pequeño dispositivo abrasivo, perforando el inyector y creando patrones de pulverización ineficientes (Donalson Company, 2013).

La contaminación por material particulado es uno de los problemas más comunes en el combustible diésel debido a que provienen de múltiples fuentes, como: polvo, desechos de desgaste de bombas, tapas de llenado, desechos de corrosión del tanque a granel; y sin olvidar el mal transporte y manejo del combustible (Pilusa, Mollagee, y Muzenda, 2012). El uso de un combustible sucio involucra periodos de inactividad costosos para la empresa, pues se generan más filtros obstruidos y más mantenimientos que requieren de considerables cantidades de dinero (Donalson Company, 2013).

Por ello, la Carta Mundial del Combustible sexta edición estableció el protocolo ISO 4406 para medir el nivel de contaminación mediante una codificación de distribución del tamaño de partícula. El código de limpieza está constituido por tres dígitos, correspondientes a los números de partículas de tamaño mayor a 4, 6 y

14 μm (micrómetros) por mililitro, respectivamente. El requisito del combustible diésel es el código de limpieza 18/16/13, detallado a continuación:

- El número 18 corresponde al rango de 1.300 a 2.500 partículas mayores a 4 μm .
- El número 16 corresponde al rango de 320 a 640 partículas mayores a 6 μm .
- El número 13 corresponde al rango de 40 a 80 partículas mayores a 14 μm (IPU Group, 2016).

Justificación e Importancia

El proyecto aurífero Fruta del Norte (FDN), está ubicado al sureste de Ecuador en la provincia de Zamora Chinchipe, cantón Yantzaza, parroquia Los Encuentros y fue concesionado a la empresa Aurelian Ecuador S.A., filial de la minera canadiense Lundin Gold. FDN es un proyecto minero subterráneo con elevada relevancia en el mundo, debido a su concentración de oro en las rocas del yacimiento con reservas probables de 5,02 millones de onzas de oro y una relación de 8,74 gramos por tonelada (Aguilar y Mera, 2018).

En una empresa minera, el combustible diésel es uno de los insumos estratégicos para su consumo energético, y su conservación es una iniciativa de inversión clave debido a que el proceso de abastecimiento de combustible (suministro, transporte, almacenamiento, distribución y disposición final) es vulnerable a contaminantes como agua, bacterias, sedimentos y otros sólidos.

El proyecto FDN posee un área de almacenamiento de combustible diésel denominada bahía de combustible, constituida por cuatro tanques cilíndricos horizontales aéreos de veinte mil galones (capacidad nominal) cada uno. La instalación cuenta con cuatro surtidores de combustible, uno por cada tanque, destinados al abastecimiento de vehículos livianos y pesados. Los tanques estacionarios se abastecen de combustible mediante camiones cisterna provenientes de estaciones de servicio Terpel ubicadas en las ciudades de Loja y Cuenca.

La bahía de combustible dispone de un purificador AK-4000 fuera de servicio, para la descarga de diésel desde el camión cisterna a los tanques de almacenamiento con la finalidad de retener partículas de hasta 10 μm y el 99% de agua presente en el combustible. Para el suministro de diésel desde los tanques de

almacenamiento a la flota vehicular se utilizan un filtro de uno o dos alojamientos con elementos filtrantes que retienen agua y partículas de hasta 10 μm .

El combustible alimentado y almacenado en los tanques de la estación de servicio no cumple con el código de limpieza 18/16/13 establecido en el estándar ISO 4406, por lo tanto, es necesario instalar un sistema de filtración de combustible que permita reducir la cantidad de partículas menores a 10 μm . El material particulado más pequeño (de 1 a 5 μm) genera un efecto de arenado o desgaste sobre la superficie de las piezas de los motores.

En el presente trabajo de investigación se propone analizar sistemas de filtración ofertados en el mercado, que permitan reducir la cantidad de sólidos suspendidos en el diésel extraído de los tanques de almacenamiento para disminuir los períodos de inactividad causados por obstrucciones de los contaminantes en los sistemas de filtración de combustible en vehículos y equipos de mina.

Objetivos

Objetivo General

Disminuir el material particulado menor a 10 μm presente en el diésel almacenado en la estación de servicio de una empresa minera mediante el análisis técnico de sistemas de filtración ofertados en el mercado para reducir los tiempos de inactividad en la flota de vehículos y equipos mineros.

Objetivos Específicos

- Caracterizar el diésel procedente del tanquero de abastecimiento y el combustible almacenado en los cuatro tanques estacionarios pertenecientes a la empresa minera.
- Analizar técnicamente equipos de filtración propuestos por el mercado.
- Seleccionar la opción técnica de filtros más viable para su implementación en la bahía de combustible de la empresa minera.
- Elaborar una propuesta técnica para la disminución de material particulado menor a 10 μm .
- Implementar el mejor sistema de filtración y determinar el nivel de limpieza alcanzado en el diésel almacenado de la empresa minera.

FUNDAMENTACIÓN TEÓRICA

Diésel

El diésel, gasóleo o gasoil es un hidrocarburo líquido constituido por fracciones intermedias del petróleo que van desde el $C_{12}H_{26}$ al $C_{20}H_{42}$ y se lo obtiene principalmente por la refinación del petróleo mediante destilación fraccionada del crudo a una temperatura entre los 200 °C y 380 °C (Carrillo y Papacristofilou, 2017).

Según Bacha et al., (2007), los usos del diésel están vinculados al fortalecimiento de la economía global, la calidad de vida y la seguridad nacional. Los usos principales del combustible diésel son:

- Transporte en carretera
- Usos fuera de carretera (minería, construcción y tala)
- Transporte ferroviario
- Transporte marítimo
- Transporte militar
- Agricultura
- Generación de energía eléctrica

Clasificación del Diésel

Según la Norma Técnica Ecuatoriana (NTE) INEN 1489:2012, en Ecuador se comercializan tres tipos de combustible diésel, detallados a continuación:

- Diésel No 1. Es el tipo de diésel con mayor número de impurezas y tiende a ser el más barato, es usado en aparatos de combustión externa industriales o domésticos (Carrillo y Papacristofilou, 2017).
- Diésel No 2. Es un diésel filtrado y contiene menos parafinas que el Diésel No. 1, propenso a generar problemas si se emplea en vehículos livianos y camiones (Carrillo y Papacristofilou, 2017). Es empleado en los sectores industrial, pesquero, eléctrico, naviero, entre otros, excepto el automotriz (INEN, 2013a).
- Diésel Premium. Es el tipo de diésel más refinado, contiene aditivos y tiene modificadas algunas propiedades como: número de cetano, operabilidad a baja temperatura, estabilidad, detergencia y valor de calentamiento (Bacha et al., 2007); para evitar la solidificación de parafinas a bajas temperaturas, aportan propiedades que permite reducir el consumo, las emisiones

contaminantes y protegen la bomba y el sistema de inyección (Carrillo y Papacristofilou, 2017). Se emplea como combustible en motores de autoignición para la propulsión de vehículos del sector automotriz a nivel nacional (INEN, 2013a).

En la Tabla 1, se muestran los requisitos para los tres tipos de diésel antes descritos.

Tabla 1.

Requisitos de diésel según NTE INEN 1489:2012

Requisitos	Diésel no. 1	Diésel No. 2	Diésel Premium
Punto de inflamación	40 °C	51 °C	51 °C
Contenido de agua y sedimento	0,05 %	0,05 %	0,05 %
Contenido de residuo carbono sobre el 10% del residuo de destilación	0,15 %	0,15 %	0,15 %
Contenido de cenizas	0,01 %	0,01 %	0,01 %
Temperatura de destilación del 90%	288 °C	360 °C	360 °C
Viscosidad cinemática a 40°C	1,3 – 3,0 cSt	2,0 – 5,0 mm ² /s	2,0 – 5,0 mm ² /s
Contenido de azufre	0,3 %	0,7 %	500 ppm
Corrosión a la lámina de cobre (Clasificación)	No. 2	No. 3	No. 3
Índice de cetano calculado	40	45	45
Contenido de biodiésel	-	5 %	5 – 10 %

Nota. Adaptado de *Requisitos del diésel No. 1, No. 2 y diésel premium*, por INEN, 2013a.

A nivel internacional, la norma ASTM D975-19 desarrollada por la Sociedad Estadounidense para Pruebas y Materiales (American Society for Testing and Materials por sus siglas en inglés) especifica los requisitos de siete grados de fuelóleos diésel, segmentados en tres grupos de acuerdo al orden de densidad y viscosidad creciente (1-D, 2-D y 4-D). El combustible diésel Grado No. 1-D es el más ligero y el No. 4-D es el más pesado (Hernández, Santamaría, y Ríos, 2009).

Caracterización del Diésel

Para determinar los requisitos de los combustibles diésel (Tabla 1), el Instituto Ecuatoriano de Normalización (INEN) establece propiedades físicas y químicas a ser analizadas para analizar su desempeño al facilitar la volatilización, el flujo en líneas de combustible y la estabilidad del almacenamiento.

Densidad

La densidad (ρ) es la relación entre la masa y volumen de una sustancia a una temperatura determinada, en productos derivados del petróleo esta medida permite la conversión de volúmenes medidos en volúmenes o masas a la temperatura estándar 15,6 °C (60 °F) (Bolt y Hall, 2018).

Uno de los métodos adoptados por la ASTM para medir la densidad es el D1298, donde se emplea un hidrómetro que es sumergido en el diésel de prueba a una temperatura específica. Para el diésel de transporte la densidad a 15 °C oscila entre 0,80 – 0,86 g/ml (Hsu, 2006).

Viscosidad Cinemática a 40 °C

La viscosidad es la resistencia de un líquido a desplazarse bajo el efecto de la gravedad, expresado en milímetros cuadrados por segundo (mm^2/s) o centistokes (cSt) (Bolt y Hall, 2018). La viscosidad cinemática resulta del tiempo de flujo medido por la constante de calibración del viscosímetro, mediante el procedimiento de la norma ASTM D445 se realiza esta prueba que consiste en medir el tiempo que toma un volumen fijo de combustible en fluir a través de un viscosímetro calibrado de tipo capilar de vidrio a una temperatura estándar controlada (Hsu, 2006). La viscosidad cinemática para el diésel premium en Ecuador es de 2,0 a 5,0 mm^2/s a 40 °C (INEN, 2013a).

Punto de Inflamación

El punto de inflamación es la temperatura mínima de un combustible líquido que al ser calentado emite vapores y en presencia de una fuente de ignición o chispa se combustionan bajo condiciones controladas, para detectar la contaminación de materiales relativamente no volátiles ni inflamables con materiales de alta volatilidad (INEN, 2013b).

Según la NTE INEN 1493, el ensayo consiste en colocar la muestra de combustible diésel en una copa de broce hasta la marca interna, calentar y cubrir con una tapa adecuada, luego agitar la muestra a velocidad constante. Luego, para detectar el punto de inflamación acercar una fuente de ignición hacia el interior de la copa de ensayo a intervalos con interrupción simultánea. El punto de inflamación de diésel para el diésel premium es 51 °C (INEN, 2013a).

Contenido de Agua y Sedimentos

En el gasoil, el agua y los sedimentos generan problemas como taponamiento de filtros y daños en el motor debido al aumento de corrosión. Para determinar este parámetro se usa el procedimiento de la norma ASTM D1796 que consiste en preparar una mezcla de volúmenes iguales de diésel y tolueno saturado de agua, colocarla en un tubo de centrifugación y luego someter a centrifugación, finalmente realizar la lectura de los volúmenes de las capas de agua y sedimento en el fondo del tubo (Hsu, 2006). Generalmente para el diésel premium en Ecuador el contenido de agua y sedimentos no debe de superar el 0,05 % (INEN, 2013a).

Contenido de Residuo de Carbón sobre el 10% del Residuo de la Destilación

El residuo de carbón es la cantidad y tipo de material carbonoso que se encuentra en el combustible tras la vaporización de todos los componentes volátiles en ausencia de aire. Este parámetro permite evaluar la tendencia del combustible a formar depósitos de material carbonoso, debido a que pequeñas cantidades de depósitos duros y abrasivos pueden ser más peligrosos que grandes depósitos blandos y esponjosos (Bolt y Hall, 2018).

Esta prueba se puede realizar mediante los procedimientos de las normas NTE INEN 1491 o ASTM D453, esta última requiere cantidades de muestra más pequeñas. En el diésel premium este requisito puede tener un valor máximo de hasta 0,15 % (INEN, 2013a).

Contenido de Cenizas

Las cenizas en los combustibles son pequeñas cantidades de material no combustible en forma de partículas sólidas y compuestos metálicos solubles en aceite o agua, que pueden oxidarse o modificarse durante la ignición del combustible, expresado como un porcentaje en peso del combustible. El procedimiento para esta prueba se describe en la norma ASTM D482, que consiste en quemar una pequeña cantidad de combustible en un recipiente adecuado hasta que se consuma totalmente, el residuo no quemable se coloca en una mufla a 775 °C y se pesa una vez que se ha enfriado a temperatura ambiente (Bolt y Hall, 2018). En el diésel premium este requisito no debe superar el 0,01% (INEN, 2013a).

Temperatura de Destilación del 90%

Los límites de destilación o rango de ebullición se definen como las temperaturas entre el punto de ebullición inicial y el punto de ebullición final, que proporciona información sobre la composición, comportamiento durante su almacenamiento y uso para garantizar que el combustible tenga una volatilidad adecuada y controlar la formación de vapores. Para determinar el rango de ebullición se puede emplear el método de prueba ASTM D86 que requiere un volumen bastante grande de muestra porque la muestra se analiza en una columna teórica de 15 platos (Hsu, 2006). En el diésel premium el valor máximo para este requisito es 360 °C (INEN, 2013a).

Contenido de Azufre

El azufre en el combustible se presenta en forma de compuestos como: mercaptanos, sulfuros, disulfuros, tiofenos o compuestos heterocíclicos; su cantidad depende del origen del petróleo y los métodos de refinación empleados. El azufre puede generar desgaste prematuro en los motores diésel debido a que al mezclarse con agua forma soluciones ácidas que corroen los componentes metálicos y piezas móviles (Bolt y Hall, 2018).

Para medir el azufre total en el combustible diésel se puede emplear el procedimiento descrito en las normas ASTM D 4294 o NTE INEN 1490:2013, en la NTE INEN la muestra se coloca en un dispositivo de Descomposición a alta presión o bomba donde ésta se oxida por combustión y el azufre presente se manifiesta en los lavados del dispositivo como sulfato de bario mediante gravimetría (INEN, 2013c). En el diésel premium, el contenido máximo de azufre es de 500 ppm (INEN, 2013a).

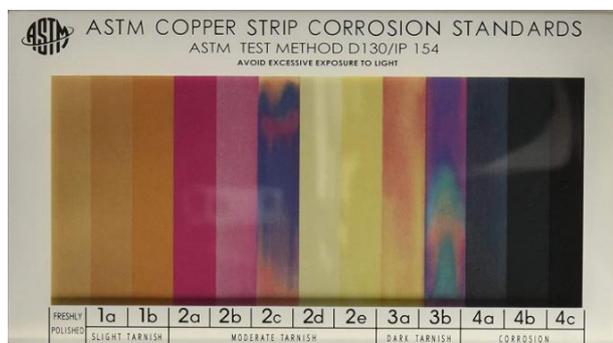
Corrosión a la Lámina de Cobre

La corrosión a la lámina de cobre es un ensayo que permite determinar cuantitativamente las tendencias corrosivas de los productos de combustión del combustible e indica el grado de corrosión del combustible no quemado (Bolt y Hall, 2018). El método de ensayo de esta prueba se describe en la norma NTE INEN 927 o ASTM D130, consiste en sumergir una lámina de cobre pulida en 30 mL de diésel completamente limpio y libre de agua suspendida a 50 °C durante tres horas,

transcurrido el tiempo señalado analizar la lámina con el Patrón de referencia ASTM para corrosión de la lámina de cobre (INEN, 2013d) que se muestra en Figura 1.

Figura 1.

Estándar de color de cobre



Nota. Tomado de *ASTM Cooper strip corrosión standards* (p.1), por Tribologik, 2013.

Índice de Cetano Calculado

El número de cetano determina el rendimiento de ignición del diésel al compararlo con combustibles de referencia como *n*-hexadecano o cetano normal y α -metilnaftaleno a los cuales se les asigno un número de cetano de cien y cero respectivamente; esta medida influye en la capacidad de arranque, el humo blanco y la rugosidad de la combustión. Para calcular el índice de cetano, partir de la gravedad API y el punto de ebullición medio (norma ASTM D976) (Hsu, 2006). En el requisito mínimo de este parámetro en el diésel premium ecuatoriano es 45 (INEN, 2013a).

Conteo y Clasificación de Partículas

El conteo y clasificación de partículas es la medida de contaminación sólida en el seno de un fluido en función del tamaño versus la concentración de partículas y permite determinar el grado de limpieza de un combustible mediante las escalas ISO 4406, NAS 1638 y NAVAIR 01-1 (Bilbao y Málaga, 2012).

La escala o norma de limpieza ISO 4406:1999 es una codificación que considera la distribución del tamaño de partículas expresada mediante tres dígitos comprendidos entre los números 1 – 28 (ver Tabla 2) considerando que cada aumento del número de código indica que la cantidad de partículas se duplica y si el contenido de partículas es elevado mostrará valores elevados caso contrario valores bajos. La codificación consta de tres dígitos que corresponden al número total de

partículas del tamaño superior a 4 µm (micrómetros), 6 µm y 14 µm, respectivamente, en un mililitro de fluido. Los tamaños de partículas mayores de cuatro y seis micras indican la tendencia a formar depósitos y los mayores a catorce micras indican la cantidad de partículas grandes que contribuyen a un posible fallo catastrófico de un componente (Bilbao y Málaga, 2012).

Tabla 2.

Rangos de partículas según estándar ISO 4406

Código ISO	Rango de partículas por mL
28	2 500.000 – 1 300.000
27	1 300.000 – 640.000
26	640.000 – 320.000
25	320.000 – 160.000
24	160.000 – 80.000
23	80.000 – 40.000
22	40.000 – 20.000
21	20.000 – 10.000
20	10.000 – 5.000
19	5.000 – 2.500
18	2.500 – 1.300
17	1.300 – 640
16	640 – 320
15	320 – 160
14	160 – 80
13	80 – 40
12	40 – 20
11	20 – 10
10	10 – 5
9	5 – 2,5
8	2,5 – 1,3
7	1,3 – 0,64
6	0,64 – 0,32

Nota. Adaptado de *ISO 4406:1999* (p.23), por IPU Group, 2016.

La Carta Mundial del Combustible establece el código de limpieza ISO 18/16/16 para el diésel de transportes (ver Figura 2), en la boquilla de la estación de combustible (ACEA, ALLIANCE, EMA, y JAMA, 2019).

Figura 2.

Nivel de limpieza ISO 18/16/13



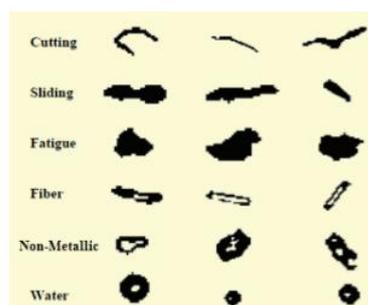
Nota. Tomado de *Combustible a diferentes niveles de limpieza bajo el microscopio* (p.1), por Donalson Company, 2017.

Con respecto a la clasificación de las partículas (ver Figura 3), toda partícula mayor de 20 μm se clasifica en una de las siguientes categorías:

- Desgaste de corte, se asemeja a un hilo en forma alargada, curva o rizada y proviene de un desgaste adhesivo.
- Desgaste deslizante severo, presenta forma de escamas es decir más larga que ancha con bordes rectos y procede del cizallamiento entre superficies móviles.
- Fatiga, presentan características de esfera de forma ancha con bordes irregulares y proviene de la tensión del metal que conduce al desgaste de partículas.
- No metálicas, se reconocen por su transparencia parcial que indica una composición no metálica o contaminantes metálicos sin desgaste.
- Fibras, presentan forma alargada y transparencia parcial, se deben a desprendimientos de filtros y contaminación externa.
- Agua libre, presenta forma de círculos oscuros con grandes centros brillantes.

Figura 3.

Clasificación de partículas



Nota. Tomado de *Examples of particle class morphology* (p.45), por Spectro Scientific, 2017.

Contaminantes del Combustible

Los principales contaminantes del diésel son:

Agua

El agua es el principal contaminante en el diésel, debido a que puede introducirse durante la manipulación del combustible (en la transferencia de combustible cuando el aire caliente con alta humedad se condensa en las paredes del tanque de almacenamiento) o por malas prácticas de limpieza (Basté, 2013). El agua en el diésel posee dos presentaciones, como: agua adicionada o free water y agua atrapada en la estructura molecular del combustible (Acevedo y Herrera, 2000).

Las principales consecuencias que ocasiona el agua en el diésel son: reducción de lubricidad del combustible y daños por corrosión en los tanques de almacenamiento, líneas de combustibles, bombas de inyección, filtros e inyectores de vehículos (Acevedo y Herrera, 2000).

El límite máximo permitido de agua en el diésel es de 0,05% y si dicho valor es superado, los sistemas de filtración o separación captan una porción determinada de agua y la cantidad restante requiere de un tratamiento químico o mecánico, con un aditivo que provea de propiedades neutralizantes a la acción del agua o un sistema de centrifugación, respectivamente (Salas, 1994).

Hongos y Bacterias

Los hongos y bacterias también conocidos como Humbugs (incluyen a levaduras) son microorganismos que viven en el agua generalmente en tanques y tuberías, se alimentan de los hidrocarburos del combustible y su dispersión genera obstrucción en los filtros, formación de mucosidades, corrosión en los tanques de almacenamiento y cambio de las propiedades físico-químicas del diésel con sus respectivas consecuencias (Salas, 1994). Las bacterias se presentan generalmente de color negro, verdes o cafés y se reducen mediante el drenado, pero no se eliminan. Para eliminar el incremento de bacterias es necesario limpiar y tratar el sistema con un biocida (Basté, 2013).

Cera o Parafina

La cera es considerada una fuente de energía en el combustible y siempre está presente, pero en el clima frío es necesario su control ya que forma cristales cuando supera el punto de enturbiamiento del diésel generando bloques del flujo de combustible a través de rejillas, filtros y otros pasajes restringidos en el sistema de combustible (Basté, 2013).

Alquitranes

Los alquitranes negros como la brea son componentes del asfalto y siempre están en el diésel. Un elevado contenido de alquitranes en el diésel disminuye significativamente la vida del filtro de combustible (Basté, 2013).

Sedimentos y Otros Sólidos

Los sedimentos y sólidos provienen de la refinación del combustible, tuberías y tanques cisternas que lo transportan, tanques del surtidor, mangueras de transferencia y el aire que reemplaza el combustible en cada tanque mientras se consume diésel. Estos contaminantes pueden ser removidos por sedimentación o filtración (Basté, 2013). Estos contaminantes pueden prematuramente causar la obstrucción de los filtros de combustible y el desgaste de piezas del sistema de inyección de combustible (ACEA et al., 2019).

El material particulado de diésel (DPM) involucra a partículas finas y ultrafinas ($< 0.1 \mu\text{m}$ de diámetro) compuestas por: 75% carbono elemental, 19% compuestos orgánicos (hidrocarburos aromáticos policíclicos HAP, nitro-HAP), 2% minerales, 1% sulfato y nitrato, y 3% otros oligoelementos (Wichmann, 2007).

Tanques de Almacenamiento

Según Acosta, Desdín, Cano, y Rivas (2017), los tanques de almacenamiento son un conjunto de recipientes (estructuras relativamente flexibles) construidos generalmente de acero en forma cilíndrica de eje vertical u horizontal, se emplean como depósitos para contener líquidos tóxicos, combustibles e inflamables para su posterior uso y/o comercialización y, se encuentran en la mayoría de las industrias.

En la actualidad, existe una amplia variedad de tanques de almacenamiento y, su uso y ubicación depende al tipo de proyecto a desarrollar. En este trabajo solo se considerarán los tanques cilíndricos horizontales superficiales.

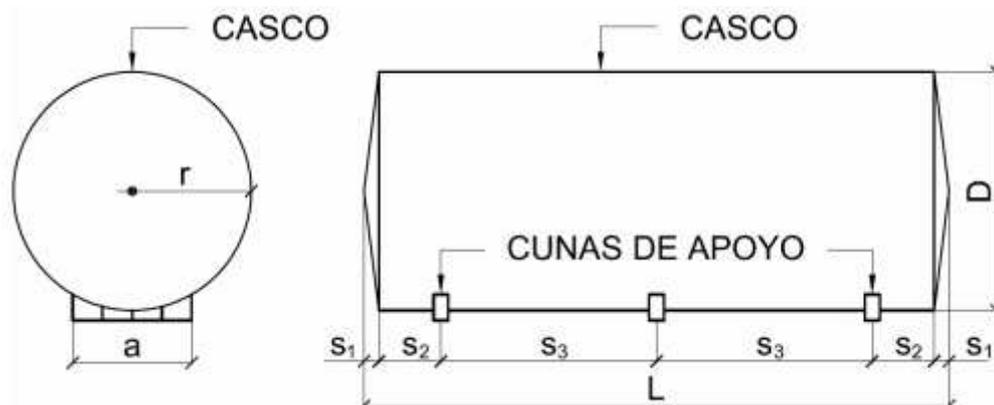
Un tanque superficial es aquel tanque cuyas paredes laterales y techo están sobre la superficie y en contacto con la atmósfera, estos a su vez se clasifican según su presión interna en: tanques atmosféricos, tanques refrigerados y tanques térmicos; detallados a continuación.

- Tanque atmosférico es aquel que usualmente opera a presiones internas ligeramente superiores a la presión atmosférica o contienen líquidos que tienen una presión de vapor máxima de $0,9174 \text{ kg/cm}^2$ (13 psia) a nivel del mar; estos a su vez se subclasifican en tanques de techo fijo y techo flotante (Ecopetrol, 2011).
- Tanque refrigerado o criogénico se utilizan para almacenar gases licuados del petróleo y otros fluidos que tienen un punto de ebullición entre $-167,7 \text{ }^\circ\text{C}$ a $-1,1 \text{ }^\circ\text{C}$, se subclasifican en recipientes a presión, esferas a presión y tanques cilíndricos verticales (Ecopetrol, 2011).
- Tanques térmicos son instalaciones que permiten el flujo de líquidos de alta viscosidad al modificar la temperatura, viscosidad o punto de escurrimiento (Ecopetrol, 2011).

Los tanques poseen un cuerpo cilíndrico con extremos planos o cónicos, según su geometría sus principales dimensiones son: longitud total del tanque (L), diámetro del cilindro (D), profundidad de extremo (s_1), separación (s_3) y ancho de soportes de apoyo (a) (ver Figura 4) (Jaca & Burgos, 2013).

Figura 4.

Principales dimensiones geométricas de un tanque horizontal



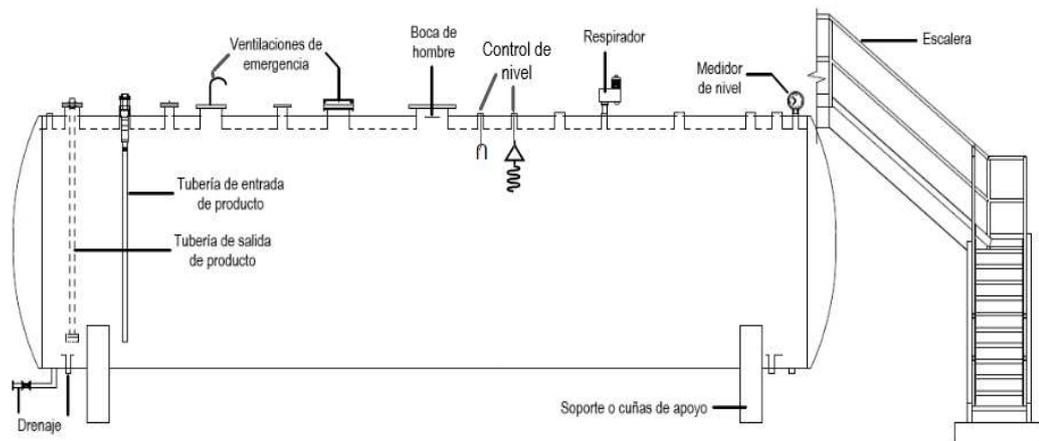
Nota. Tomado de "Evaluación de fallas de tanques horizontales de almacenamiento de fluido" (p.3465), por Jaca y Burgos, 2013, *Mecánica Computacional*, XXXII.

Componentes de un Tanque de Almacenamiento

Todo tanque de almacenamiento está provisto de boquillas bridadas o roscadas que permiten la entrada y salida de productos, ventilación, drenaje con o sin sumidero, entrada de hombre para el ingreso del personal de mantenimiento y conexiones para controles de nivel. En la Figura 5 se muestran las principales partes, elementos y accesorios de un tanque de almacenamiento.

Figura 5.

Partes, accesorios y elementos de un tanque de almacenamiento



Los principales accesorios y elementos de un tanque de almacenamiento se listan a continuación:

- Entrada de hombre, boca de hombre o manhole (en inglés). Es una abertura en el techo o cuerpo del tanque como se muestra en la Figura 6, sirve para tener acceso al interior del depósito y realizar limpiezas, revisiones o reparaciones. La norma API 650 recomienda un diámetro de 600 mm (24 in) REPORT.

Figura 6.

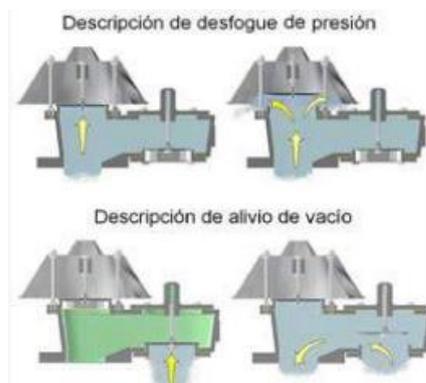
Entrada hombre, ϕ : 600 mm



- Válvula de venteo o respirador. Es un dispositivo que permite la ventilación normal o respiración del tanque durante la operación de llenado y extracción de fluido, donde se alivia la presión y produce el vacío, respectivamente (ver Figura 7); un dimensionamiento incorrecto de ventilación normal provoca un exceso de presión negativa dentro del tanque causando que el tanque colapse dentro de sí mismo (Fuelchief, 2019).

Figura 7.

Funcionamiento de una válvula de venteo



Nota. Adaptado de *Válvulas de venteo* (p.2), por Protectotank, 2008.

- Ventilaciones de emergencia. Son elementos diseñados para liberar una presión excesiva producto de una situación crítica como un incendio, para evitar que el tanque se sobrepresurice y/o se rompa (Fuelchief, 2020), los dispositivos usados para este tipo de ventilación son respiraderos en forma de tapas con bridas y tubos de ventilación en forma de J invertida con diámetro interno mínimo de 25 mm para tanques de capacidades menores o iguales a 3000 L y de 40 mm para tanques de capacidades superiores (ver Figura 8).

Figura 8.

Respiradores de ventilación de emergencia



- Indicador de nivel. Es un accesorio colocado en una abertura superior del tanque para medir el nivel del combustible almacenado, éste se activa mediante un flotador conectado con un cable, ver Figura 9.

Figura 9.

Indicador de nivel



Nota. Recuperado de (Morrison Bros, 2020)

- Escalera de acceso. Es un elemento importante para realizar limpiezas, revisiones o reparaciones a dispositivos ubicados en el techo del tanque de almacenamiento y además facilita el ingreso al interior del depósito.
- Soportes o cunas de apoyo. Son elementos que mantienen elevada la posición del tanque para facilitar la inspección del fondo, su forma acompaña la forma cilíndrica del tanque (ver Figura 10) y están unidos al tanque mediante una chapa soldada para reforzar la zona de contacto presentando diferentes formas en la parte inferior vertical (Jaca y Burgos, 2013).

Figura 10.

Soportes de un tanque



Nota. Adaptado de “Evaluación de fallas de tanques horizontales de almacenamiento de fluidos” (p. 3466), por Jaca y Burgos, 2013, *Mecánica computacional*, XXXII.

Métodos de Separación

Los métodos de separación consisten en fuerzas físico-mecánicas tales como la gravitación, la centrifugación y cinética de los flujos que actúan sobre partículas, líquidos o mezclas de partículas y líquidos y no sobre moléculas individuales (Geankoplis, 1998). A continuación, se detalla el mecanismo de filtración para la eliminación de partículas.

Filtración

La filtración es la separación de partículas sólidas suspendidas en un fluido (líquido o gas) mediante el paso del fluido a través de un medio filtrante o pared separadora sobre el que se depositan los sólidos formando una torta porosa, estableciéndose una diferencia de presión entre el fluido que fluye y los poros pequeños que impiden el paso de las partículas sólidas. En esta operación la corriente valiosa puede ser el fluido filtrado, los sólidos o ambos (McCabe, Smith, y Harriott, 2007).

En la industria, la filtración puede ser tan sencilla como un colado o tan complicada como separaciones altamente complejas, por ello se han desarrollado múltiples tipos de filtros de acuerdo a:

- Ciclos de operación: Pueden ser continuos o discontinuos (por lotes), dependiendo de la forma en la que se realice la descarga de sólidos filtrados (McCabe et al., 2007).
- Diferencia de presión a través del medio filtrante: Pueden ser filtros a presión (superiores e inferiores a la presión atmosférica), al vacío o centrífugos (Geankoplis, 1998).
- Mecanismo de filtración: Pueden ser filtros de torta (empleado en separaciones sólido-líquido y separan grandes cantidades de sólidos formando una torta o lodo), filtros clarificadores (retiran pequeñas cantidades de sólidos para producir fluidos limpios o transparentes) y filtros de flujo transversal (los sólidos retirados forman una suspensión más concentrada) (McCabe et al., 2007).

Las partículas sólidas suspendidas en un fluido pueden ser de tamaños variables (ver Figura 11), como: muy finas (en micrómetros) o bastante grandes, muy rígidas o plásticas, esféricas, de forma muy irregular o partículas individuales (Geankoplis, 1998).

Figura 11.

Tamaño de las partículas comunes

TAMAÑO DE LAS PARTÍCULAS COMUNES	
Grano de sal de mesa	100 μm
Cabello humano	80 μm
Glóbulo blanco	25 μm
Talco en polvo	10 μm
Glóbulo rojo	8 μm
Limo	<5 μm
Bacterias	2 μm

Nota. Aptado de *Tamaño de las partículas comunes* (p. 2), por Donalson Company, 2013.

De modo que, los filtros pueden ser calificados como absolutos o nominales, donde el punto de corte o diámetro de poro del medio filtrante generalmente expresado en μm o micras, es exacto y consistente para los filtros absolutos y, con un valor arbitrario en términos de retención porcentual para los filtros nominales (Sparks & Chase, 2016).

Por otra parte, los equipos de filtración constan básicamente de:

- Un soporte mecánico para sostener el medio filtrante denominado portafiltros.
- Conductos por los que el fluido en estudio entra y sale.
- Dispositivos para extraer la torta.

Medios Filtrantes. McCabe et al. (2007) afirma que, en cualquier filtro el medio filtrante debe de cumplir con los siguientes requerimientos:

- Retener los sólidos a filtrar para producir un filtrado transparente.
- No obstruirse con facilidad para que no afecte a la velocidad del proceso.
- Ser químicamente resistente y tener suficiente resistencia física para soportar las condiciones del proceso.
- Permitir que la torta formada se desprenda sin dificultades.
- No ser excesivamente costoso.

Algunos medios de filtración de uso común para líquidos corrosivos son telas de: lana, acero inoxidable, vidrio o papel; las fibras sintéticas como nailon, propileno y varios poliésteres poseen elevada resistencia química y las fibras naturales son eficaces para separar partículas finas.

Fundamentos de la Filtración. En la filtración, las principales magnitudes de interés son la velocidad de flujo a través del filtro, la caída de presión, el tiempo de residencia y la eficiencia del filtro; descritas en las siguientes ecuaciones:

La ecuación 1 describe la caída de presión del fluido a través de la torta

$$-\frac{\Delta p}{L} = \frac{32\mu v}{D^2} \quad (1)$$

donde: Δp es la caída de presión en Nm^{-2} , L es longitud en m , v es la velocidad en el tubo abierto en ms^{-1} , μ es la viscosidad en $Pa \cdot s$ y D es el diámetro en m . Cuando se considera que el proceso se lleva a cabo a velocidad constante debido a que la suspensión se alimenta por medio de una bomba de desplazamiento positivo la ecuación 1 se puede reordenar mediante la ecuación 2

$$-\Delta p = \left(\frac{\mu\alpha c_s}{A^2} \frac{dV}{dt} \right) V + \left(\frac{\mu R_m}{A} \frac{dV}{dt} \right) = K_v V + C \quad (2)$$

Donde: α es la resistencia específica de la torta en mKg^{-1} , R_m es la resistencia del medio filtrante al flujo de filtración en m^{-1} , A es el área del filtro en m^2 , K_v se da en Nm^{-5} y C en Nm^{-2} . Las anteriores ecuaciones al reordenar en términos de $-\Delta p$ y el tiempo t como variables. En cualquier momento durante la filtración, el volumen total V se relaciona con la velocidad y el tiempo total t como se indica en la ecuación 3

$$V = t \frac{dV}{dt} \quad (3)$$

Sustituyendo la ecuación 3 en la ecuación 2 se obtiene la ecuación 4

$$-\Delta p = \left[\frac{\mu\alpha c_s}{A^2} \left(\frac{dV}{dt} \right)^2 \right] t + \left(\frac{\mu R_m}{A} \frac{dV}{dt} \right) \quad (4)$$

Cuando la resistencia de la torta no es constante y varía como se indica en la ecuación 5, ésta se puede reemplazar en la ecuación 2.

$$\alpha = \alpha_0 (-\Delta p)^s \quad (5)$$

Donde α_0 y s son constantes empíricas. La constante de compresibilidad s es cero para lodos o tortas incompresibles y suele tener valores entre 0.1 y 0.8 (Geankoplis, 1998).

Es importante considerar que, en la filtración las resistencias al flujo aumentan con el tiempo a medida que el medio filtrante se va obstruyendo o se forma la torta de filtración; en la filtración de torta se forman dos resistencias en serie: la de la torta (es nula al principio del proceso y aumenta con el tiempo) y la del medio filtrante.

Para calcular la eficiencia de filtración es necesario calcular la relación beta, $\beta_{(x)}$ (ecuación 6) definida como la relación entre el número de partículas por unidad de volumen por encima de un tamaño específico x , en la suspensión corriente arriba y corriente abajo del filtro.

$$\beta_{(x)} = \frac{N_u}{N_d} \quad (6)$$

Donde: $\beta_{(x)}$ es la relación beta para partículas mayores que $x \mu\text{m}$, N_u y N_d corresponden al número de partículas por unidad de volumen mayor que $x \mu\text{m}$ corriente arriba y corriente abajo del filtro, respectivamente. Por tanto, cuanto mayor sea la relación beta más partículas del tamaño especificado o mayor se retienen en el filtro. La eficiencia de filtración, $E_{(x)}$ en porcentaje, se calcula mediante la ecuación 7 (Sparks & Chase, 2016).

$$E_{(x)} = \frac{\beta_{(x)} - 1}{\beta_{(x)}} \cdot 100 \quad (7)$$

Mapa de Innovación

Un mapa de innovación es una herramienta que permite identificar las conexiones entre varios inventos tecnológicos (materiales, procesos y tecnologías de productos) y el mercado o necesidades del cliente; donde se relacionan los componentes tecnológicos de desarrollos de productos con ventajas técnicas y la satisfacción de la propuesta de valor para el cliente (Seider, Seader, Lewin, y Widagdo, 2004).

En este esquema se considera las oportunidades, la generación de ideas, análisis de la factibilidad para seleccionar el desarrollo del prototipo, producción piloto, la producción en masa y finalmente la comercialización (Palomo, 2000). Esta

herramienta también permite la comunicación entre el departamento de desarrollo e investigación y el departamento de negocios.

La construcción de un mapa de innovación propuesta por Seider et al. (2004), comienza con la identificación de sus seis capas con sus respectivos elementos, descritos a continuación:

- Tecnología de materiales: materiales que permiten el nuevo producto.
- Tecnología de proceso o fabricación: procesos que permiten la fabricación del nuevo producto o sus componentes.
- Tecnología del producto: componente del producto o precursores, destinados a clientes entre empresas y no para usuarios finales.
- Diferenciación técnica: diferenciaciones técnica o ventajas.
- Productos: un solo producto, familia de productos o plataforma de productos.
- Propuesta de valor para el cliente: atributos del producto, ventajas y diferenciaciones, expresadas desde el punto de vista del cliente.

Una vez identificados los elementos, se colocan en las capas apropiadas en el mapa dibujando la conectividad entre ellos para mostrar su interacción. Los mapas de innovación se clasifican según las tres clases de productos químicos, que son: químicos básicos, químicos industriales y productos específicos para el consumidor.

Proceso de Análisis Jerárquico (AHP)

El AHP (Analytic Hierarchy Process) por sus siglas en inglés, es un método matemático de toma de decisiones multicriterio que permite estructurar, medir y sintetizar alternativas cuando se requiere evaluar aspectos tanto cualitativos como cuantitativos mediante una escala que representa las prioridades relativas de los elementos considerados (Berumen y Redondo, 2007; Osorio y Orejuela, 2008).

Berumen y Redondo (2007) mencionan que el proceso AHP posibilita estructurar un problema multicriterio en una jerarquía de atributos que posee como mínimo tres niveles:

- El propósito u objetivo global.
- Los criterios que definen las alternativas.
- Las alternativas de selección.

Este método se basa en que los elementos que afectan la decisión, es decir, los criterios utilizados para tomar decisiones y alternativas de selección, se representan en niveles para posteriormente priorizarlos con una escala de

ponderación que emplea números entre 1 y 9, en la Tabla 3 se detalla su interpretación.

Tabla 3.

Interpretación de escala de ponderación para matrices de comparación.

Escala	Interpretación
1	Ambos criterios o elementos son de igual importancia.
3	Ligeramente más importante un criterio sobre el otro.
5	Fuertemente más importante un criterio sobre el otro.
7	Demostrablemente más importante un criterio sobre el otro.
9	Absolutamente más importante un criterio sobre el otro
2, 4, 6, 8	Valores intermedios, empleados cuando no se puede definir con claridad la preferencia entre los criterios.

Nota. Adaptado de “La utilidad de métodos de decisión multicriterio (como el AHP) en torno de competitividad creciente” (p. 72), por Berumen y Redondo, 2007, *Cuadernos de Administración*, 20(34).

Criterios para Determinar la Mejor Tecnología o Proceso

La determinación de la mejor tecnología o proceso, se debe de justificar mediante el logro de eficiencias en los procesos, un enfoque que permita al cliente detectar y resolver sus necesidades es la construcción de una matriz (Medina, Nogueira, Hernández, y Díaz, 2012), considerando los siguientes criterios:

- Impacto de la tecnología: Es la valoración de la incidencia de la tecnología en el cumplimiento del objetivo global.
- Repercusión en el cliente: Es el efecto de cada tecnología sobre las incidencias que posee en la satisfacción del cliente.
- Posibilidad de éxito a corto plazo: Se basa en el efecto que causará el proceso en el menor tiempo posible.
- Variabilidad: Es una característica importante en el estudio de procesos, se define como ligeras variaciones que se dan en un proceso tras su repetición y por ello los resultados difieren de uno a otro.
- Valor agregado al producto final: Es la cantidad que se incorpora al valor total de un bien o servicio en distintas etapas de un proceso productivo, de distribución y de comercialización.
- Peso económico: Los recursos financieros constituyen un factor importante en el contexto de la limitación de recursos, el costo de la tecnología debe

incluir el recurso humano (costo por instalación) y el capital invertido (costo del equipo).

Pasos del Método AHP

Para resolver un problema de toma de decisiones multicriterio por el método AHP se debe seguir los siguientes pasos:

1. Definir el problema.
2. Estructurar el problema e integrarlo dentro de una estructura jerárquica, considerando los elementos de decisión: criterios y alternativas.
3. Formar matrices de comparación recíprocas entre los elementos de decisión y asignar las ponderaciones de la Tabla 2 de acuerdo a su prioridad.
4. Estimar los pesos relativos de los elementos de decisión mediante la normalización de las matrices, donde: se divide cada término de la matriz sobre la suma de sus columnas de tal manera se obtiene una nueva matriz de la cual se promedian los valores de cada fila obteniendo un vector columna, al cual se denominará como vector de prioridad y peso de los criterios para los resultados de las matrices de comparación de las alternativas por cada criterio y los criterios, respectivamente.
5. Verificar la consistencia de las matrices para corroborar que los resultados sean válidos y confiables (en el caso de no cumplir realizar nuevamente el paso 3), valores inferiores a 0,10 para el coeficiente de consistencia se considera aceptable. Para calcular la razón o coeficiente de consistencia Gómez, Méndez, Méndez, Ortiz, y Turriago, (2008) sugieren: multiplicar la matriz de comparación con el vector promedio, luego dividir el último vector para el vector promedio y promediarlo, dicho valor se conocerá como promedio de consistencia (*PC*). Después hallar el índice de consistencia aplicando la ecuación 8:

$$IC = \frac{PC - n}{n - 1} \quad (8)$$

Donde: *IC* es el índice de consistencia y *n* el número de criterios o alternativas. También calcular el índice de consistencia aleatorio (*ICA*) dado por la ecuación 9:

$$ICA = \frac{1,98 * (n - 2)}{n} \quad (9)$$

Finalmente, la razón de consistencia (RC) se calcula con la ecuación 10.

$$RC = \frac{IC}{ICA} \quad (10)$$

6. Construir una matriz para la selección de la mejor tecnología como se observa en la Tabla 4, donde se colocarán los vectores prioridad y pesos de los criterios para obtener una puntuación total que resulta de la suma de los productos, peso de criterio por alternativa según corresponda. Finalmente se selecciona la alternativa que tenga la mayor puntuación total.

Tabla 4.

Matriz para la selección de la mejor tecnología

Alternativas	C ₁	C ₂	C...	C _n	Puntuación final
	Peso C ₁	Peso C ₂	Peso C...	Peso C _n	
A ₁					
A ₂					
A...					
A _n					

Nota: Elaborada en aproximación a (Medina et al., 2012).

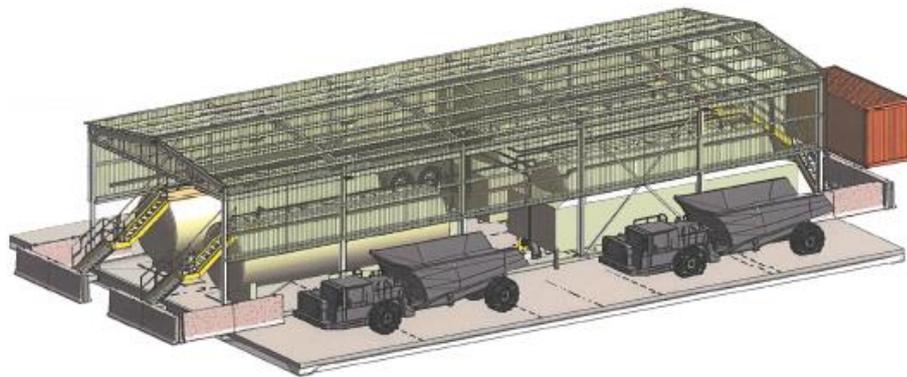
METODOLOGÍA EXPERIMENTAL

Descripción de la Estación de Servicio del Proyecto Fruta del Norte

La estación de servicio del Proyecto Fruta del Norte está conformada por cuatro tanques cilíndricos horizontales superficiales de veinte mil galones cada uno (ver Figura 12) construidos en acero. Los tanques están distribuidos según la Figura 13 de acuerdo a su codificación, como: ES001, ES002, ES003 y ES004.

Figura 12.

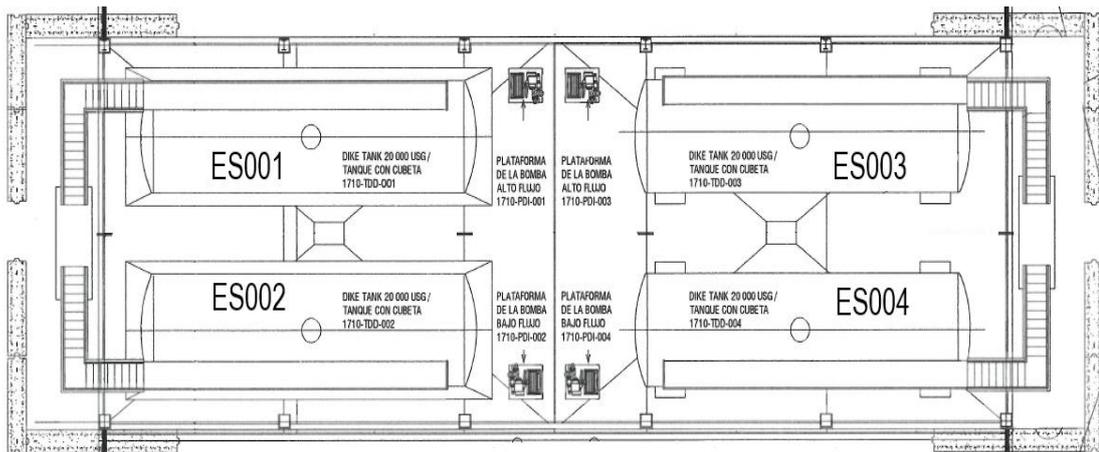
Bahía de combustible diésel premium del Proyecto Fruta del Norte



Nota. Recuperado de (Brus, 2017)

Figura 13.

Distribución de los tanques de almacenamiento (vista superior)



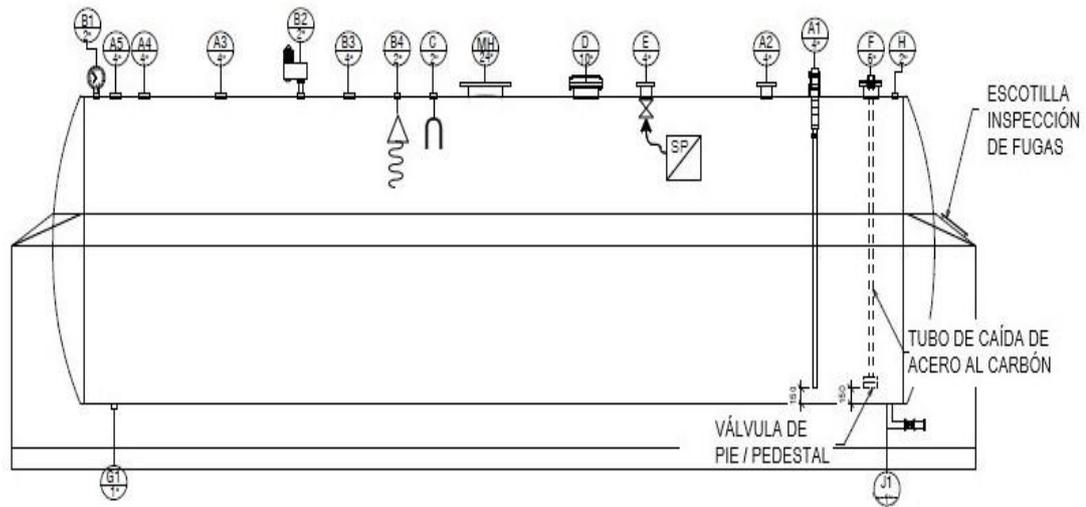
Nota. Adaptado de (Brunelle, 2018)

Los tanques de almacenamiento poseen dos tipos de recubrimiento o estructuras de contención para evitar la contaminación al ambiente en caso de derrames de combustible, que son:

- Cubeto individual: Los tanques ES001 y ES002 están rodeados por un cubeto individual (ver Figura 14), capaz de contener un volumen igual o mayor al 110% del tanque; además el cubeto permite la recuperación del combustible derramado.

Figura 14.

Tanque de almacenamiento con cubeto individual



Nota. Adaptado de (Brunelle, 2018)

Tabla 5.

Detalle de accesorios y circuitos de control del tanque con cubeto

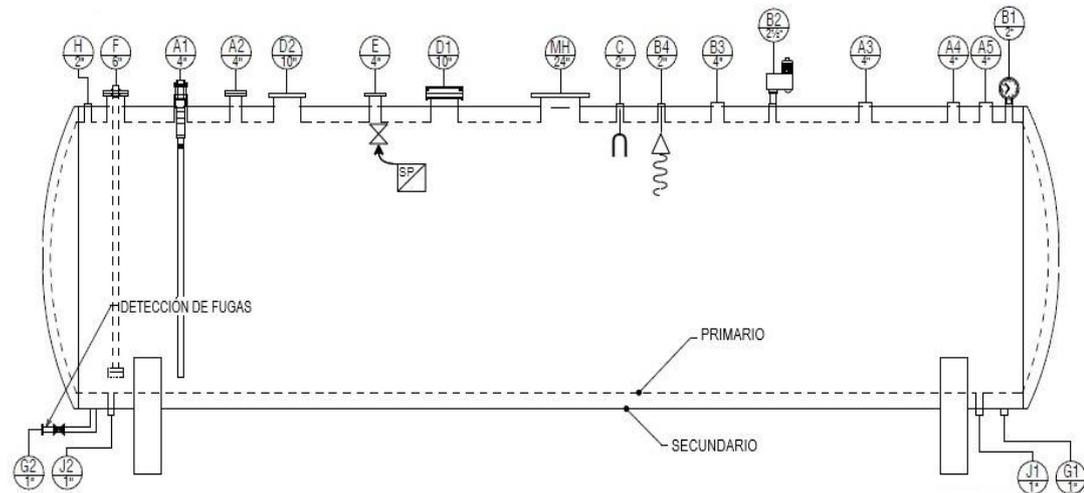
ID	Descripción	Diámetro
A1	Llenado cisterna	NPS 4"
A2 – A3 – A4 – A5	Brida	NPS 4"
B1	Medidor de nivel	NPS 2"
B2	Respirador con alarma de sobrellenado	NPS 2"
B3	Tapa de sobrellenado	NPS 4"
B4	LSHH	NPS 2"
C	LIT	NPS 2"
D	Respirador de emergencia	NPS 10"
E	Válvula de escape del distribuidor	NPS 4"
F	Bomba de succión	NPS 6"
G	Drenaje	NPS 1"
H	Repuesto	NPS 2"
J1	Drenaje	NPS 1"
J2	Drenaje	NPS 1"
MH	Puerta sencilla (Manhole)	24"

- Doble pared: Los tanques ES003 y ES004 son tanques de doble pared (ver Figura 15), donde, el tanque primario se encuentra completamente aislado del ambiente por medio de una pared exterior o un tanque secundario, el

espacio entre las paredes se denomina espacio anular, el cual está relleno con salmuera coloreada para detectar fugas.

Figura 15.

Tanque de almacenamiento con doble pared



Nota. Adaptado de (Brunelle, 2018)

Tabla 6. *Detalle de accesorios y circuitos de control del tanque de doble pared*

ID	Descripción	Diámetro
A1	Llenado cisterna	NPS 4"
A2 -A3 -A4 – A5	Brida	NPS 4"
B1	Medidor de nivel	NPS 2"
B2	Respirador con alarma de sobrellenado	NPS 2"
B3	Tapa de sobrellenado	NPS 4"
B4	LSHH	NPS 2"
C	LIT	NPS 2"
D1	Respirador de emergencia - primario	NPS 10"
D2	Respirador de emergencia – secundario	NPS 10"
E	Válvula de escape del distribuidor	NPS 4"
F	Bomba de succión	NPS 6"
H	Repuesto	NPS 2"
J1 - J2	Drenaje - primario	NPS 1"
G1 - G2	Drenaje - secundario	NPS 1"
MH	Puerta sencilla (Manhole)	24"

En las Tablas 5 y 6, se encuentran detallados los accesorios de cada tanque como: medidor de nivel y respiraderos, junto al circuito de control constituido por un switch de nivel alto-alto (LSHH por sus siglas en inglés) y un transistor (LIT); a continuación, se los describe:

- Medidor de nivel (B1) tipo reloj indicador serie 818 de marca Morrison Bros (ver Figura 16), posee una medición máxima de 12 pies y su lectura se muestra en pies y pulgadas donde, la manecilla pequeña corresponde a pies y la manecilla grande a pulgadas (Morrison Bros. Co., 2019).

Figura 16.

Reloj indicador Morrison Bros



- Válvula de venteo (B2) o alarma de sobrellenado de ventilación combinada es una válvula de alivio de presión (ver Figura 17), permite la ventilación a presión de vacío o venteo del tanque durante las operaciones de abastecimiento y distribución de combustible, además posee una alarma mecánica audible (no requiere electricidad ni baterías) que se activa cuando el nivel del líquido sobrepasa la altura correspondiente a la máxima capacidad del tanque (Morrison Bros. Co., 2016).

Figura 17.

Alarma de ventilación Morrison Bros



- Circuito de control para el nivel del tanque de almacenamiento es un sistema de seguridad (ver Figura 18), constituido por un transmisor (LIT, elemento C) que emite una señal de referencia como un valor en función del nivel de combustible almacenado en el tanque, y tiene como límite el valor de la altura máxima; junto a un display que permite la lectura de las señales registradas por el transmisor donde se encuentra conectado un switch de nivel alto-alto (LSHH, elemento B4), el cual tiene como principal función cerrar la válvula en el ingreso del tanque en el caso de superar el valor límite del transmisor.

Figura 18.

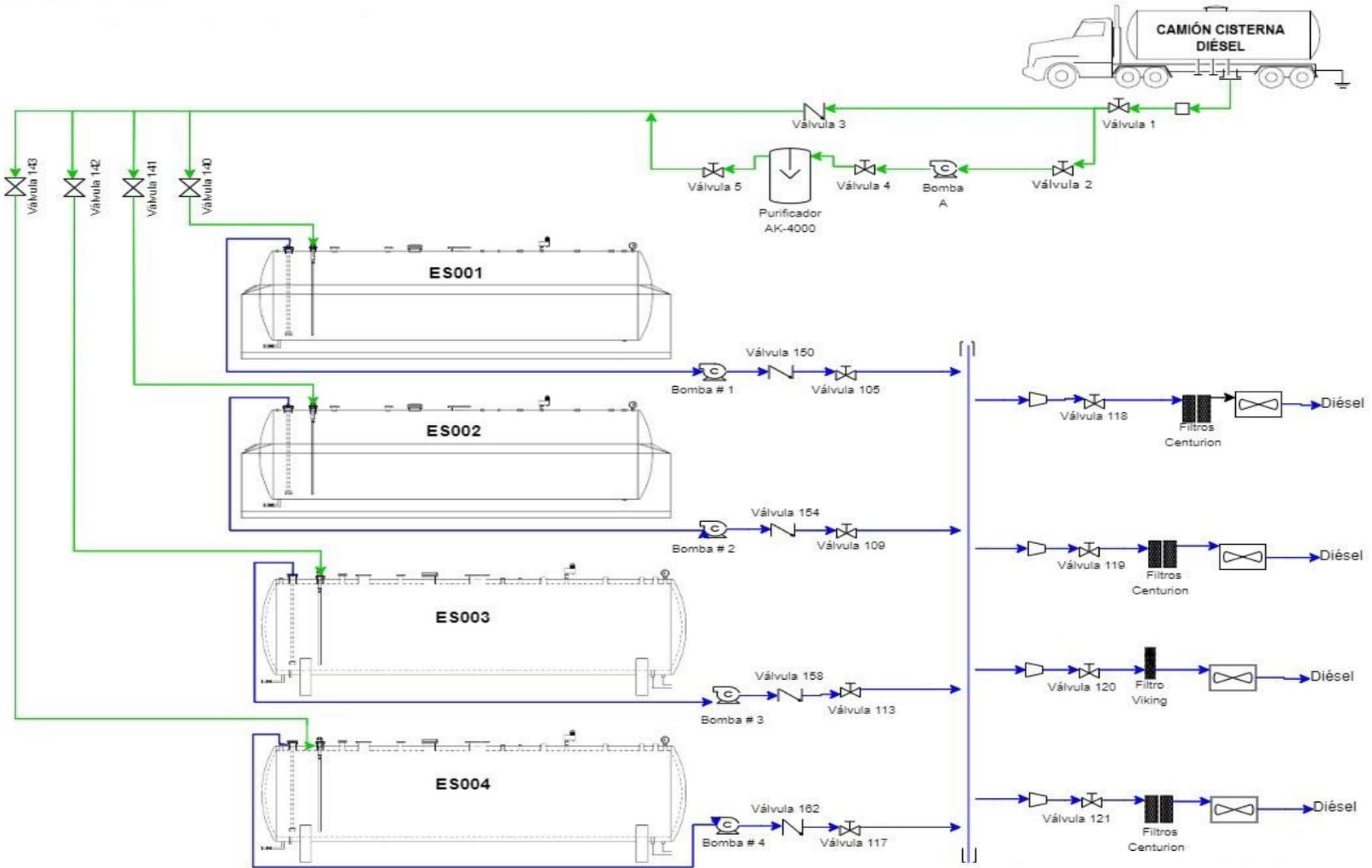
Circuito de control de nivel en tanque de almacenamiento



La tubería de la estación (ver figura 19) conduce el gasoil durante el abastecimiento (tubería verde) y distribución (tubería azul), permitiendo el trasvase del hidrocarburo desde el camión cisterna a los tanques de almacenamiento y la extracción del líquido desde el tanque de almacenamiento a cada pistola de distribución. El material de la tubería es acero al carbón, con diámetros de 80 mm (3") y 50 mm (2") para el ingreso y salida de combustible, respectivamente. Esta tubería está diseñada en tramos de mayor longitud para evitar uniones, siendo estas del tipo de bridas para facilitar el desmontaje en caso de que se produzca un fallo o modificación en un tramo.

Figura 19.

Diagrama de tuberías para el almacenamiento y distribución de combustible en la estación de servicio

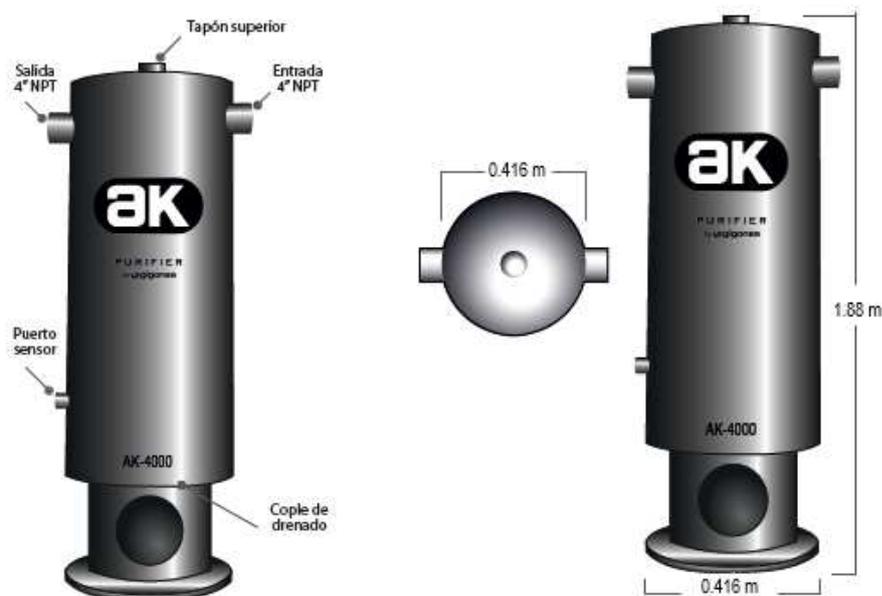


Durante el abastecimiento o descarga de combustible, se debe encender la bomba de descarga de diésel para succionar el combustible desde el camión y, realizar el cierre y apertura de válvulas para direccionar el fluido hasta el tanque seleccionado; en esta etapa el combustible circula a través del Purificador AK-4000 para remover agua e impurezas.

El Purificador AK-4000 (ver Figura 20) es un equipo caracterizado por retener sólidos de hasta 10 micras y el 99% del agua contenida en el diésel (capacidad de retención de impurezas 100.339 ml), opera a un flujo nominal de 200 GPM y no posee piezas intercambiables en su interior ya que es una unidad sellada sin ningún cartucho, malla o filtro reemplazable; generalmente se emplea en estaciones surtidoras de combustible diésel, muelles y grandes motores móviles.

Figura 20.

Diseño del Purificador AK-4000, partes y dimensiones

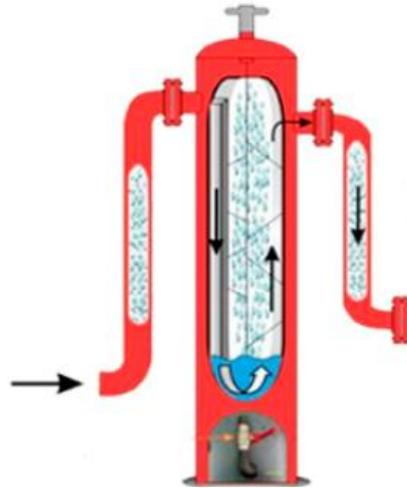


Nota. Adaptado de AK-4000C (p. 1), por Gigonsa, 2019.

El funcionamiento del purificador consiste en separar por precipitación agua y contaminantes sólidos en suspensión mediante acciones físicas como turbulencia y fuerza centrífuga, con ello el combustible limpio asciende a la salida superior del equipo (ver Figura 21). Las impurezas son purgadas a través del acople de drenado ubicado en la parte inferior (Purifisa Global Perú, 2019).

Figura 21.

Funcionamiento del Purificador AK-4000



Nota. Recuperado de *Funcionamiento de purificador* [Fotografía], por Purifisa Global Perú, 2019.

Para la distribución de combustible, el diseño de la tubería permite utilizar el combustible almacenado de un tanque específico para los cuatro surtidores de la estación o a su vez el combustible de un tanque para su surtidor correspondiente, debido a que la estación de servicio posee un surtidor de combustible para cada tanque.

Un surtidor de combustible está constituido por: una bomba de succión (colocada sobre la posición de F de las Figuras 14 y 15) para extraer el gasóleo desde el interior del tanque hasta la pistola de distribución y un dispositivo de medición electrónico o mecánico para medir con exactitud la cantidad de combustible bombeada.

En la Tabla 7 se detallan los equipos de cada surtidor, donde: los tanques ES001 y ES003 poseen una bomba modelo MP08 capaz de generar una presión de hasta 43 psi y un caudal de hasta 150 GPM debido a que se encuentra conectada a un motor trifásico de 3 HP de potencia denominándose dispensadores de diésel de alto caudal utilizados para la distribución de combustible a maquinaria pesada como camiones utilitarios de combustible y agua, lazadores de hormigón, volquetas y grúas; mientras que los tanques restantes poseen una bomba modelo SO60 capaz de generar una presión de hasta 50 psi y un caudal de 60 GPM conectada a un motor trifásico de 2 HP de potencia denominándose dispensadores de bajo caudal utilizados para abastecer combustible a vehículos livianos como camionetas, gators, buses y ambulancias.

Tabla 7.*Detalle de equipos perteneciente a cada surtidor*

Equipo	Detalle	Surtidor del ES001	Surtidores ES002 y ES004	Surtidor del ES003
Bomba	Marca:	Petroleum Pump	Petroleum Pump	Petroleum Pump
	Modelo:	MP08	SO60	MP08
	Presión máxima (hasta):	43 psi	50 psi	43 psi
	Altura de succión (hasta):	7,6 m	7,6 m	7,6 m
	Caudal (hasta):	150 GPM	60 GPM	150 GPM
Motor	Modelo:	TEFC FR56C	TEFC FR56C	TEFC FR56C
	Conexión Eléctrica:	3 fases / 3450 rpm	3 fases / 3500 rpm	3 fases / 3450 rpm
	Potencia:	3 HP	2 HP	3 HP
	Marca:	CIM-TEK	CIM-TEK	CIM-TEK
Filtro	Modelo:	40013	40013	40186
	Presión máxima (hasta):	50 psi	50 psi	150 psi
	Caudal (hasta):	60 GPM	60 GPM	120 GPM
	Marca:	Liquid Control	Liquid Control	Liquid Control
Medidor	Modelo:	M7	M5K1/LCR-II	M10K1/LCR-II
	Presión máxima (hasta):	150 psi	150 psi	150 psi
	Caudal (hasta):	100 GPM	60 GPM	150 GPM
	Marca:	Reel Craft	Reel Craft	Reel Craft
Carrete	Modelo:	FF9600	FD9400	EA3900
	Presión máxima:	600 psi	500 psi	600 psi
	Longitud de manguera:	15 m	15 m	15 m
	Marca:	OPW	Fill Rite	Wiggins
Pistola	Modelo:	1290-0050	N100DAU12G	ZZ9A1
	Caudal:		5 – 25 GPM	150 GPM

Como se puede observar en la Tabla 7, cada surtidor cuenta con un filtro constituido por una carcasa y un elemento filtrante. El filtro Centurion marca CIMTEK modelo 40013 es un filtro de doble alojamiento, diseñado para mezclas de gasolina, diésel, diésel de ultra bajo contenido de azufre, biodiésel y fluidos industriales como aceites (lubricante, hidráulico, sintético) y solventes (CIM-TEK, s.f.-c); este filtro usa dos elementos filtrantes con número de parte 30033 (ver Figura 22).

Figura 22.

Filtro CIM-TEK 40013 y elemento filtrante 30033.

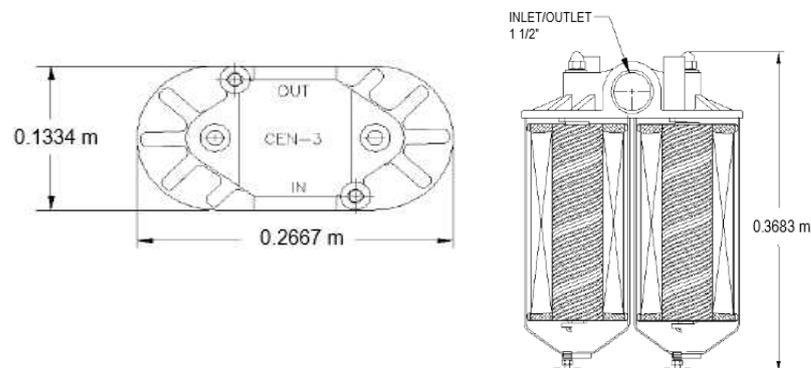


Nota. Adaptado de CIM-TEK, s.f.-c y CIM-TEK, s.f.-a.

La carcasa del filtro 40013 se anexa a la tubería del surtidor mediante su conexión de entrada y salida de 1½ in, en la Figura 23 se muestran las dimensiones del cabezal (izquierda) y longitud de la carcasa (derecha) (CIM-TEK, n.d.-c).

Figura 23.

Dimensiones del filtro CIM-TEK 40013, cabezal y carcasa.

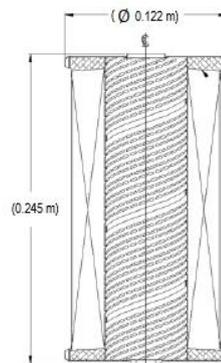


Nota. Adaptado de CIM-TEK, s.f.-c.

El elemento filtrante 30033 posee un medio de filtración denominado Hydrosorb caracterizado por retener tres veces la suciedad que retiene un filtro de celulosa, elimina agua y partículas como óxido, polvo y suciedad (diámetro de poro: 10 micras), sus dimensiones son 0,122 m y 0,235 m de diámetro y longitud, respectivamente (CIM-TEK, s.f.-a), como se puede observar en la Figura 24. Además, cada elemento filtrante tiene una capacidad de filtración de 30 GPM, por tanto, el filtro Centurión 40013 posee una capacidad de hasta 60 GPM debido a que aloja dos elementos filtrantes de 30 GPM.

Figura 24.

Dimensiones del elemento filtrante CIM-TEK 30033



Nota. Adaptado de CIM-TEK, s.f.-a.

Por otra parte, el filtro Viking de marca CIM-TEK modelo 40186 es un filtro de alto flujo capaz de manejar una capacidad de filtración de hasta 120 GPM, fabricado en acero al carbón con recubrimiento (interno y externo) epoxi y es compatible con una amplia gama de fluidos como gasolina, diésel, biodiesel, diésel de ultra bajo contenido de azufre y otros como aceites y solventes. Este filtro usa como elemento filtrante a un elemento con número de parte 30034 (CIM-TEK, s.f.-d). En la Figura 25 se puede observar el filtro de alto flujo con su respectiva carcasa y elemento filtrante.

Figura 25.

Filtro CIM-TEK 40186 emplea un elemento filtrante 30034

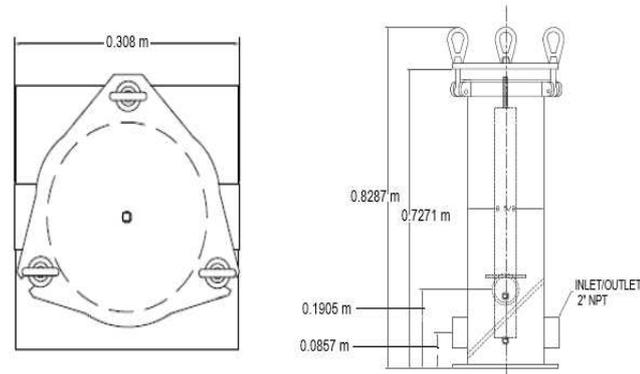


Nota. Adaptado de CIM-TEK, s.f.-d y CIM-TEK, s.f.-b.

Las dimensiones del filtro de alto caudal se puede observar en la Figura 26, como el diámetro (izquierda), longitudes (derecha) de la carcasa y la altura a la que se encuentra la boquilla para drenar las impurezas; las conexiones de entrada y salida son de 2 in ubicadas en la parte inferior.

Figura 26.

Dimensiones de la carcasa del filtro CIM-TEK 40186 de alto flujo.

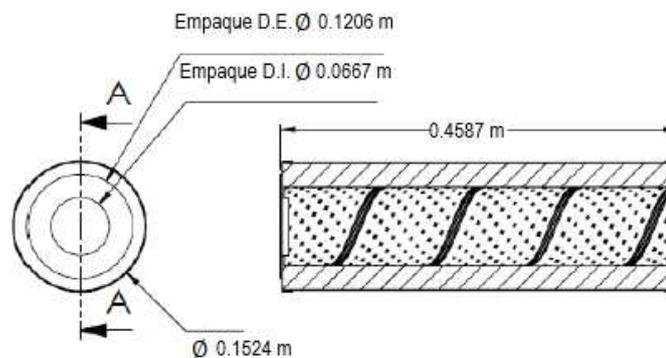


Nota. Adaptado de (CIM-TEK, s.f.-d)

El elemento filtrante 30034 posee como medio de filtración al material Hydrosorb con tamaño de poro de 10 micras, capacidad de filtración hasta 120 GPM y sus dimensiones como diámetros y longitud se muestran en la Figura 27 (CIM-TEK, s.f.-b).

Figura 27.

Dimensiones del elemento filtrante 30034.



Nota. Adaptado de (CIM-TEK, s.f.-b)

Muestreo de Combustible

En el presente trabajo, la recolección de muestras se realizó en base a la norma NTE INEN 930:1982 que establece los procedimientos para obtener muestras de petróleo crudo y sus derivados. Las muestras tomadas en el camión cisterna y tanques de almacenamiento se denominan muestras compuestas de tanque único que consisten en una mezcla de alícuotas superiores, medias e inferiores en proporciones según la altura del líquido en el depósito; generalmente la altura del

líquido fue el máximo equivalente al 100% de la altura del tanque, el nivel de la toma de muestras desde el fondo del tanque corresponde a 80% para la muestra superior, 50% para la muestra media y 20% para la muestra inferior mezcladas en partes proporcionales de 3, 4 y 3, respectivamente para completar el volumen de un litro. Se emplearon botellas de vidrio de color ámbar oscuro con tapas y contratapas como envases para las muestras y, un ladrón o sacamuestras para extraer el combustible desde el depósito.

El procedimiento realizado para tomar una muestra de diésel consistió en enjuagar y drenar tanto el sacamuestras como los envases con diésel, tomar muestras según el nivel del líquido (anteriormente señalado) y para vaciar la muestra al envase, el ladrón se introdujo en la abertura del envase hasta que el contenido se haya transferido totalmente para evitar la contaminación del hidrocarburo (INEN, 1982).

Los lugares de muestreo, se detalla a continuación:

- A. Durante la recepción de combustible. En el camión cisterna de combustible se tomó la muestra por la parte superior del tanque al abrir la tapa del compartimiento principal, tras quince minutos (tiempo de reposo) de su arribo a la estación del Proyecto Fruta del Norte para adquirir un patrón de comparación y determinar la calidad del combustible recibido. Y en el tanque ES004 que fue llenado, la muestra se tomó por el respirador de emergencia, después de 45 minutos de finalizar el proceso de recepción.
- B. En los tanques de almacenamiento ES001, ES002 y ES003, se tomó una muestra por cada tanque por el respirador de emergencia para determinar el nivel de limpieza del combustible acopiado.
- C. Durante el abastecimiento de combustible a los equipos. Se tomó una muestra en la pistola de distribución perteneciente al tanque ES004, para determinar la eficiencia del filtro del surtidor.

Caracterización de Combustible

Se realizó la caracterización del combustible diésel en el Laboratorio de Combustibles, Biocombustibles y Aceites Lubricantes (LACBAL) de la Escuela Politécnica Nacional considerando únicamente de las muestras obtenidas en el punto A de muestreo correspondiente a el camión cisterna (muestra 1) y el tanque de almacenamiento ES004 (muestra 2) de la Bahía de combustible en estudio.

Materiales y Equipos

Reactivos. Los reactivos empleados en la caracterización fueron Tolueno y agua destilada proporcionados por LACBAL.

Equipos para Caracterización de Muestras. En la Tabla 8 se detallan los equipos empleados en la caracterización de las muestras de diésel.

Tabla 8.

Equipos empleados en la caracterización de muestras de diésel

Equipos	Especificaciones
Refrigerador	Marca: Tamson Instruments B.V. Modelo: TLC15
Hidrómetro L50	Marca: Tamson Instruments B. V. Longitud: 335 mm
Baño de temperatura constante	Marca: Cannon Modelo: CT-2000
Viscosímetro Routine	Marca: Cannon Tamaño de capilar: 75 Constante: 0.008 mm ² s ⁻¹
OptiFlash	Marca: HERZOG-PAC Modelo: Pensky Martens
Probador automatizado de destilación	Marca: TANAKA Modelo: ad-7
Centrifuga para petróleos con calefacción	Marca: Ortoalresa Modelo: Digtor 21 C Capacidad: 4 tubos de 203 mm (8 in.)
Probador automatizado de residuos de micro carbón	Marca: TANAKA Modelo: ACR-M3
Horno de mufla eléctrico	Marca: Iyymen Modelo: N-8 L
Espectrómetro de fluorescencia de rayos X	Marca: Oxfort Modelo: X-SUPREME 8000
Recipiente de presión de corrosión de la tira de cobre	Marca: Normalab Modelo: NTB Classic
Analizador automatizado de residuos	Marca: Spectro Scientific Modelo: LaserNet Q230

Determinación de las Propiedades del Combustible Diésel

A continuación, se detallan las propiedades físicas y químicas determinadas tras el muestreo.

Densidad. Para determinar la densidad en las muestras se empleó el método del hidrómetro según la norma ASTM D1298-12b y el refrigerador Tamson TLC-15 (ver Figura 28).

- Se encendió el refrigerador, el cual hace circular un fluido a través de los cilindros de vidrio de doble pared y mantiene el baño de temperatura dentro de ± 0.25 °C de la temperatura requerida (Tamson Instruments, 2017).
- Se configuró la temperatura de ensayo a 15 °C en el panel del equipo y esperó hasta su estabilización.
- Se colocó aproximadamente 500 mL de la muestra en el cilindro de vidrio (con el objetivo de evitar el contacto del hidrómetro con las paredes y el piso del cilindro) y luego se introdujo el viscosímetro.
- Se comprobó la temperatura de ensayo con un termómetro de referencia.
- Finalmente, se realizó la lectura del hidrómetro en la superficie del líquido que corta la escala y registró el valor dado en gcm^{-3} .

Figura 28.

Refrigerador TLC15

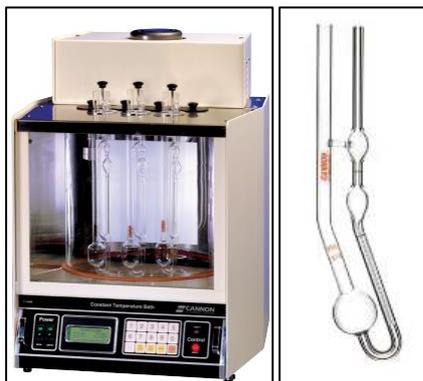


Nota. Adaptado de *TCL15-5* (p. 1), por Tamson Instruments, 2017.

Viscosidad cinemática a 40 °C. Para determinar la viscosidad cinemática a 40 °C de las muestras de diésel se empleó la norma ASTM D445-15a, el equipo Baño de temperatura constante CT-2000 de rango extendido y un viscosímetro Routine de la marca Cannon-Fenske, ver Figura 29.

Figura 29.

Baño de temperatura constante CT-2000 y viscosímetro Routine



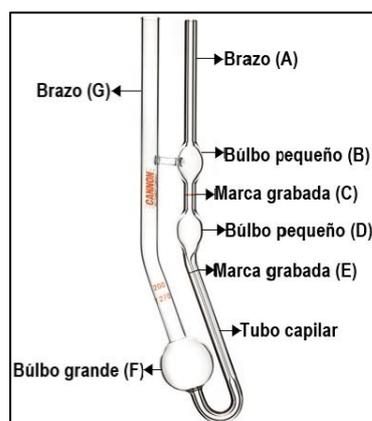
Nota. Adaptado de CT-2000 y CANNON-Fenske routine viscosimeter [Fotografía], por Cannon Instrument Company, 2020b y Cannon Instrument Company, 2020a; respectivamente.

El procedimiento del ensayo fue el siguiente:

- Se encendió el Baño de temperatura constante y ajustó la temperatura a 40 °C.
- Para cargar el viscosímetro 9721-B56 (Figura 30), se colocó una pera de succión en el brazo G del viscosímetro, luego se invirtió el instrumento e introdujo el brazo A en la muestra de diésel y se succionó hasta que el líquido alcance la marca E; finalmente se colocó el viscosímetro en posición original (vertical) con tapones en los tubos.

Figura 30.

Viscosímetro capilar Cannon-Fenske



Nota. Adaptado de CANNON-Fenske routine viscosimeter [Fotografía], por Cannon Instrument Company, 2020a.

- Se insertó el viscosímetro en el equipo baño de temperatura hasta que la muestra en estudio alcance la temperatura de baño.
- Una vez alcanzada la temperatura, se retiraron los tapones y registró el tiempo que transcurre desde que el nivel del líquido pasó por las marcas C hasta E.

Para calcular la viscosidad cinemática, se realizó el ensayo dos veces y usó la ecuación 11.

$$V_{1,2} = C \cdot t_{1,2} \quad (11)$$

Donde:

$V_{1,2}$: Viscosidad cinemática determinada para V_1 y V_2 , respectivamente, mm^2s^{-1} .

C : Constante de calibración del viscosímetro, mm^2s^{-2} (equivalente a 0,008 mm^2s^{-2}).

$t_{1,2}$: Tiempos de flujo para t_1 y t_2 , respectivamente, s .

La viscosidad cinemática final es el promedio de la V_1 y V_2 (ASTM International, 2015).

Punto de Inflamación. Para determinar el punto de inflamación en las muestras de diésel se empleó la norma ASTM D93-16a y el equipo automático OptiFlash-Pensky Martens de copa cerrada (ver Figura 31).

Figura 31.

OptiFlash-Pensky Martens



Nota. Adaptado de *Optiflash* (p. 1), por PAC L.P., 2015.

El procedimiento del ensayo se detalla a continuación:

- Se colocó en la copa de prueba 75 mL de la muestra.
- En el panel de control del equipo, se colocó el nombre de la muestra, el producto (diésel) y el punto de inflamación esperado equivalente a 51 °C (requisito mínimo de la norma NTE INEN 1489:2012).
- Finalmente se presionó Start (inicio) y registró el valor obtenido en grados Kelvin, K .

El punto de inflamación obtenido en el equipo se corrigió de acuerdo a la ecuación 12, debido a que la presión barométrica difiere de 101,3 kPa.

$$\text{Punto de inflamación corregido} = C + 0,25(101,3 - K) \quad (12)$$

Donde:

C : Punto de inflamación obtenido en el equipo, °C.

K : Presión barométrica ambiental en el momento de la prueba, kPa ; equivalente a 72,8 kPa.

Temperatura de Destilación del 90%. Para determinar la temperatura de destilación del 90% se empleó la norma ASTM D86-18 y el equipo de destilación batch de laboratorio que se muestra en la Figura 32.

Figura 32.

Probador automatizado de destilación ad-7



Nota. Adaptado de *Automated distillation tester ad-7* (p. 1), por TANAKA, s.f.

A continuación, se detalla el procedimiento del ensayo:

- Previo al ensayo, fue necesario acondicionar la muestra a 10 °C y comprobar su temperatura con un termómetro.
- Se vertieron 100 mL de la muestra en el matraz de destilación de 500 mL y se aplicó moderadamente calor al matraz.
- Se registró los siguientes datos: la hora de inicio y, las temperaturas al caer la primera gota de destilado y luego de cada 1 mL hasta alcanzar los 360 °C.
- Finalmente, con los datos de temperatura y volumen de destilado se construye una curva de destilación.

Contenido de Agua y Sedimentos. Para determinar el contenido de agua y sedimentos en las muestras de diésel se empleó la norma ASTM D1796-11 y una centrífuga modelo Digtor 21 C, ver la Figura 33.

Figura 33.

Centrífuga para petróleos Digtor 21 C.



Nota. Adaptado de *Digtor 21 C-U* (p. 1), por Ortoalresa, 2014.

El procedimiento del ensayo fue el siguiente:

- Se preparó 200 mL de una mezcla 80:20 de tolueno y agua-saturada a 60°C, respectivamente.
- Se colocó en cada uno de los cuatro tubos de centrífuga, 50 mL de la muestra de diésel y 50 mL de muestra de tolueno-agua preparada previamente; es decir, se analizaron las dos muestras a la vez y de manera duplicada.
- Se tapó herméticamente los tubos y se agitan vigorosamente hasta que el contenido esté completamente mezclado.
- Se colocaron alternadamente los tubos en el portatubos de la centrífuga y se sumergen en un baño calefactor a 60°C.

- Se ajusto el tiempo de rotación a 10 minutos y velocidad de rotación a 2.170 rpm.
- Tras el proceso de centrifugación, se colocaron inmediatamente los tubos en posición vertical para leer y registrar el volumen combinado de agua y sedimento en el fondo de cada tubo.
- Se repitió el procedimiento para corroborar los datos observados.

El volumen final de agua y sedimentos en la muestra se calculó mediante la ecuación 11 y se expresa en porcentaje (% V/V).

$$V = V_1 + V_2 \quad (11)$$

Donde:

V : Volumen final de agua y sedimento de la muestra

V_1, V_2 : Volumen de agua y sedimento por 50 mL de muestra en el primer y segundo tubo, respectivamente, mL; equivalente a $< 0,025$.

Contenido de Residuo de Carbón sobre el 10% del Residuo de Destilación. Para la determinación del contenido de residuo de carbón sobre el 10 % del residuo de destilación se empleó la norma ASTM D4530-15 y el equipo de la Figura 34.

Figura 34.

Probador automatizado de residuos de micro carbón ACR-M3



Nota. Adaptado de *Micro carbon residue tester ACR-M3* (p. 1), por TANAKA, 2008.

El procedimiento del ensayo a continuación, se detalla:

- Se pesó un vial de vidrio de 2 mL de capacidad.

- Se transfirió directamente 1,5 g (1,77 mL) de muestra a un vial de vidrio y determinó su masa.
- Se colocó el vial cargado en el soporte del equipo, se aseguró la tapa y presionó el swich START (inicio).
- El equipo automatizado, calienta la muestra hasta 500 °C durante 15 minutos y luego la enfría hasta 250 °C con gas nitrógeno; tras alcanzar una temperatura inferior a 250 °C se procede a retirar el vial.
- Finalmente, se trasladó el vial de la muestra a un desecador hasta que se enfríe a temperatura ambiente, luego se pesó el vial y registró el valor obtenido.

Para calcular el porcentaje de residuo de carbón en la muestra original usando 10% de fondos de la destilación se utilizó la ecuación 12.

$$\% \text{ residuo en la muestra original} = \left(\frac{A}{C} \cdot 100 \right) \cdot E \quad (12)$$

Donde: A es el residuo de carbón en gramos (g), C es el 10% de fondos usados en g y E es la carga del matraz del peso original.

Contenido de Cenizas. Para la determinación del contenido de cenizas en las muestras de diésel se empleó la norma técnica ecuatoriana NTE INEN 1492:2013.

- Se calentó dos crisoles de 100 mL a 750 °C durante 10 minutos en la mufla de la Figura 35, luego se enfriaron a temperatura ambiente y pesaron.

Figura 35.

Horno de mufla eléctrico.



Nota. Adaptado de *Horno Ivymen N-39L* [Fotografía], por ALCO, 2020.

- Las muestras fueron agitadas vigorosamente y se tomó 100 g de cada muestra (118,2 y 118 mL de la muestra 1 y 2, respectivamente).
- Se colocaron las muestras en los crisoles y se determinó su masa con ayuda de una balanza.
- Después, se calentó cuidadosamente cada crisol con un mechero hasta que el contenido pueda quemarse de forma moderada y uniforme, hasta obtener cenizas y carbón al final de la combustión; el residuo se calentó en la mufla a 775 °C hasta eliminar todo el material carbonoso. Finalmente se dejó enfriar el crisol a temperatura ambiente y volvió a pesar.

Para determinar el contenido de ceniza en porcentaje (% m/m), se empleó la ecuación 13.

$$\% \text{ Ceniza} = (w/W) \cdot 100 \quad (13)$$

Donde: w es el peso de la ceniza obtenida al final del ensayo y W es el peso de la muestra inicial; ambas magnitudes en gramos.

Contenido de Azufre. Para determinar el contenido de azufre presente en las muestras de combustible diésel se empleó la norma ASTM D4294 y el espectrofotómetro de fluorescencia de rayos X de la Figura 36.

Figura 36.

Espectrofotómetro X-Supreme 8000



Nota. Adaptado de X-Supreme 8000, por Oxford Instruments, 2015.

- Se calibró el equipo con dos muestras de calibración de Di-n-butil sulfuro de alta pureza, con concentraciones de 0,015 a 0,1% y de 0,1% a 5,0%, por

tanto, se abarcó el intervalo de concentración de 0,015 a 5% de azufre (% masa).

- Tras la calibración, se preparó las muestras donde cada copa fue llenada hasta aproximadamente el 75% de su capacidad para posteriormente sellarla, se cargó en la bandeja del espectrofotómetro e inició el análisis.
- La concentración de azufre resultante se obtuvo al comparar los resultados con la curva de calibración establecida previamente.

Corrosión a la Lámina de Cobre. Para determinar la tendencia corrosiva de las muestras de diésel se empleó el ensayo de la corrosión a la lámina de cobre según la norma ASTM D130-12. Este ensayo se realizó a la par con las dos muestras.

- Se transfirió 30 mL de cada muestra en un tubo de ensayo de 25 mm de diámetro y 150 mm de longitud.
- Se prepararon dos láminas de cobre, puliéndolas y después de un minuto, al completar su preparación se sumergieron en los tubos de ensayos. Los tubos se taparon con tapones tipo corcho con respiradero.
- Se colocaron los tubos en el equipo de la Figura 37 para mantener un baño termostático a 50 °C durante 3 horas.

Figura 37.

Recipiente de presión de corrosión de la tira de cobre, NTB Classic



Nota. Adaptado NTB Classic [Fotografía], por Normalab, 2019.

- Al finalizar el tiempo, se vació cuidadosamente el contenido del tubo en un vaso de precipitados de 150 mL para que la lámina de cobre se deslice suavemente y se la retiró con una pinza.

- Se secó la lámina con papel filtro y comparó con el estándar de corrosión (Figura 1).

Índice de Cetano Calculado. Para determinar el índice de cetano en las muestras de diésel se empleó la ecuación 14, establecida en la norma técnica ecuatoriana NTE INEN 1495:2013.

$$\begin{aligned} \text{Índice de cetano calculado} \\ = 454,74 - 1641,416D + 774,74D^2 - 0,554B \\ + 97,803(\log B)^2 \end{aligned} \quad (14)$$

Donde:

D: Densidad a 15 °C, $g mL^{-1}$, determinada por las normas ASTM D1298 o ASTM D4052.

B: Temperatura media de ebullición, °C, determinada por las normas ASTM D86 y corregida a presión barométrica estándar.

Clasificación de partículas. Para determinar la clasificación de partículas se empleó la norma ASTM D7596 con el analizador automatizado de residuos de la Figura 38; este equipo posee un láser y un lente óptico que permite fotografiar digitalmente la muestra y estimar el tamaño de partícula en función a la cantidad de energía de la luz que pasa a través del área de ensayo, además cuenta las partículas, evalúa sus formas y mecanismos de desgaste por los cuales han sido generadas (Bilbao y Málaga, 2012).

Figura 38.

Analizador automatizado de residuos, LaserNet Q230.



Nota. Adaptado de *LaserNet 230* (p. 2), por Spectro Scientific, 2016.

El detalle del ensayo se realizó según la especificación de Spectro Scientific (2017), donde:

- Se vertió 120 mL de muestra en un bote de grado de limpieza certificado y se llevó al equipo.
- La muestra se extrajo mediante una celda de visualización que se retroalimenta con un diodo laser pulsado para captar el movimiento de las partículas.
- Se transmitió a través del fluido una luz coherente que formó una imagen en la cámara electrónica.
- Finalmente, cada imagen se analiza según una red neuronal artificial desarrollada específicamente por el fabricante.

Conteo de partículas. El análisis de conteo de partículas se ejecutó para muestras en los puntos de muestreo A, B y C detallados en la sección 3.2, por ello se etiquetó las muestras de acuerdo a lo detallado en la Tabla 9.

Tabla 9.

Etiquetado de muestras para el análisis de conteo de partículas

Etiqueta de la muestra	Lugar de muestreo
T1	Camión cisterna equivalente a la muestra 1
ES004	Tanque de almacenamiento ES004 equivalente a la muestra 2
ES001	Tanque de almacenamiento ES001
ES002	Tanque de almacenamiento ES002
ES003	Tanque de almacenamiento ES003
S4	Surtidor del tanque de almacenamiento ES004

Los análisis se realizaron en los laboratorios de IIASA-CAT, lugar que por temas de confidencialidad no puede proporcionar información acerca de la marca y modelo del contador de partículas óptico utilizado para el análisis, sin embargo, se conoce que calibran su equipo automático bajo el método ISO 11171:1999; este análisis se mide en partículas por mililitro y los resultados se reportan mediante el Código ISO 4406.

Análisis de Tecnologías de Filtración

El análisis tecnológico implica el estudio de las ventajas y desventajas de cada tecnología, con el propósito de seleccionar la más apropiada bajo algunos

criterios, siendo el más relevante el de obtener y mantener un nivel de limpieza ISO 18/16/13.

A la bahía de combustible que es el objeto de estudio, ingresan en promedio 160.000 galones de diésel premium mensualmente y 40.000 galones cada semana en camiones cisterna de capacidades volumétricas de 4.000 y 6.000 galones; la velocidad de descarga está dada por la bomba que realice la transferencia de combustible para lo cual, se cuenta con la bomba del camión o la bomba de la estación que succionan el combustible a 100 GPM o 200 GPM, respectivamente.

Sistema de Prefiltrado Instalado en Estación de Servicio

El sistema de prefiltración propio de la estación, para la recepción de combustible corresponde al Purificador AK-4000 descrito en la sección 3.1.

Tecnología de Filtración de Donaldson

El sistema de filtrado Clean Solutions de Donaldson ofrece una simple y efectiva filtración para eliminar la contaminación antes de que ingrese al tanque de almacenamiento y lo contamine, está constituido por un ensamble de cabezales con ocho filtros como se muestra en la Figura 39.

Figura 39.

Ensamble de cabezales con ocho filtros.



Nota. Adaptado de *Ensamblados* (p.14), por Donaldson Company, 2015.

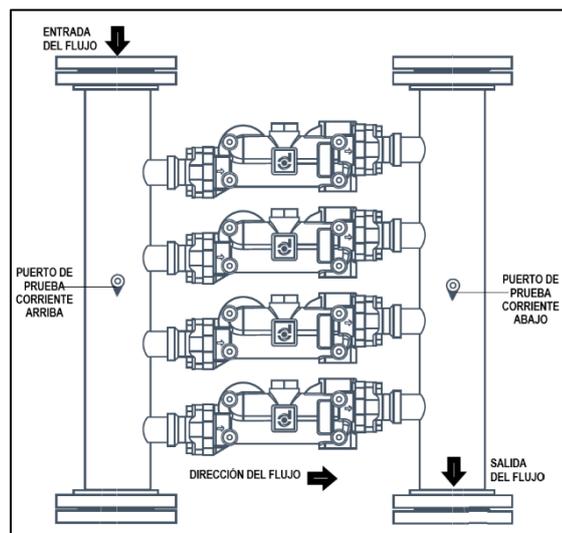
El ensamble está constituido por tubos de acero al carbono pintado con cabezales de aluminio e insertos de acero para minimizar el roce entre metales del cabezal y filtro, el inserto roscado tiene un sellado con o-ring o junta tórica para separar completamente el lado limpio del filtro del lado sucio y maximizar así la protección. A continuación, se lista el detalle técnico del ensamble de cabezales:

- Rango de flujo máximo: 500 GPM / 1893 lpm
- Presión de trabajo: 290 psi
- Temperatura de operación: -40 °C a 120 °C
- Conexión: bridas de 4 in
- Compatibilidad: diésel y lubricantes
- Dimensiones: longitud 838 mm y anchura 621 mm
- Incluye dos manómetros de saturación y dos puertos de muestreo.

El funcionamiento del equipo se basa en dividir el caudal de manera equitativa entre los filtros unidos paralelamente, el flujo inicialmente circula por los filtros del lado izquierdo y continúan su paso a los filtros de la derecha como se muestra en la Figura 40, de tal manera se reduce la caída de presión en cada filtro (Donaldson Company, 2015).

Figura 40.

Dirección del flujo en el ensamble de ocho filtros.



Nota. Adaptado de *Ensamble de 8 filtros* (p. 15), por Donaldson Company, 2015.

Los elementos filtrantes o filtros Donaldson poseen un diseño modular roscable con un recubrimiento E-coating que ofrece una máxima resistencia contra la corrosión y adhesión epóxica. El medio filtrante es de fibra sintética con tecnología de reducción electrostática (DERT por sus siglas en inglés), esta tecnología previene el daño del medio filtrante a razón que neutraliza la carga eléctrica acumulada en el fluido hasta que se descarga o hace chispas en el filtro, quemándolo y haciendo hoyos en el medio de filtración. El detalle técnico de los elementos filtrantes Donaldson se lista a continuación:

- Material: fibra sintética con tecnología de reducción electrostática de Donaldson
- Eficiencia: 99,95 % a 7 μm
- Presión de saturación: 50,8 psi
- Presión máxima: 350 psi
- Temperatura máxima: 88 °C
- Dimensiones nominales: diámetro 127 mm y longitud 362 mm
- Aplicación: diésel
- Nivel de limpieza objetivo: 16/14/13

En un estimado, cada elemento filtrante puede filtrar eficientemente entre 40.000 a 50.000 galones de combustible aproximadamente y en conjunto el ensamble puede filtrar alrededor de 360.000 galones. El costo del ensamble de cabezales es \$ 6,200 y cada elemento filtrante es \$ 290,00; en total el costo de este equipo es \$ 8.250 (sin incluir el IVA).

Tecnología de Filtración de Fscem & Harvard

El equipo de filtración de Fscem está constituido por un portafiltros y cuatro filtros tipo manga como se puede observar en la Figura 41.

Figura 41.

Portafiltros con cuatro elementos filtrantes



El portafiltros es fabricado en acero al carbón, con recubrimiento interior de pintura fenólica y recubrimiento exterior de poliuretano sobre fondo epóxico de 8 mills, además está diseñado con entrada superior y salida superior o inferior. Este

portafiltros posee en la tapa superior una válvula para liberar aire y en su cuerpo dos manómetros y tomamuestras para controlar al fluido a la entrada y salida de los filtros como se muestra en la Figura 42, a continuación, su detalle técnico:

- Rango de flujo máximo: 400 GPM
- Presión máxima: 100 psi
- Conexión: bridas de 4 in
- Dimensiones: longitud 1.820 mm y diámetro 690 mm (incluye tomamuestra y base)
- Sellos de vitón

Figura 42.

Partes del portafiltros FS-HF-2-400



Cada filtro está constituido por una canastilla, un sujetador y un elemento filtrante tipo manga, como se puede ver en la Figura 43.

Figura 43.

Partes de elemento filtrante



El elemento filtrante es coalescente de 2 micras absolutas de polipropileno y puede retener hasta 1.200 gr de material particulado, a continuación, su detalle técnico:

- Material: polipropileno
- Flujo máximo: 50 GPM
- Eficiencia: 99% a 2 μm
- Dimensiones: diámetro 180 mm y longitud 810 mm
- Temperatura máxima: 93 °C
- Nivel de limpieza objetivo: ISO 18/16/13

En un estimado los filtros pueden ser cambiados tras filtrar entre 60.000-200.000 galones. El costo del portafiltros es de \$3.250 y de cada manga filtrante es de \$ 93,00; su costo total del equipo es de \$ 3.622 (sin incluir el IVA)

Selección Técnica de la Mejor Tecnología de Filtración

En la siguiente sección se empleó un mapa de innovación como herramientas de comparación cualitativo y el proceso AHP como método de selección multicriterio que facilitó la selección de una de las tecnologías anteriormente analizadas.

Mapa de Innovación

Para construir el mapa de innovación se definió el tipo de mapa de innovación a emplear, considerando que se estudió las tecnologías de filtración ofertadas en el mercado, es decir, un producto industrial; se requiere del uso de un mapa de innovación de productos específicos constituido por los siguientes componentes:

- Tecnología del material
- Tecnología del proceso/manufactura
- Diferenciación técnica
- Tecnología del producto
- Producto
- Propuesta de valor agregado al cliente

Matriz para la Selección de la Mejor Tecnología

Para seleccionar a una de las tres tecnologías estudiadas, fue necesario aplicar el Método AHP según la sección 2.7.2, en su estructura consideró los siguientes atributos:

- Objetivo global: Reducir el contenido de material particulado menor a 10 μm en el combustible diésel almacenado en la estación de servicio de una empresa minera.
- Criterios de selección: Denotados por la letra C, detallados a continuación:
 - Impacto de la tecnología sobre el objetivo global (C1)
 - Repercusión en el cliente (C2)
 - Posibilidad de éxito a corto plazo (C3)
 - Variabilidad (C4)
 - Peso económico (C5)
 - Valor agregado al producto final (C6)
- Alternativas: Corresponden a las tres tecnologías denotadas con T de la siguiente manera
 - Purificador AK-4000 (T1)
 - Tecnología de Donaldson (T2)
 - Tecnología de Fscem & Harvard (T3)

Para realizar el análisis del método AHP, se construyó matrices cuadradas según la Tabla 10 para comparar las tres tecnologías con los criterios de selección y posteriormente se les atribuyó valores numéricos de la Tabla 3 con el objetivo de priorizar cada elemento en su respectivo nivel, de acuerdo a la experiencia de un especialista de la empresa involucrada y por parte de la autora del presente trabajo.

Tabla 10.

Matriz de comparación de tecnología para cada criterio

Criterio N°	T1	T2	T3
T1			
T2			
T3			

Luego se construyó otra matriz (ver Tabla 11) donde se compararon los criterios de selección. Posteriormente las matrices fueron normalizadas (se sumó los valores de cada columna y en una nueva matriz se dividió cada valor de la matriz de

comparación para la suma de su columna, luego se promedian los valores de cada columna) para hallar los vectores de prioridad y pesos de los criterios.

Tabla 11.

Matriz A, matriz de comparación de criterios de selección

	C1	C2	C3	C4	C5	C6
C1						
C2						
C3						
C4						
C5						
C6						

Con los vectores resultantes se construyó la matriz de la Tabla 12 donde se colocó los criterios con su peso correspondiente en la fila bajo su denotación y los vectores prioridad obtenidos de la comparación de las tecnologías con respecto a cada criterio en las columnas; la puntuación total se obtuvo al operar peso de criterio por alternativa según corresponda.

Tabla 12.

Matriz para selección de la mejor tecnología.

Tecnología	C1	C2	C3	C4	C5	C6	Puntuación total
Purificador AK-4000							
Tecnología de Donaldson							
Tecnología de Fscheme & Harvard							

Es importante mencionar que se comprobó la consistencia de cada matriz.

Implementación de la Mejor Tecnología de Filtración

En base al mapa de innovación y al método AHP, se seleccionó la tecnología que obtuvo mayor puntuación total en la matriz del proceso AHP.

Análisis y Discusión de Resultados

Caracterización del Combustible Diésel Premium

Propiedades Fisicoquímicas del Combustible Diésel Premium

La caracterización de las propiedades fisicoquímicas para las dos muestras de combustible diésel se realizó mediante el proceso detallado en las secciones 3.3.2.1 a 3.3.2.10 y en la Tabla 13 se muestran los resultados obtenidos.

Tabla 13.

Resultados de caracterización de muestras de diésel premium

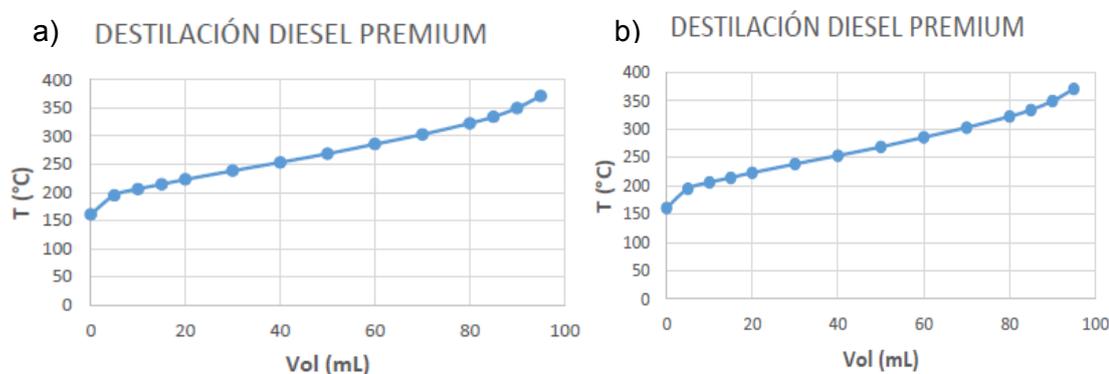
Propiedad fisicoquímica	Muestra 1	Muestra 2	Norma	Cumple Si o No
Viscosidad cinemática a 40 °C	3,526 mm ² s ⁻¹	3,617 mm ² s ⁻¹	NTE INEN 1489:2012	Si
Punto de inflamación	62 °C	62 °C	NTE INEN 1489:2012	Si
Temperatura de destilación del 90%	349,9 °C	350,0 °C	NTE INEN 1489:2012	Si
Contenido de agua y sedimentos	< 0,05%	< 0,05%	NTE INEN 1489:2012	Si
Contenido de residuo de carbón sobre el 10% del residuo de destilación	0,03%	0,04%	NTE INEN 1489:2012	Si
Contenido de cenizas	< 0,01%	< 0,01%	NTE INEN 1489:2012	Si
Contenido de azufre	46,2 ppm	38,9 ppm	NTE INEN 1489:2012	Si
Corrosión a la lámina de cobre	1A	1A	NTE INEN 1489:2012	Si
Índice de cetano calculado	49,18	54,2	NTE INEN 1489:2012	Si

Con los resultados de la Tabla 13 se determina que el combustible entregado por el proveedor (muestra 1) y el combustible almacenado en el tanque ES004 (muestra2) cumple con las especificaciones de la NTE INEN 1489:2012, la cual establece los requisitos que debe cumplir el diésel a ser comercializado en Ecuador.

Además, en el ensayo de temperatura de destilación del 90% se obtuvieron las curvas de destilación de la Figura 44 para las muestras 1 (a) y 2 (b).

Figura 44.

Curvas de destilación para muestra 1 (a) y muestra 2 (b).



Según la Figura 44, se puede evidenciar que la temperatura de destilación de un 90% de la muestra es 350 °C, valor mayor a 347 °C el cual es reportado en el trabajo de Gómez y Vargas (2017), sin embargo se encuentra bajo el límite permisible máximo de la norma NTE INEN 1489:2012.

Densidad

La densidad de las dos muestras de combustible diésel premium se determinó a 15 °C mediante el procedimiento detallado en la sección 3.3.2.1, se realizó la lectura de los dos hidrómetros para ambas muestras y se reportó los valores de la Tabla 14.

Tabla 14.

Medición de la densidad de las dos muestras de diésel premium

Muestra	Densidad (gcm^{-3})
1	0,846
2	0,847

Los valores de la Tabla 14 son semejantes al valor obtenido por Gómez y Vargas (2017) en su estudio donde caracterizaron diésel premium ecuatoriano. Por otra parte los resultados también se encuentran en el rango de densidades típicas para diésel de transportes determinado por Hsu (2006).

Clasificación de Partículas

La clasificación de partículas para las dos muestras se realizó mediante el proceso descrito en la sección 3.3.2.11. En la Tabla 15 y 16 se muestra los resultados para la muestra 1 y 2, respectivamente.

Tabla 15.

Resultados de la clasificación de partículas de la muestra 1

Método de diámetro máx.	Parte mL ⁻¹	Máx. (µm)	Prom. (µm)	20-25 µm	25-50 µm	50-100 µm	>100 µm
Desgaste de corte	23,0	66,1	30,2	8,0	14,0	1,0	0,0
Desgaste deslizante severo	236,1	72,6	29,2	75,0	151,1	10,0	0,0
Desgaste por fatiga	488,2	53,2	24,2	345,2	142,1	1,0	0,0
Desgaste no metálico	34,0	50,6	26,7	17,0	16,0	1,0	0,0
Desgaste sin clasificación	10,0	46,6	26,8	6,0	4,0	1,0	0,0
Agua libre	0						

Nota: Las partículas clasificadas son aquellas que poseen un tamaño de partícula >20 µm.

Con los resultados de la Tabla 15, se determina que la muestra 1 presentó principalmente partículas de desgaste por fatiga, seguidas de partículas de desgaste de deslizamiento severo y partículas de desgaste no metálico; y no presenta agua libre.

Tabla 16.

Resultados de la clasificación de partículas de la muestra 2

Método de diámetro máx	Parte mL ⁻¹	Máx (µm)	Prom (µm)	20-25 µm	25-50 µm	50-100 µm	>100 µm
Desgaste de corte	5,0	36,0	27,5	2,0	3,0	0,0	0,0
Desgaste deslizante severo	12,0	59,7	31,3	3,0	8,0	1,0	0,0
Desgaste por fatiga	53,0	61,9	26,0	31,0	21,0	1,0	0,0
Desgaste no metálico	24,0	45,9	27,5	10,0	14,0	0,0	0,0
Desgaste sin clasificación	2,0	24,3	23,1	2,0	0,0	0,0	0,0
Agua libre	0,0						

Nota. Las partículas clasificadas son aquellas que poseen un tamaño de partícula >20 µm.

Los resultados de la Tabla 16 permiten determinar que la muestra 2 presentó principalmente partículas de desgaste por fatiga, seguidas de partículas de desgaste no metálico y partículas de desgaste deslizante severo; de igual manera no contiene agua libre.

Se puede considerar que las partículas por desgaste de fatiga provienen de fallas propias al paso del fluido en las tuberías que transporta el combustible hasta el Poliducto Pascuales-Cuenca y, por corrosión o falta de lubricidad en ejes del dique de almacenamiento perteneciente al camión cisterna; las partículas de desgaste deslizante severo posiblemente proceden del cizallamiento de válvulas y tapas y, las partículas de desgaste no metálico estarían atribuidas a la falta de mantenimiento en el tanque de almacenamiento estacionario de la bahía de combustible.

Al considerar los resultados de partes por mL de las dos tablas anteriores, se determina que la muestra 2 presentó una reducción en todas las clasificaciones de partículas con respecto a la muestra 1. Las partículas mayormente presentes se redujeron de la siguiente manera: partículas de desgaste por fatiga en un 89%, partículas de desgaste de deslizamiento severo en un 95%, y partículas de desgaste no metálico en un 29%.

Conteo de Partículas

El análisis de conteo de partículas se realizó según lo descrito en la sección 3.3.2.12 y los resultados del ensayo se muestran en la Tabla 17; donde se indica el lugar de muestreo, el código ISO obtenido y la cantidad de partículas por mililitro de acuerdo a los tamaños de partícula señalados.

Tabla 17.

Resultados del análisis de conteo de partículas

Muestra	Código ISO	Tamaño de partículas [μm]							
		> 4	> 6	> 10	> 14	> 18	> 21	> 38	>50
ES001	23/23/19	56.838	40.184	15.710	3.939	1.459	518	22	7
ES002		METAL							
ES003	22/20/15	25.520	7.760	1.368	317	144	67	7	3
ES004	21/19/16	16.860	4.841	1.165	423	234	131	24	12
S4	22/21/16	36.274	15.725	2.895	596	247	115	11	3
T1	23/21/16	40.137	17.867	3.296	604	205	72	5	2

Con los resultados de la Tabla 17, se determina que ninguna muestra cumple con el requisito del estándar ISO 4406:1999 del combustible diésel especificado en

la Carta Mundial del Combustible, equivalente al nivel de limpieza 18/16/13. Paralelamente, es importante destacar que el laboratorio de IIASA en su reporte detalla que en la muestra del tanque ES002 se encontró partículas metálicas visibles y partículas extrañas, por ello los resultados de la muestra supera la codificación ISO.

Análisis de tecnologías de filtración

Sistema de Prefiltrado Instalado en la Estación de Servicio

El sistema de prefiltrado instalado en la bahía de combustible corresponde al equipo Purificador AK-4000, este equipo no posee un tomamuestras o un sensor de saturación que facilite conocer el estado de su operación.

Para evaluar el funcionamiento del Purificador AK-4000, se puso en marcha y se tomó muestras en: camión cisterna (T1), tanque de almacenamiento ES004 después de 45 minutos del proceso de recepción de combustible y en el surtidor correspondiente al dique (S4); para posteriormente realizar el análisis de conteo de partículas y sus resultados se muestran en la Tabla 18.

Tabla 18.

Resultados del conteo de partículas empleando el Purificador AK-4000

Muestra	Código ISO	Tamaño de partículas [μm]							
		> 4	> 6	> 10	> 14	> 18	> 21	> 38	> 50
T1	20/17/13	6.206	1.017	141	46	27	16	1	1
ES004	20/17/14	6.505	1.257	255	85	45	23	4	2
S4	20/17/12	5.849	895	102	21	10	6	1	1

Con los resultados de la Tabla 18, se determina que el paso del combustible desde el camión cisterna por el Purificador AK-4000 tiene un efecto adverso, debido a que el contenido de partículas aumenta; por tanto, el equipo no cumple con su especificación de retener partículas de hasta 10 micras y el combustible se encuentra fuera de la especificación del estándar ISO 4406. Con respecto a la distribución del combustible desde el tanque al usuario se determina que los filtros Centurión sí reducen el material particulado, sin embargo, no cumple con el estándar establecido.

En consecuencia, fue necesario estudiar tecnologías que permitan la disminución del material particulado del combustible a tamaños inferiores a 10 μm y a su vez evitar la rápida obstrucción de los filtros de los surtidores y de los vehículos o equipos de la empresa minera.

Tecnologías Ofertadas por el Mercado

La tecnología de Fscheme & Harvard posee un rango de flujo máximo mayor al flujo dado por los sistemas de alimentación disponibles de 100 y 200 GPM, pero dicho rango es inferior al brindado por la tecnología de Donaldson.

El elemento filtrante de Fscheme & Harvard posee una eficiencia superior a la ofertada por Donaldson, dado que oferta una manga con tamaño de poro absoluto de 2 micras.

Según datos proporcionados por los ofertantes, la tecnología de Fscheme requerirá de un mantenimiento para las cuatro mangas filtrantes cada 45 días a un costo de \$372 mientras que la tecnología de Donaldson requerirá cambiar los ocho filtros cada 67 días a un costo de \$ 2.320.

Selección Técnica de la Mejor Tecnología de Filtración

Propuesta Técnica de Tecnologías de Filtración

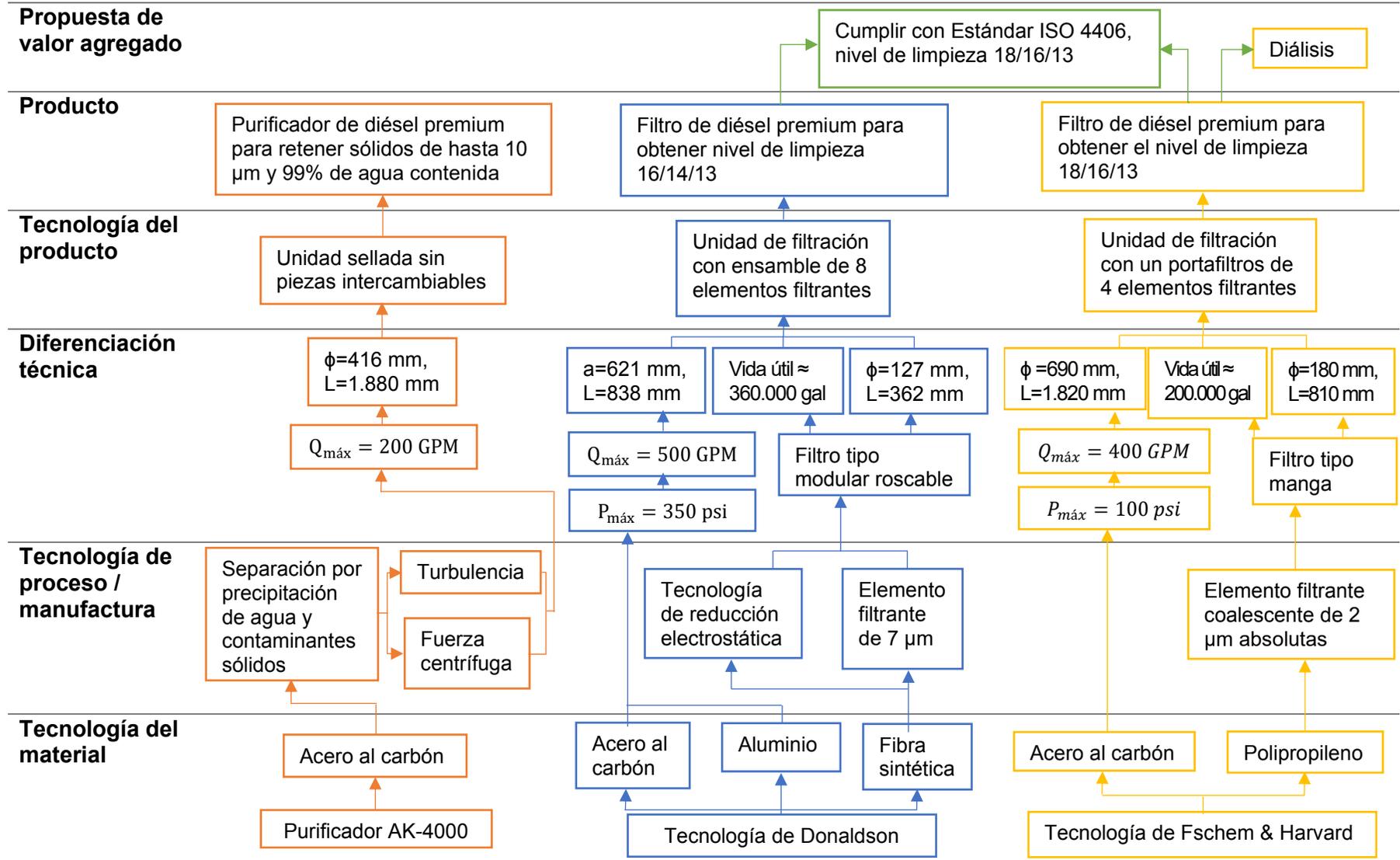
En el siguiente apartado se muestra la propuesta técnica para reducir el material particulado menor a 10 μm presente en el combustible de la estación de servicio mediante un mapa de innovación de producto específico para el consumidor, ver la Figura 45. En este esquema se planteó la evolución de las tres tecnologías de filtración anteriormente estudiadas, donde se relacionan los componentes tecnológicos con las ventajas técnicas para proporcionar un combustible de calidad desde la estación de servicio de la empresa minera.

Con respecto al aspecto económico, se consideran los costos iniciales y de mantenimiento. Los costos de iniciales involucran a los costos del equipo e instalación y los costos de mantenimiento se refieren a costos en consumibles como filtros o mangas según corresponda.

La tecnología de Donaldson requiere de \$11.250 como inversión inicial y de \$2.320 como inversión de mantenimiento bimestral. Y la tecnología de Fscheme & Harvard requiere de \$6.982 como inversión inicial y \$372 como inversión de mantenimiento cada 45 días.

Figura 45.

Mapa de innovación para la selección de la mejor tecnología de filtración



Método AHP

El método AHP se desarrolló de acuerdo a las especificaciones de la sección 3.5.2 considerando dos juicios de calificación: Ing. Franklin Cueva, Planificador de Operaciones de Superficie de la empresa involucrada (denominado especialista) y la autora de este estudio. En las Tabla 19 y 20 se muestran las matrices de comparación, su respectivo vector promedio y razón de consistencia (RC), según el especialista y autora del estudio, respectivamente.

Tabla 19.

Matrices de comparación según especialista

Criterio 1	T1	T2	T3	Vector promedio 1	
T1	1	1/5	1/7	0,074	
T2	5	1	1/3	0,283	RC
T3	7	3	1	0,643	0,050
Criterio 2	T1	T2	T3	Vector promedio 2	
T1	1	1/3	1/5	0,106	
T2	3	1	1/3	0,260	RC
T3	5	3	1	0,633	0,029
Criterio 3	T1	T2	T3	Vector promedio 3	
T1	1	1/5	1/5	0,091	
T2	5	1	1	0,455	RC
T3	5	1	1	0,455	0,00
Criterio 4	T1	T2	T3	Vector promedio 4	
T1	1	1/5	1/3	0,120	
T2	5	1	1/3	0,331	RC
T3	3	3	1	0,549	0,068
Criterio 5	T1	T2	T3	Vector promedio 5	
T1	1	1/3	1/7	0,074	
T2	3	1	1/7	0,433	RC
T3	7	7	1	0,485	0,023
Criterio 6	T1	T2	T3	Vector promedio 6	
T1	1	1/3	1/5	0,106	
T2	3	1	1/3	0,260	RC
T3	5	3	1	0,633	0,029

Tabla 20.

Matrices de comparación según autora del estudio

Criterio 1	T1	T2	T3	Vector promedio 1	
T1	1	1/7	1/9	0,057	
T2	7	1	1/3	0,295	RC
T3	9	3	1	0,649	0,062
Criterio 2	T1	T2	T3	Vector promedio 2	
T1	1	1/3	1/5	0,106	
T2	3	1	1/3	0,260	RC
T3	5	3	1	0,633	0,029
Criterio 3	T1	T2	T3	Vector promedio 3	
T1	1	1/5	1/5	0,091	
T2	5	1	1	0,455	RC
T3	5	1	1	0,455	0,000
Criterio 4	T1	T2	T3	Vector promedio 4	
T1	1	1/5	1/3	0,120	
T2	5	1	1/3	0,331	RC
T3	3	3	1	0,549	0,067
Criterio 5	T1	T2	T3	Vector promedio 5	
T1	1	1/5	1/7	0,074	
T2	5	1	1/3	0,283	RC
T3	7	3	1	0,643	0,049
Criterio 6	T1	T2	T3	Vector promedio 6	
T1	1	1/3	1/7	0,088	
T2	3	1	1/3	0,243	RC
T3	7	3	1	0,669	0,005

En la Tabla 21 y 22 se muestran las comparaciones entre los criterios de selección con su respectiva RC, según los participantes.

Tabla 21.

Matriz de comparación de criterios de selección según especialista

	C1	C2	C3	C4	C5	C6	
C1	1	3	3	7	1	1	
C2	1/3	1	5	3	1/7	1/3	
C3	1/3	1/5	1	2	1/5	1/3	
C4	1/7	1/3	1/2	1	1/3	1/5	
C5	1	7	5	3	1	1	RC
C6	1	3	3	5	1	1	0,091

Tabla 22.*Matriz de comparación de criterios de selección según autora*

	C1	C2	C3	C4	C5	C6	
C1	1	5	5	5	1	1	
C2	1/5	1	1/3	3	1/3	1/5	
C3	1/5	3	1	3	1/5	1/5	
C4	1/5	1/3	1/3	1	1/5	1/5	
C5	1	3	5	5	1	1	RC
C6	1	5	5	5	1	1	0,060

Luego se normalizó las matrices de las Tablas 21 y 22, para obtener los pesos de los criterios de selección, los resultados se muestran en la Tabla 23.

Tabla 23.*Peso de los criterios de selección según especialista y autora*

Participante	C1	C2	C3	C4	C5	C6
Especialista	0,251	0,118	0,066	0,047	0,284	0,235
Autora	0,273	0,069	0,089	0,042	0,254	0,273

Es importante mencionar que se comprobó que cada matriz presentó consistencia, pues las razones de consistencia (RC) son menores a 0,10. Finalmente, se construyó la matriz de la Tabla 24 donde se colocó el promedio de pesos de criterios de selección y vectores promedio, obtenidos de la evaluación de los dos participantes y se calculó la puntuación total.

Tabla 24.*Matriz de selección de la mejor tecnología.*

Tecnología	C1	C2	C3	C4	C5	C6	Puntuación total
Purificador AK-4000	0,262	0,094	0,077	0,044	0,269	0,254	0,089
Tecnología de Donaldson	0,289	0,260	0,455	0,331	0,358	0,252	0,310
Tecnología de Fscem & Harvard	0,646	0,633	0,455	0,549	0,564	0,651	0,605

Con base a los resultados de la Tabla 24 de manera conjunta con el especialista de la empresa minera se decidió optar por la tercera tecnología, Tecnología de Fscem & Harvard, cuya puntuación total es la mayor.

Para comprobar que la alternativa seleccionada por el método AHP tiene una diferencia significativa del 95%, se realizó un análisis de varianza (ANOVA) de un solo factor con los datos de la Tabla 25 que resultan de la multiplicación del peso de cada criterio por cada alternativa de la Tabla 24, sin considerar la puntuación total.

Tabla 25.

Datos para el análisis ANOVA

Tecnología	Criterios de selección					
	C1	C2	C3	C4	C5	C6
1	0,017	0,009	0,007	0,005	0,019	0,024
2	0,075	0,024	0,035	0,015	0,096	0,064
3	0,169	0,059	0,035	0,024	0,152	0,165

Los resultados del ANOVA se reportan en la Tabla 26.

Tabla 26.

Análisis de Varianza para la selección de la mejor tecnología

Fuente	Suma de cuadrados	GL	Cuadrado Medio	Razón-F	Razón-P
Tecnología	0,02276	2	0,011380	5,94	0,013
Error	0,02874	15	0,001916		
Total	0,05151	17			

Con los resultados del análisis de varianza se determina que al menos un par de tecnologías posee medias diferentes, por tanto, se corrobora que el resultado del método AHP es correcto.

Implementación de la Tecnología Seleccionada

Se implementó la tecnología ofertada por Fscheme & Harvard, conformada por un filtro FS-HF # 2-400 con cuatro elementos filtrantes coalescentes con tamaño de poro de 2 μm (Figura 46) en la bahía de combustible del Proyecto Fruta del Norte, anexo al purificador AK-4000 como se muestra en la Figura 47.

Figura 46.

Filtro Harvard Fschem modelo FS-HF #2-400 (vista frontal y posterior)

**Figura 47.**

Filtro FS-HF #2-400 anexo al Filtro AK-4000



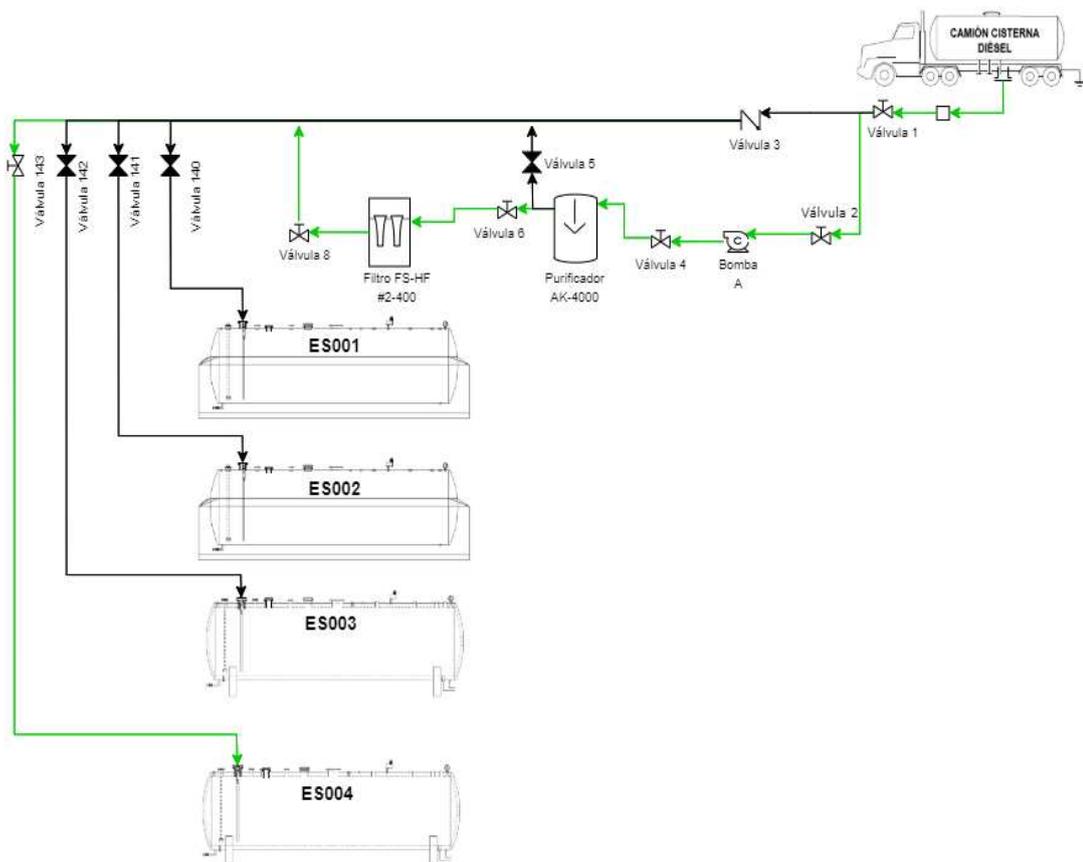
Durante la implementación fue necesario modificar la tubería de recepción de combustible, para lo cual, se desmontó la tubería y acondicionó con uniones universales y tipo T, codos, válvulas de cierre y reducciones; además se empleó tubos de 2 y 3 pulgadas.

Con la instalación de este filtro se mejorará la calidad del combustible al garantizar el cumplimiento del estándar ISO 4406 del combustible con el nivel de limpieza 18/16/13, el nuevo equipo se empleará durante el prefiltrado y diálisis de diésel.

La operación de prefiltrado de diésel consiste en filtrar el combustible durante su recepción, desde el tanque cisterna a uno de los tanques de almacenamiento; mediante el tránsito del gasoil por el filtro AK-4000 (macro filtrado) y el filtro FS-HF #2-400 que realiza un microfiltrado, ya que posee un elemento filtrante absoluto capaz de retener partículas de hasta $2\ \mu\text{m}$ y agua. En la Figura 48, se muestra la recepción de combustible desde el camión cisterna al tanque ES004 (tubería de color verde), para iniciar la operación abrir y cerrar las válvulas y, encender la bomba A. Las válvulas de color negro y blanco simbolizan válvulas cerradas y abiertas, respectivamente.

Figura 48.

Apertura y cierre de válvulas para el sistema de prefiltrado

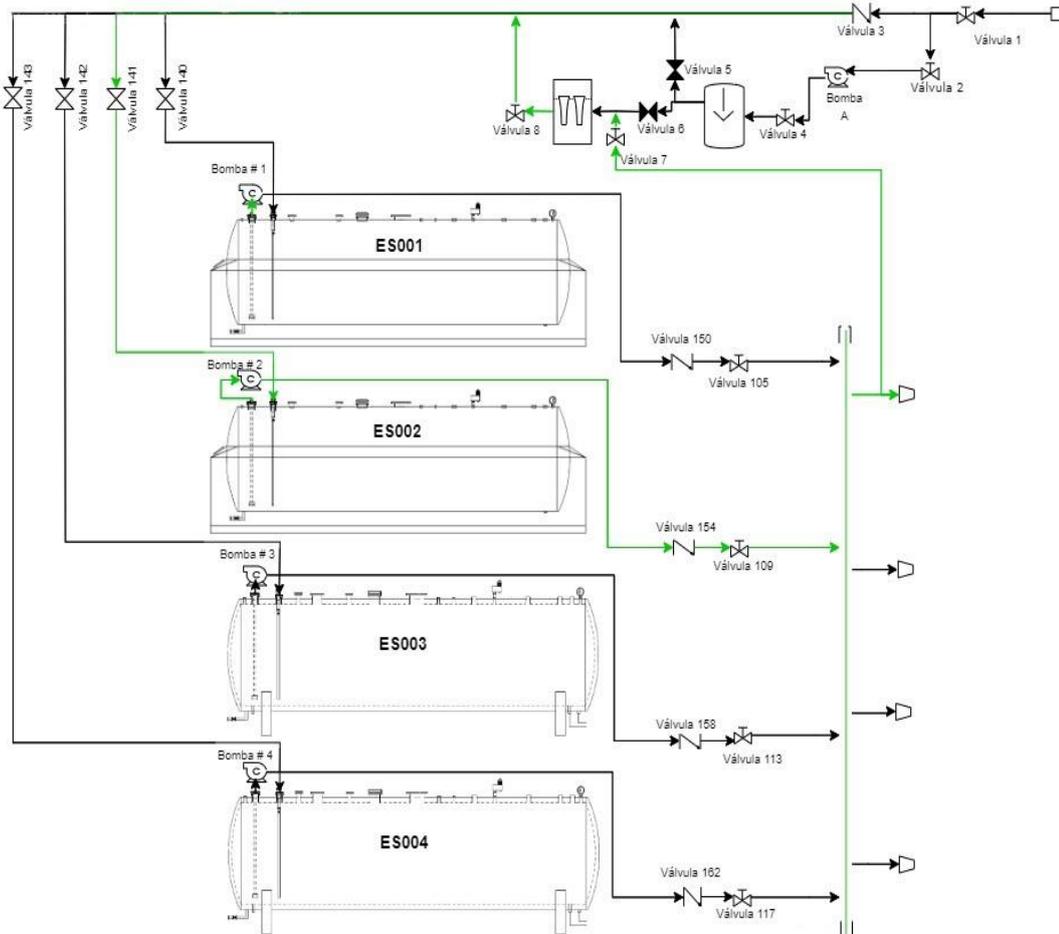


Por otra parte, la operación de diálisis o recirculación es una técnica de limpieza que permite limpiar un combustible almacenado en un depósito y se ejecuta

al extraer el combustible de un tanque específico con ayuda de la bomba ubicada en la parte superior del tanque para que fluya a través del filtro FS-HF #2-400 y retorne a su origen. La apertura y cierre de válvulas para realizar la diálisis del tanque ES002 se muestra en la Figura 49.

Figura 49.

Apertura y cierre de válvulas para el sistema de diálisis



Es importante señalar que durante la diálisis es será necesario suspender el servicio de abastecimiento de combustible a los equipos de la empresa, debido a que el diseño de las tuberías no permite realizar dos operaciones de manera continua; por lo tanto, se ha decidido realizar el proceso durante el turno nocturno por la baja demanda de combustible en ese horario y tendrá una duración aproximada de 8,5 horas para un tanque de 20.000 galones.

Conteo de Partículas

Para comprobar el equipo implementado se realizaron pruebas de conteo de partículas in situ con un contador de partículas portátil de marcha Schroeder (ver figura 50) perteneciente a F schem. El contador portátil opera bajo el estándar ISO 4406 y permite visualizar los tres tamaños de partículas mayores a 4, 6 y 14 μm ; el contador puede ser conectado a líneas hidráulicas con presiones de hasta 3.500 psi y viscosidades de hasta 1.000 cSt.

Figura 50.

Contador de partículas portátil, marca Schroeder.



Para realizar las mediciones, el contador portátil se conectó a una fuente de energía y a una línea de muestreo del filtro, de tal manera se desvió un pequeño flujo de combustible (entre 30 y 500 mLmin^{-1}) que fue recolectado en un envase. Se realizaron mediciones durante la descarga del fluido desde el camión cisterna, como se indica en la Figura 51, obteniendo los siguientes códigos de nivel de limpieza:

- ISO 23/22/21 para el combustible en la entrada del filtro.
- ISO 20/18/13 para el combustible en la salida del filtro.

Figura 51.

Pruebas del sistema de prefiltrado.



Por lo tanto, se determina que el filtro implementado si reduce el material particulado, sin embargo, el combustible a la salida del filtro no cumple con lo especificado en la Carta Internacional de Combustibles, nivel de limpieza 18/16/13.

De la misma manera, se realizó pruebas en el sistema de diálisis con el tanque ES002, donde se tomaron muestras de combustible al iniciar el proceso y después de 90 minutos conectando el contador a los puertos de entrada y salida de muestreo, respectivamente (ver figura 52). Se obtuvieron los siguientes resultados:

- ISO 20/18/15, al iniciar el proceso de diálisis.
- ISO 18/16/13, tras transcurrir 90 minutos del proceso de diálisis.

Figura 52.

Pruebas del sistema de diálisis.



Los resultados de conteo de partículas en la diálisis, permiten determinar que el filtro implementado reduce el material particulado del combustible almacenado a los niveles deseados ISO 18/16/13.

Durante el testeo de la diálisis se realizó una comparación visual entre las muestras a la entrada (izquierda) y salida (derecha) del filtro, ver Figura 53.

Figura 53.

Comparación visual de muestras, tomadas en el proceso de diálisis.



Como se puede observar en la Figura 55, la muestra del ingreso del filtro posee un aspecto turbio, mientras que la muestra de la salida del filtro posee un aspecto transparente.

Para corroborar los resultados de la implementación se enviaron muestras al laboratorio de IIASA para el análisis de conteo de partículas. En la Tabla 27 se exponen los resultados del sistema de prefiltrado, considerando los lugares donde se tomó las muestras: tanquero (T1), puerto de muestreo-entrada del filtro (M1) y puerto de muestreo-salida del filtro (M2).

Tabla 27.

Resultados del sistema de prefiltrado

Muestra	Código ISO	Tamaño de partículas							
		>4μ m	>6μ m	> 10 μm	> 14 μm	> 18 μm	> 21 μm	> 38 μm	> 50 μm
T1	20/18/14	7.995	2.469	441	122	64	36	9	5
M1	20/19/14	8.878	2.787	497	107	46	22	5	3
M2	19/17/13	4.139	893	147	45	21	10	2	2

Con los resultados de la Tabla 27, se calculó el rango Beta de filtración y la eficiencia de las mangas filtrantes para los tamaños de partículas mayores entre 4 y 14 micras, considerados en el estándar ISO 4406 (ver Tabla 28):

Tabla 28.

Rango Beta y eficiencia de mangas filtrantes durante recepción de combustible

Muestra	Tamaño de partículas			
	> 4μm	> 6μm	> 10 μm	> 14 μm
M1	8.878	2.787	497	107
M2	4.139	893	147	45
Rango Beta	2,145	3,121	3,381	2,378
Eficiencia	53,379	67,958	70,423	57,944

En conjunto con las Tablas 27 y 28 se determina lo siguiente:

- El nivel de limpieza del combustible entregado por el proveedor sobrepasa los límites máximos permisibles establecidos en el estándar ISO 4406.
- Entre los puntos de muestreo T1 y M1 se encuentra el Purificador AK-4000, equipo que produce un efecto adverso con las partículas inferiores a 14 micras ya que se aumentan en un 13%, únicamente las partículas mayores a 14 micras se reducen un 12%.

- El filtro FS-HF #2-400 posee una eficiencia del 70,4% para las partículas mayores a 10 micras y por tanto permite cumplir con el requisito del estándar ISO 4406 para las partículas mayores a 14 micras. No obstante, el estándar ISO 4406 no se cumple para las partículas menores a 10 micras en la salida del filtro implementado porque la cantidad de partículas mayores a 4 y 6 micras superan el requisito máximo del estándar.

En la Tabla 29 se exponen los resultados realizados durante la operación de diálisis y se consideraron los siguientes puntos de muestreo: tanque de almacenamiento ES002 (ES002_i), puerto de muestreo-entrada del filtro (M3) al inicio del proceso, puerto de muestreo-salida del filtro (M4) tras 90 minutos de realizar el proceso y en el tanque ES002 (ES002_f) al finalizar el proceso (después de 8.5 horas).

Tabla 29.

Resultados del proceso de diálisis del tanque ES002

Muestra	Código ISO	Tamaño de partículas							
		> 4µm	> 6µm	> 10 µm	> 14 µm	> 18 µm	> 21 µm	> 38 µm	> 50 µm
ES002 _i		Metal							
M3	19/16/13	3.870	615	121	41	24	13	3	2
M4	18/16/13	1.614	385	76	30	18	11	3	2
ES002 _f	19/16/12	2.541	449	99	34	19	11	2	1

De igual manera, con los resultados de la Tabla 29 se realizó los cálculos anteriormente señalados, ver Tabla 30.

Tabla 30.

Rango Beta y eficiencia de mangas durante diálisis del ES002

Muestra	Tamaño de partículas			
	> 4µm	> 6µm	> 10 µm	> 14 µm
M3	3.870	615	121	41
M4	1.614	385	76	30
Rango Beta	2,398	1,597	1,592	1,367
Eficiencia (%)	58,295	37,398	37,190	26,829

En base a las dos últimas tablas se determina:

- El tanque de almacenamiento ES002 mantenía el combustible con partículas metálicas visibles antes de iniciar con el proceso de diálisis.

- Luego de noventa minutos de realizar el proceso de diálisis se determinó que el combustible cumple con el estándar de limpieza ISO 18/16/13 a la salida del filtro y presentó una eficiencia del 58,3% para las partículas mayores a 4 μm .
- Al culminar el proceso de diálisis del tanque ES002, se cumple con el requerimiento del estándar ISO 4406 para las partículas mayores a 6 y 14 μm micras y, para las partículas mayores a 4 μm no cumple con el rango máximo permisible del estándar ($1.300-2.500 \text{ partmL}^{-1}$) porque lo supera en 41 unidades por mililitro.
- El estándar ISO 4406 no se cumple dentro del tanque de almacenamiento debido a que su estructura con dique de contención no permite realizar purgas periódicas y falta de mantenimiento preventivo.

Resultado Final

Finalmente, para determinar el efecto de este estudio se comparó los resultados iniciales con los resultados de muestras tomadas un mes después de la implementación del equipo. En la Tabla 31 se detalla la variación de material particulado en 1 mL para los tamaños de partículas señalados en los cuatro tanques estacionarios de la empresa minera.

Tabla 31.

Comparación de conteo de partículas en tanques de almacenamiento

Muestra	Código ISO	Tamaño de partículas				Objetivo principal	
		> 4 μm	> 6 μm	> 10 μm	> 14 μm	< 10 micras	
ES001	Inicial	23/23/19	56.838	40.184	15.710	3.939	97.022
	Final	19/17/13	4.558	842	177	63	5.400
	Variación porcentual		-92%	-98%	-99%	-98%	-94%
ES003	Inicial	22/20/15	25.520	7.760	1.368	317	33.280
	Final	20/18/15	7.525	1.712	491	197	9.237
	Variación porcentual		-71%	-78%	-64%	-38%	-72%
ES004	Inicial	21/19/16	16.860	4.841	1.165	423	21.701
	Final	20/18/14	6.894	1.410	315	117	8.304
	Variación porcentual		-59%	-71%	-73%	-72%	-62%
ES002	Inicial		Metal				
	Final	18/16/13	1.850	478	166	72	

De acuerdo a lo presentado en la Tabla 31, se determina que inicialmente 1 mL de diésel de los tanques ES001, ES003 y ES004 podría contener hasta aproximadamente 50.668 partículas menores a 10 μm , lo que representa el 89% de material particulado para una distribución de tamaño superior entre 4 y 50 μm .

En los tanques ES001, ES003 y ES004 se redujo el material particulado menor a 10 μm en un 94, 72 y 62%, respectivamente, después de un mes de la implementación del filtro FS-HF #2-400. El combustible del tanque ES001 cumple únicamente el requerimiento del estándar ISO 4406 para las partículas mayores a 14 μm ; por ende, el combustible de los tanques ES003 y ES004 no cumple con el estándar.

En el tanque ES002, el comportamiento es distinto, inicialmente se reportó la presencia de partículas metálicas visibles y tras un mes de la implementación del filtro seleccionado el combustible almacenado cumplió con el código de limpieza ISO 18/16/13 establecido en la Carta Mundial del Combustible.

En la Tabla 312 se realizó la comparación del nivel de limpieza entregado por el proveedor en el camión cisterna.

Tabla 32.

Comparación de niveles de limpieza en el tanquero

	Muestra	Código ISO	Tamaño de partículas			
			> 4 μm	> 6 μm	>10 μm	>14 μm
Camión cisterna	Inicial	23/21/16	40.137	17.867	3.296	604
	Final	20/18/14	7.995	2.469	441	122
	Variación porcentual		-80%	-86%	-87%	-80%

Nota. Valores negativos en variación porcentual indican reducción.

En el estudio de Tinoco (2018) se reportó un código de limpieza ISO 22/21/18 para el diésel premium descargado de un tanquero a un depósito de almacenamiento, mientras que en el presente estudio se obtuvieron los valores de la Tabla 30; por lo tanto, se deduce que el nivel de limpieza entregado por el proveedor es variable y no cumple con el estándar ISO 4406. Aunque, con el último muestreo de combustible en el camión cisterna se determina que en cada mililitro de combustible se redujeron en un 80% las partículas de 4 y 14 μm y en un 86% las partículas de 6 μm .

CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

Conclusiones

- Se disminuyó el material particulado en un porcentaje superior al 76% en el combustible diésel premium almacenado en la estación de servicio de la empresa minera involucrada con la implementación de un filtro FS-HF #2-400 para evitar la prematura obstrucción de los filtros propios de vehículos y equipos mineros.
- El combustible entregado por el proveedor y el combustible almacenado en los tanques estacionarios cumple con la normativa NTE INEN 1489:2012, sin embargo, no cumplen con los límites permisibles del estándar ISO 4406:1999 que establece un código de limpieza ISO 18/16/13 para el diésel de transportes.
- Con el análisis de las tecnologías ofertadas en el mercado, se determinó como principal criterio de selección al peso económico, puesto que además de los costos por el equipo e instalación se debe considerar el costo por mantenimiento. Por ello se optó por la tecnología de Fscheme & Harvard, quienes presentaron un costo por mantenimiento anual de \$2.976 mientras que Donaldson requiere dicho capital en un mantenimiento bimestral.
- Los niveles de limpieza alcanzados tras la implementación del filtro FS-HF #2-400 en las operaciones de recepción y diálisis del diésel a la salida del equipo son ISO 19/17/13 e ISO 18/16/13, respectivamente.
- El nivel de contaminación en los tanques de almacenamiento es superior a la salida del filtro implementado, debido a que los tanques no han tenido un mantenimiento periódico desde su instalación.
- El mapa de innovación permitió conocer estratégicamente los elementos de cada tecnología de acuerdo a la necesidad del usuario.
- El proceso de análisis jerárquico (AHP) permitió equilibrar los criterios de un especialista de la empresa minera y de la autora del proyecto para optar por la mejor propuesta tecnológica que reduce el contenido de material particulado en el combustible almacenado en la estación de servicio.

Recomendaciones

- Realizar el muestreo de combustible a diferentes tiempos de reposo y evaluar la sedimentación en el tanque de almacenamiento.
- Se recomienda la instalación de un filtro de malla antes de la bomba A (de recepción de combustible) para evitar daños ocasionados por sellos de válvulas o mangueras.
- Se recomienda realizar un análisis del aporte funcional del purificador AK-4000 o a su vez solicitar al proveedor un mantenimiento correctivo que permita validar la especificación del equipo que consiste en retener sólidos de hasta 10 μm .
- Se recomienda realizar el mantenimiento a los tanques para conservar el nivel de limpieza obtenido a la salida del filtro FS-HF #2-400.
- Se recomienda estudiar el sistema de postfiltrado, es decir, los filtros de cada surtidor puesto que, la Carta Mundial del Combustible establece que se debe de cumplir con los requisitos del estándar y por tanto el nivel de limpieza ISO 18/16/13 en la boquilla del dispensador.
- Se recomienda analizar la cantidad de emisiones de material particulado tras la operación de equipos mineros dentro de la mina para determinar el aporte de contaminación al aire.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ACEA, ALLIANCE, EMA, y JAMA. (2019). Diesel fuel en *Worldwide fuel charter* (6^a ed., pp. 50–88). https://www.acea.be/uploads/publications/WWFC_19_gasoline_diesel.pdf
- Acevedo, M., y Herrera, A. (2000). Influencia de los contaminantes del combustible diésel sobre la durabilidad de los elementos de precisión. *Centro Azúcar*, 27(4), 83–91.
- Acosta, L., Desdín, S., Cano, Y., y Rivas, E. (2017). Monitoreo geodésico de los asentamientos en tanques verticales de almacenamiento de combustible. *Minería y Geología*, 33(3), 265–277. <https://www.redalyc.org/jatsRepo/2235/223551846002/html/index.html>
- Aguilar, A., y Mera, A. (2018). Las concesiones mineras más importantes en el Ecuador al 2018, *Petroleo al día. Boletín Estadístico del Sector de Hidrocarburos*, 13, 19–31.
- ALCO. (22 de abril de 2020). Horno Ivymen N-8L 1100 °C. https://alco.es/ecommerce/productos.php?Orden=Cod_Ord+DESC&marcas=&grupo=EQUIPOS+E+INSTRUMENTACION&familia=HORNOS&texto_refina=
- ASTM International. (2015). ASTM D445-15a, Standard Test Method for Kinematic viscosity of transparent and Opaque Liquids (and Calculation of Dynamic Viscosity). <https://doi.org/10.1520/D0445-15A>.In
- Bacha, J., Freel, J., Gibbs, A., Gibbs, L., Hemighaus, G., Hoekman, K., Horn, J., Gibbs, A., Ingham, M., Jossens, L., Kohler, D., Lesnini, D., McGeehan, J., Nikanjam, M., Olsen, E., Organ, R., Scott, B., Sztenderowicz, M., Tiedemann,... Mills, J. (2007). Diesel Fuels Technical Review. Chevron Global Marketing, 1–116. <https://doi.org/10.1063/1.3575169>
- Basté, J. (2013). Determinación del comportamiento de los componentes contaminantes en el sistema de alimentación diésel. *Revista Ciencias Técnicas Agropecuarias*, 22(4), 65–68.
- Berumen, S., y Redondo, F. (2007). La utilidad de métodos de decisión multicriterio (como el AHP) en un entorno de competitividad creciente. *Cuadernos de Administración*, 20(34), 65–84.
- Bilbao, M., y Málaga, A. (2012). Contaje de partículas. *Wear Check Iberoamerica*, 1–12.
- Bolt, K., y Hall, B. R. (2018). Fuel for land and marine diesel engines and for nonaviation gas turbines. En *Significance of tests for petroleum products*. (9th

- ed., pp. 37–56). <https://doi.org/10.1520/stp7c-eb>
- Brunelle, G. (2018). *Almacenamiento y distribución de combustible tubería detalles* [Archivo PDF]. Recuperado de ECFN-FDN-PI-1710-DWG-00010[00-APP].pdf
- Brus, J. (2017). *Almacenamiento combustible civil notas generales y vista 3D. Ecuador* [ARCHIVO PDF]. Recuperado de ECFN-FDN-CI-1710-DWG-00010[03-APP].pdf
- Cannon Instrument Company. (2020a). CANNON-Fenske Routine viscosimeter. Recuperado el 20 de abril de 2020 de <https://www.cannoninstrument.com/en/product/manual-glass-viscometers/cannon-fenske-routine-viscometer--CANNON CF-Routine GV>
- Cannon Instrument Company. (2020b). CT-2000. Recuperado el 20 de abril de 2020 de <https://www.cannoninstrument.com/en/Image/GetDocument/12>
- Carrillo, C., y Papacristofilou, S. (2017). *Derivados del Petróleo. El diésel* [ARCHIVO PDF]. <https://www.gob.mx/cms/uploads/attachment/file/253452/GasolinaFT.pdf>
- CIM-TEK. (s.f.-a). *30033 Centurion Element* [ARCHIVO PDF]. https://www.cim-tek.com/images/cimtek_pdf/30033_sell_sheet_lowres.pdf
- CIM-TEK. (s.f.-b). *30034 Viking Element* [ARCHIVO PDF]. https://westechequipment.com/images/literature/cim-tek_viking-element_30034.pdf
- CIM-TEK. (s.f.-c). *40013 Centurion Housing* [ARCHIVO PDF]. https://www.cim-tek.com/images/cimtek_pdf/40013_sell_sheet_lowres.pdf
- CIM-TEK. (s.f.-d). *40186 Viking 1 Housing* [ARCHIVO PDF]. https://www.cim-tek.com/images/cimtek_pdf/40186_sell_sheet_lowres.pdf
- Córdoba, C., y Molina, J. (2011). Caracterización de sistemas de ventilación en minería subterránea. *Boletín de Ciencias de La Tierra*, (29), 73–86.
- Donaldson Company, I. (2015). *Soluciones de combustible y lubricante limpios* [ARCHIVO PDF]. <https://www.donaldson.com/content/dam/donaldson/engine-hydraulics-bulk/catalogs/bulk-fluids/latin-america/f111500-spc/Catalogo-de-Filtracion-a-Granel-Clean-Solutions.pdf>
- Donalson Company, I. (2013). *Combustible limpio, desempeño constante* [ARCHIVO PDF]. [http://www.marketingdonaldson.com/resources/comunicacion_jul2014/F111504\(09-13\)KitsdeDiéselLimpio.pdf](http://www.marketingdonaldson.com/resources/comunicacion_jul2014/F111504(09-13)KitsdeDiéselLimpio.pdf)
- Donalson Company, I. (2017). Comparando filtros de combustible y sus eficiencias (μ). <https://docs.google.com/viewer?url=https%3A%2F%2Fwww.donaldson.com>

- [%2Fcontent%2Fdam%2Fdonaldson%2Fengine-hydraulics-bulk%2Fliterature%2Flatin-america%2Fbulk-fluids%2Ff111540-spc%2FComparando-Filtros-de-Combustible-y-sus-Eficiencias.pdf&pdf=true](#)
- Ecopetrol. (2011). *Manual de inspección, mantenimiento y reparación de tanques atmosféricos API 653*.
https://www.academia.edu/29509597/MANUAL_DE_INSPECCION_MANTENIMIENTO_Y_REPARACION_DE_TANQUES_ATMOSFERICOS_API_653_VI_CEPRESIDENCIA_DE_SERVICIOS_Y_TECNOLOGIA_CORPORATIVO_DE_NORMAS_Y_ESTANDARES_RELACION_DE_VERSIONES
- Fuelchief. (2020). *La importancia de una ventilación de emergencia en su tanque*. Recuperado el 30 de marzo de 2020 de <https://fuelchieftanks.com/the-importance-of-an-emergency-vent-on-you-tank/>
- Geankoplis, C. J. (1998). *Procesos de transporte y operaciones unitarias* (3ra ed.).
- Gigonsa. (2019). *Ficha técnica AK-4000C* [ARCHIVO PDF].
<https://www.gigonsa.com.mx/images/clasica/AK-4000-es.pdf>
- Gómez, C., y Vargas, L. (2017). *Medición y evaluación de las emisiones de material particulado y opacidad en una flota de vehículos con motor ciclo diésel, utilizando una mezcla de diésel con 20% de queroseno* [Tesis de Maestría, Escuela Politécnica Nacional].
<https://bibdigital.epn.edu.ec/handle/15000/17596>
- Gómez, D., Méndez, G., Méndez, E., Ortiz, G., y Turriago, Á. (2008). Metodología basada en proceso de jerarquía analítica (AHP) para seleccionar cadenas productivas que buscan soluciones de automatización a bajo costo. *Ingeniería*, 13(1), 15–26. <https://doi.org/10.14483/23448393.2085>
- Hernández, P., Santamaría, J., y Ríos, L. (2009). *Biodiésel: Producción, calidad y caracterización*. Universidad de Antioquia.
https://books.google.com.ec/books?id=yiaApKhNqRYC&pg=PA75&dq=combustible+diesel&hl=es&sa=X&output=html_text
- Hsu, C. (2006). Diesel fuels analysis. *Encyclopedia of Analytical Chemistry: Applications, Theory and Instrumentation* (pp. 1–9).
<https://doi.org/10.1002/9780470027318.a1806>
- INEN. (1982). Norma Técnica Ecuatoriana NTE INEN 930:1982. Petróleo crudo y sus derivados. Muestreo.
- INEN. (2013a). Norma Técnica Ecuatoria NTE INEN 1489:2012. Productos derivados del petróleo. Diésel. Requisitos. Quito - Ecuador.
<https://www.normalizacion.gob.ec/buzon/normas/1489-7.pdf>
- INEN. (2013b). Norma Técnica Ecuatoria NTE INEN 1493 Determinación del punto

- de Inflamacion de copa cerrada Pwnsky Martens, 1(1), 26.
<http://181.112.149.204/buzon/normas/1493-1.pdf>
- INEN. (2013c). Norma Técnica Ecuatoriana NTE INEN 1490:2013. Productos derivados del petróleo. Determinación del contenido de azufre. Método de la bomba, 10.
<https://drive.google.com/file/d/18IPQm4yW6F8tWP2NHupYvKXPHInrABiq/view>
- INEN. (2013d). Norma Técnica Ecuatoriana NTE INEN 927:2013. Productos de petróleo. Determinación de la corrosión de la lámina de cobre, *First Edit*, 7–12. https://www.normalizacion.gob.ec/buzon/normas/nte_inen_927-1.pdf
- IPU Group. (2016). *Diesel fuel conditioning handbook*.
- Jaca, R., y Burgos, C. (2013). Evaluación de fallas de tanques horizontales de almacenamiento de fluidos. *Mecánica Computacional*, XXXII, 3463–3482.
- Kučera, M., Aleš, Z., y Pexa, M. (2016). Detection and characterization of wear particles of universal tractor oil using a particles size analyzer. *Agronomy Research*, 14(4), 1351–1360.
- McCabe, W., Smith, J., y Harriott, P. (2007). Operaciones en las que intervienen partículas de sólidos. En *Operaciones unitarias en ingeniería química* (7th ed, pp. 1009–1118).
- Medina, A., Nogueira, D., Hernández, A., y Díaz, Y. (2012). Consideraciones y criterios para la selección de procesos para la mejora: Procesos Diana. *Ingeniería Industrial*, XXXIII, 272–281.
- Morrison Bros. Co. (2016). *Model 922 vent alarm* [ARCHIVO PDF].
<http://www.morbros.com/sites/default/files/922-SS-02.pdf>
- Morrison Bros. Co. (2019). *Model 818 clock gauge* [ARCHIVO PDF].
<http://www.morbros.com/sites/default/files/818-SS.pdf>
- Morrison Bros. (2020). *Reloj indicador* [ARCHIVO PDF].
<http://www.morbros.com/es/node/837>
- Normalab. (2019). *NTB Classic* [ARCHIVO PDF].
<http://www.normalab.com/en/produit/ntb-classic/>
- Nunes, W., y Romero, L. (2015). *Evaluación de la microfiltración de diésel comercial en la combustión de un motor* [Tesis de Grado, Universidad Santo Tomás]
<http://repository.usta.edu.co/handle/11634/2454>
- Ortoalresa. (2014). *Centrifugas para petróleos Serie Digtor 21C* [ARCHIVO PDF].
<https://ortoalresa.com/wp-content/files/triptico.pdf>
- Osorio, J., y Orejuela, J. (2008). EL Proceso de Análisis Jerárquico (AHP) y la toma de decisiones multicriterio. Ejemplo de aplicación. *Scientia Et Technica*,

- XIV(39), 247–252. <http://www.redalyc.org/resumen.oa?id=84920503044>
- Oxford Instruments. (2015). *X-Supreme 8000* [ARCHIVO PDF].
<https://messmedicion.com.ar/wp-content/uploads/2017/03/x-supreme8000-brochureL.pdf>
- PAC L.P. (2015). *Herzoz Optiflash Pensky Martens* [ARCHIVO PDF].
<http://www.paclp.com/tenants/pac/documents/OPTIFLASH PM-BROCHURE.pdf>
- Palomo, M. (2000). El proceso marketing-innovación como fuente de ideas creativas, *Ingenierías, III(8)*, 41–48.
- Pilusa, T. J., Mollagee, M. M., y Muzenda, E. (2012). Reduction of vehicle exhaust emissions from diesel engines using the whale concept filter. *Aerosol and Air Quality Research, 12(5)*, 994–1006.
<https://doi.org/10.4209/aaqr.2012.04.0100>
- Protectotank. (2008). *Válvulas de venteo* [ARCHIVO PDF].
<https://www.dmdirmark.com/uploads/product/PROTECTOTANK/valvulas-de-venteo.pdf>
- Purifisa Global Perú. (2019). *Sistemas de Purificación y Filtración Severa*. Recuperado el 28 de marzo de 2020 de <https://purifisagp.com/sistemas-de-purificacion-y-filtracion-severa-d-2/#!>
- Rogel, E. J. (2015). *Análisis y Descripción de las Etapas: Recepción, Tratamiento y Despacho de Combustible Jet Fuel del Terminal de Productos Limpios Beaterio* [Tesis de Grado, Universidad Tecnológica Equinoccial].
http://repositorio.ute.edu.ec/bitstream/123456789/6119/1/59218_1.pdf
- Salas, J. (1994). Aditivos para combustible diésel como parte del mantenimiento preventivo. En *Ingeniería Industrial* (pp. 69–76).
- Seider, W., Seader, J., Lewin, D., y Widagdo, S. (2004). *Product and Process Design Principles: Synthesis, Analysis and Evaluation*. (3ª ed). Wiley.
- Sparks, T., y Chase, G. (2016). Filtration – Introduction, Physical Principles and Ratings. *Filters and Filtration Handbook*, 1–54. <https://doi.org/10.1016/b978-0-08-099396-6.00001-0>
- Spectro Scientific. (2016). *LaserNet 200 Series* [ARCHIVO PDF].
<https://www.spectrosci.com/product/minilab-53/?fileID=8a80818957178be50157f7b31f987b1f>
- Spectro Scientific. (2017). *Predictive equipment maintenance oil analysis handbook*.
https://www.spectrosci.com/default/assets/File/SpectroSci_OilAnalysisHandbook_FINAL_2014-08.pdf
- Tamson Instruments. (2017). *Density measurement of petroleum products by*

- hydrometer method* [ARCHIVO PDF]. <https://tamson-instruments.com/media/pdf/d1298.pdf>
- TANAKA. (n.d.). *Automated distillation tester ad-7* [ARCHIVO PDF]. <https://www.tanaka-sci.com/en/products/pdf/ad-7.pdf>
- TANAKA. (2008). *Micro carbon residue tester* [ARCHIVO PDF]. <https://www.tanaka-sci.com/en/products/pdf/acr-m3.pdf>
- Tinoco, K. (2018). Optimizar la operación de maquinaria a diésel moderna. *PGE Petróleo & Gas*, 55–57. https://issuu.com/aihecuador/docs/pge_marzo_baja_e68aae159355c9/29
- Tribologik. (Abril de 2013). Corrosión al cobre: un método de análisis para lubricantes de turbinas, cajas de engranajes y sistemas hidráulicos. http://www.tribologik.com/newsletters/nl_2013apr_es.pdf
- Wichmann, H. (2007). Diesel exhaust particles. *Inhalation Toxicology*, 19(SUPPL. 1), 241–244. <https://doi.org/10.1080/08958370701498075>

ANEXOS