UNIVERSIDAD TÉCNICA FEDERICO SANTA MARÍA

DEPARTAMENTO DE INGENIERÍA MECÁNICA

SANTIAGO – CHILE

“Propuesta de mejora en la confiabilidad del purificado y filtrado de diésel en remolcadores marítimos mediante integración tecnológica y mantenimiento”

Victor Frederico Contreras

MEMORIA DE TITULACIÓN PARA OPTAR AL TÍTULO DE:
INGENIERO CIVIL MECÁNICO

PROFESOR GUÍA: Ph.D. Mauricio Osses
PROFESORA CORREFERENTE: Ing. Nelson Alvarez Campillay

MES SEPTIEMBRE – 2026

CONSTANCIA DE VALIDACIÓN Y CONFIDENCIALIDAD DE MONOGRAFÍA A REPOSITORIO ACADÉMICO

1.- IDENTIFICACIÓN DEL TRABAJO ACADÉMICO

Tipo de monografía (marcar una opción): ☒ Memoria o trabajo de título ☐ Tesis de Postgrado

Título del trabajo: PROPUESTA DE MEJORA EN LA CONFIABILIDAD DEL PURIFICADO Y FILTRADO DE DIÉSEL EN REMOLCADORES MARÍTIMOS MEDIANTE INTEGRACIÓN TECNOLÓGICA Y MANTENIMIENTO

Nombre del candidato(a): Victor Frederico Contreras

Carrera / Grado: Ingeniería Civil Mecánica

Campus: San Joaquin **Departamento:** Departamento de Ingeniería Mecánica (DMAIC)

2.- VALIDACIÓN DEL PROFESOR GUÍA/DIRECTOR DE TESIS

Yo, Mauricio Osses Alvarado, en mi calidad de profesor(a) guía/director(a) del trabajo académico mencionado anteriormente

DEJO CONSTANCIA que:

- He revisado esta versión del documento y corresponde a la versión final aprobada del trabajo.
- El trabajo cumple con los requisitos académicos y de formato establecidos por la institución.

3.- EVALUACIÓN DE CONFIDENCIALIDAD POR PROPIEDAD INDUSTRIAL (marcar una opción)

☒ El trabajo **NO contiene** información que amerite confidencialidad y puede ser publicado de inmediato en repositorio con acceso abierto.

☐ El trabajo **CONTIENE** información con potenciales implicancias de propiedad industrial o intelectual y requiere un periodo de confidencialidad (**embargo**) por **(marcar una opción)**:

☐ 6 meses ☐ 12 meses ☐ 2 años ☐ 3 años ☐ 5 años ☐ 10 años

Fundamentación de la necesidad de confidencialidad (obligatorio si se solicita embargo):

4.- FIRMAS

Profesor(a) guía o director(a) de memoria o tesis:

Fecha: 26/10/2026 **Firma:** _____

Estudiante o Candidato(a):

Fecha: 28/10/2026 **Firma:** _____

Este formulario debe ser insertado como página 2 de la memoria o tesis, completado y firmado por estudiante y profesor(a) antes de la entrega en portal PRISMA de Biblioteca USM.

AGRADECIMIENTOS

Me gustaría empezar agradeciendo a mi madre por su apoyo enorme durante mi formación y estoy eternamente agradecido. Me gustaría agradecer a mi padre y su pareja Carol, los cuales si bien viven en Brasil siempre me acompañaron y mantuvieron su contacto. A mi pareja que me ha animado, incentivado a mejorar y estado para mí en los mejores y peores momentos. También agradezco a los amigos con los que he vivido esta etapa, especialmente a Paula N; Benjamín P; Tomás M; Felipe S; Baltazar L; Marcos P; y Vale F. que saben el largo viaje que es la carrera. Y a mis amigos que no son de la carrera de mecánica que también me han apoyado en todo, a la Constanza F; Giovanny C; Mateo M; Benjamín M; Ignacio T. y el Octavio J. Además de a los chicos del Fablab que me acompañaron durante muchísimos años.

Por otro lado, estoy eternamente agradecido a mis profesores guías, Mauricio Osses y Nelson Alvarez que me ayudaron a hacer esto posible. Y la empresa SAAM S.A la cual me brindo esta oportunidad de realizar la memoria con ellos, en especial a mis jefes Marcelo Verdugo y Mauricio Pereyra de los cuales aprendí muchísimo y me brindaron una experiencia de verdad inolvidable.

RESUMEN

La presente memoria desarrolla la mejora de la confiabilidad del sistema de purificado y filtrado de combustible diésel en la flota de SAAM Towage, compuesta por 203 remolcadores que operan en 12 países de América. El trabajo se origina en seis eventos catastróficos documentados durante el período 2024–2025 en motores principales y auxiliares, atribuibles al ingreso de combustible contaminado con agua, sedimentos sólidos y contaminación microbiana, con desperdicios asociados cuantificados en 2.102.000 USD anuales.

El trabajo aplica la metodología DMAIC de Six Sigma, recorriendo sus cinco fases sobre un problema con un enfoque mixto, técnico y de gestión. Las fases Definir y Medir formalizaron el problema y construyeron la línea base cuantitativa, la fase Analizar validó cinco causas raíz mediante la convergencia de herramientas independientes, la fase Mejorar diseñó e implementó las intervenciones sobre una unidad piloto, y la fase Controlar consolidó los resultados en un estándar de control permanente.

El diagnóstico reveló que la flota operaba sin una referencia técnica común, con hasta 41 configuraciones distintas de tareas de mantenimiento para un mismo modelo de purificador y sin verificación de configuración en ninguna unidad. En respuesta, se construyeron estándares de operación, configuración y mantenimiento para los cuatro modelos de purificador dominantes, se definió el estándar de filtro primario por modelo de motor y se implementó el piloto sobre el remolcador Tarqui, incorporando un prefiltro hidrociclónico y un protocolo de muestreo que caracteriza el aporte de cada etapa del tratamiento. El trabajo concluye con un nuevo estándar de control compuesto por cartas de control, muestreo periódico y un árbol de decisiones para la extensión de la solución a la flota, transformando una operación sin trazabilidad en un sistema medible, controlable y sostenible en el tiempo.

Palabras clave: purificado y filtrado de diésel, DMAIC, confiabilidad, remolcadores, mantenimiento.

ABSTRACT

This thesis develops the reliability improvement of the diesel fuel purification and filtration system across the SAAM Towage fleet, composed of 203 tugboats operating in 12 countries throughout the Americas. The work originates from six catastrophic events documented during the 2024–2025 period in main and auxiliary engines, attributable to the ingress of fuel contaminated with water, solid sediments and microbial contamination, with associated losses quantified at 2,102,000 USD per year.

The work applies the Six Sigma DMAIC methodology, covering its five phases over a problem with a mixed technical and management scope. The Define and Measure phases formalized the problem and built the quantitative baseline; the Analyze phase validated five root causes through the convergence of independent tools; the Improve phase designed and implemented the interventions on a pilot unit; and the Control phase consolidated the results into a permanent control standard.

The diagnosis revealed that the fleet operated without a common technical reference, with up to 41 different maintenance task configurations for the same purifier model and no unit having verified its configuration. In response, operation, configuration and maintenance standards were built for the four dominant purifier models, the required primary filter standard was defined per engine model, and the pilot was implemented on the tugboat Tarqui, incorporating a hydrocyclonic prefilter and a sampling protocol that characterizes the contribution of each treatment stage. The work concludes with a new control standard composed of control charts, periodic sampling and a decision tree for extending the solution across the fleet, transforming an operation without traceability into a measurable, controllable and sustainable system over time.

Keywords: diesel purification and filtration, DMAIC, reliability, tugboats, maintenance.

GLOSARIO

AMFE: Análisis de Modos de Falla y Efectos, herramienta de identificación y priorización de fallas potenciales según su severidad, ocurrencia y detección.

Anillo regulador: Componente del purificador centrífugo que fija la posición de la interfase agua-combustible; su diámetro se selecciona según la densidad del fluido. Denominado disco de gravedad en los equipos Alfa Laval.

ASTM: American Society for Testing and Materials, organismo de normalización de ensayos y materiales.

Bunker: Combustible marino residual de alta viscosidad y densidad, cuyas fracciones pesadas constituyen un contaminante del diésel destilado.

Carta de control: Gráfico estadístico que monitorea una variable en el tiempo contra límites definidos, permitiendo distinguir la variación natural del proceso de las señales de deterioro.

Common rail: Tecnología de inyección diésel de riel común presurizado, con tolerancias internas del orden de micrones y alta sensibilidad a la contaminación del combustible.

DMAIC: Ciclo de mejora de la metodología Six Sigma compuesto por las fases Definir, Medir, Analizar, Mejorar y Controlar.

FAME: Fatty Acid Methyl Ester, éster metílico de ácido graso, componente base del biodiésel.

Filtro primario: Primera etapa de filtración mecánica de la línea, ubicada antes de la bomba de alimentación del motor, adicionalmente puede poseer la función de separación de agua.

Filtro secundario: Etapa final de filtración antes del sistema de inyección, de menor micraje, instalada en el motor según especificación del fabricante.

Gráfico I-MR: Carta de control de valores individuales y rangos móviles, aplicada a variables de medición única por período.

Gráfico P: Carta de control por atributos que monitorea la proporción de unidades que cumplen una condición.

ISO 4406: Norma que codifica la limpieza de un fluido mediante el conteo de partículas mayores a 4, 6 y 14 µm por mililitro, expresado como código de tres valores.

ISO 8217: Norma internacional que especifica los requisitos de calidad de los combustibles marinos en el punto de entrega.

MDF/MGO: Marine Diesel Fuel / Marine Gas Oil, combustibles marinos destilados.

MEUI: Mechanically actuated Electronic Unit Injector, inyector unitario de accionamiento mecánico y control electrónico.

OEM: Original Equipment Manufacturer, fabricante original del equipo.

Overhaul: Reacondicionamiento mayor de un motor, con reemplazo de componentes principales como camisas, pistones, sellos y válvulas.

Plataforma de gestión del mantenimiento: Sistema corporativo donde se cargan los planes, tareas y órdenes de trabajo de mantenimiento de la flota.

ppm: Partes por millón, unidad de concentración; para el agua en diésel, 1% corresponde a 10.000 ppm.

Prefiltro hidrociclónico: Equipo estático de separación de agua y sólidos por efecto ciclónico, sin partes móviles, instalado como etapa previa al filtro primario.

Purificador centrífugo: Equipo de separación de agua y sólidos del combustible mediante campo centrífugo generado por un bol giratorio con paquete de discos.

Razón Beta (β): Indicador de eficiencia de un filtro, definido como el cociente entre las partículas de un tamaño dado antes y después del elemento filtrante.

SIPOC: Herramienta de mapeo de proceso que identifica Proveedores, Entradas, Proceso, Salidas y Clientes (Suppliers, Inputs, Process, Outputs, Customers).

Six Sigma: Metodología de mejora de procesos orientada a la reducción de variabilidad y defectos mediante análisis estadístico.

SMART: Criterio de formulación de metas: Específica, Medible, Alcanzable, Relevante y Temporal.

VOC: Voz del Cliente (Voice of Customer), herramienta de captura de los requerimientos críticos de los interesados.

ÍNDICE

AGRADECIMIENTOS iii

RESUMEN iv

ABSTRACT v

GLOSARIO vi

ÍNDICE ix

ÍNDICE DE TABLAS xv

ÍNDICE DE FIGURAS xix

INTRODUCCIÓN xxi

ALCANCE xxvi

OBJETIVOS xxix

Objetivo general xxix

Objetivos específicos xxix

1. ESTADO DEL ARTE 30

1.1 Motores diésel marinos utilizados en remolcadores marítimos 31

1.1.1 Principales fabricantes presentes de motores para remolcadores marítimos 31

1.1.2 Tecnologías de inyección: evolución y principios 33

1.1.3 El sistema common rail 34

1.1.4 Implicancias para el tratamiento del combustible 36

1.2 Propiedades del combustible diésel marino 38

1.2.1 Marco normativo de referencia: ISO 8217 y especificaciones OEM 38

1.2.2 Propiedades de combustión 41

1.2.3 Propiedades de manejo y flujo 43

1.2.4 Propiedades lubricantes 45
1.2.5 Propiedades de estabilidad y envejecimiento 46
1.3 Contaminantes del combustible y mecanismos de daño 48
1.3.1 Clasificación general de los contaminantes 48
1.3.2 Contaminación por agua 49
1.3.3 Sedimentos sólidos y fracciones pesadas tipo bunker 51
1.3.4 Contaminación microbiana 53
1.3.5 Efecto combinado y sinergia entre contaminantes 55
1.4 Purificación centrífuga 57
1.4.1 Rol del purificador centrífugo en el sistema de purificado y filtrado ... 57
1.4.2 Principio físico: ley de Stokes y campo centrífugo 58
1.4.3 Arquitectura del equipo: bol, paquete de discos e interfase 60
1.4.4 Modos de operación: purificador y clarificador 63
1.4.5 Factores que afectan la eficiencia de separación 64
1.4.6 Prácticas operacionales recomendadas 67
1.5 Filtración mecánica 68
1.5.1 Rol de la filtración mecánica en el sistema 68
1.5.2 Principios físicos: filtración de superficie y de profundidad 68
1.5.3 Caracterización del rendimiento: ISO 4406, razón Beta y rating absoluto 70
1.5.4 Configuraciones típicas a bordo: filtración primaria, secundaria y separación coalescente 71
1.5.5 Factores que afectan el rendimiento operacional 72
1.5.6 Prácticas operacionales y mantenimiento 74
1.6 Gestión de mantenimiento 76

1.6.1 Tipos de mantenimiento y aplicación al sistema de combustible 76
1.6.2 Indicadores de gestión y vínculo con la disponibilidad de flota 77
1.6.3 Mantenimiento basado en condición aplicado al sistema de tratamiento del combustible 78
1.6.4 Gestión de tanques de almacenamiento y servicio 79
1.6.5 Trazabilidad, documentación y aprendizaje a nivel de flota 81
1.7 Metodología DMAIC y mejora continua 82
1.7.1 Origen y fundamentos del enfoque Six Sigma 83
1.7.2 Las cinco fases de DMAIC 84
1.7.3 DMAIC aplicado a la gestión de mantenimiento y activos 86
1.7.4 Marcos comparables de mejora continua 86
1.7.5 Justificación metodológica del uso de DMAIC en el presente trabajo . 88
1.8 Marco regulatorio aplicable 90
1.8.1 Estructura jerárquica del marco regulatorio aplicable 90
1.8.2 Regulación internacional: IMO y MARPOL Annex VI 91
1.8.3 Sociedades clasificadoras y procedimientos de aprobación de modificaciones 92
1.8.4 Regulaciones nacionales y heterogeneidad entre mercados 93
2. METODOLOGÍA 96
2.1 Fase Definir 96
2.1.1 Definición del problema (5W-2H) 96
2.1.2 Project Charter 97
2.1.3 Mapa del proceso: diagrama SIPOC y cadena de tratamiento 98
2.1.4 Voz del cliente (VOC) y requerimientos críticos 99
2.1.5 Análisis de interesados 100

2.2 Fase Medir 101
2.2.1 Identificación y cuantificación de desperdicios 101
2.2.2 Matriz de impacto y esfuerzo 102
2.2.3 Árbol de métricas 104
2.2.4 Plan de medición 105
2.2.5 Formulación de metas (SMART) 106
2.3 Fase Analizar 107
2.3.1 Diagrama de Ishikawa 107
2.3.2 Análisis de los cinco porqués 109
2.3.3 Matriz de causa y efecto 110
2.3.4 Análisis de modos de falla y efectos (AMFE) 110
2.3.5 Listado de causas raíz validadas 111
2.4 Fase Mejorar 113
2.4.1 Definición de las acciones de mejora 113
2.4.2 Evaluación y selección de alternativas: matriz de decisión 113
2.4.3 Plan de implementación del piloto 114
2.5 Fase Controlar 115
2.5.1 Plan de control 115
2.5.2 Estandarización: procedimientos y estándares operacionales 116
2.5.3 Plan de réplica a la flota 116
2.5.4 Cierre y reconocimiento 117
3. MONTAJE EXPERIMENTAL Y RESULTADOS 119
3.1 Diagnóstico del estado actual de los sistemas de purificación y filtrado de diésel 120

3.1.1 Levantamiento de información – Purificadores diésel 121
3.1.2 Levantamiento de información – Filtros diésel 122
3.2 Operación, mantenimiento y configuración de equipos 127
3.2.1 Planes de mantenimiento encontrados en la empresa 128
3.2.2 Planes de mantenimiento actualizados para purificadores 128
3.2.3 Estandarización de operación para el purificador 130
3.2.4 Estandarización de la configuración del purificador 130
3.2.5 Selección de filtros primarios 132
3.3 Implementación del piloto 133
3.3.1 Selección y caracterización del remolcador para implementar sistemas de mejora 133
3.3.2 Definición de los puntos de muestreo en el sistema 135
3.3.3 Intervenciones al equipo purificador del remolcador piloto 138
3.3.4 Corrección del filtro primario de los motores principales 139
3.3.5 Instalación del equipo de prefiltro con su programa de mantenimiento 140
3.4 Nuevo estándar de control para el sistema de purificado y filtrado diésel . 141
3.4.1 Predicción de impacto operacional 141
3.4.2 Cartas de control para contaminantes y filtros 144
3.4.3 Nuevo estándar de muestreo periódico y verificación de equipos 145
3.4.4 Criterio de evaluación para la instalación del prefiltro en la flota 147
4. DISCUSIÓN 151
4.1 Diagnóstico original de los equipos, hallazgos y estandarización de operación, configuración y mantenimiento. 152
4.1.1 Hallazgos originales. 152

4.1.2 Modificaciones realizadas en los purificadores e impacto..... 154
4.2 Discusión de la implementación y su sistema de validación..... 157
4.2.1 Validación de los resultados y causas raíz 157
4.2.2 Representatividad del muestreo y diagnóstico de la cadena de tratamiento 159
4.2.3 Implicancias operacionales para la flota 160
4.3 Seguimiento en el tiempo 163
CONCLUSIÓN Y RECOMENDACIONES 166
Conclusiones generales 166
Conclusiones específicas 167
Recomendaciones 170
BIBLIOGRAFIA 171
ANEXOS 174

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1: Especificaciones técnicas velocidades angulares en purificadores. 61
Tabla 2: Cambios esperados en base a las métricas establecido en la fase controlar de la metodología DMAIC. Autor: Victor Frederico. Elaborado con información levantada de la empresa afiliada a la memoria. 142
Tabla 3: Definición del problema - 5W2H. Fuente: Victor Frederico, creado con información levantada de la empresa afiliada a la memoria, Planilla DMAIC facilitada por profesor Nelson Álvarez Campillay. 174
Tabla 4: Project Charter del trabajo de título. Fuente: Victor Frederico, creado con información levantada de la empresa afiliada a la memoria, Planilla DMAIC facilitada por profesor Nelson Álvarez Campillay. 175
Tabla 5: SIPOC del proyecto. Fuente: Victor Frederico, creado con información levantada de la empresa afiliada a la memoria, Planilla DMAIC facilitada por profesor Nelson Álvarez Campillay. 177
Tabla 6: Voz del cliente. Fuente: Victor Frederico, creado con información levantada de la empresa afiliada a la memoria, Planilla DMAIC facilitada por profesor Nelson Álvarez Campillay. 179
Tabla 7: Análisis de interesados del proyecto. Fuente: Victor Frederico, creado con información levantada de la empresa afiliada a la memoria, Planilla DMAIC facilitada por profesor Nelson Álvarez Campillay. 180
Tabla 8: Listado de desperdicios del proyecto. Fuente: Victor Frederico, creado con información levantada de la empresa afiliada a la memoria, Planilla DMAIC facilitada por profesor Nelson Álvarez Campillay. 181
Tabla 9: Tabla de Impacto – Esfuerzo Fuente: Victor Frederico, creado con información levantada de la empresa afiliada a la memoria, Planilla DMAIC facilitada por profesor Nelson Álvarez Campillay. 183
Tabla 10: Plan de medición del proyecto. Fuente: Victor Frederico, creado con información levantada de la empresa afiliada a la memoria, Planilla DMAIC facilitada por profesor Nelson Álvarez Campillay. 185

Tabla 11: Formulación de metas SMART. Fuente: Victor Frederico, creado con información levantada de la empresa afiliada a la memoria, Planilla DMAIC facilitada por profesor Nelson Álvarez Campillay. 188
Tabla 12: Los 5 Porqué del proyecto. Fuente: Victor Frederico, creado con información levantada de la empresa afiliada a la memoria, Planilla DMAIC facilitada por profesor Nelson Álvarez Campillay. 189
Tabla 13: Matriz de causa y efecto para el proyecto. Fuente: Victor Frederico, creado con información levantada de la empresa afiliada a la memoria, Planilla DMAIC facilitada por profesor Nelson Álvarez Campillay..... 190
Tabla 14: Análisis AMFE del proyecto. Fuente: Victor Frederico, creado con información levantada de la empresa afiliada a la memoria, Planilla DMAIC facilitada por profesor Nelson Álvarez Campillay. 191
Tabla 15: Causas raíz validadas del proyecto. Fuente: Victor Frederico, creado con información levantada de la empresa afiliada a la memoria, Planilla DMAIC facilitada por profesor Nelson Álvarez Campillay. 193
Tabla 16: Acciones de Mejora del Proyecto. Fuente: Victor Frederico, creado con información levantada de la empresa afiliada a la memoria, Planilla DMAIC facilitada por profesor Nelson Álvarez Campillay. 195
Tabla 17: Matriz de decisión del proyecto. Fuente: Victor Frederico, creado con información levantada de la empresa afiliada a la memoria, Planilla DMAIC facilitada por profesor Nelson Álvarez Campillay. 196
Tabla 18: Plan de implementación del proyecto. Fuente: Victor Frederico, creado con información levantada de la empresa afiliada a la memoria, Planilla DMAIC facilitada por profesor Nelson Álvarez Campillay. 197
Tabla 19: Plan de control del proyecto. Fuente: Victor Frederico, creado con información levantada de la empresa afiliada a la memoria, Planilla DMAIC facilitada por profesor Nelson Álvarez Campillay. 199
Tabla 20: Nuevo plan de mantenimiento para purificadores diésel marca Alfa Laval. Fuente: Victor Frederico, creado con información levantada de empresa de purificadores ALFA LAVAL..... 201

Tabla 21: Nuevo plan de mantenimiento para purificadores diésel GEA Westfalia. Fuente: Victor Frederico, creado con información levantada de la empresa de purificadores GEA Westfalia. 203
Tabla 22: Periodos de mantenimiento para purificadores diésel marca Alfa Laval. Fuente: Victor Frederico, creado con información levantada de la empresa de purificadores ALFA LAVAL. 206
Tabla 23: Periodos de mantenimiento para purificadores diésel marca GEA Westfalia. Fuente: Victor Frederico, creado con información levantada de la empresa de purificadores GEA Westfalia. 207
Tabla 24: Tablas de selección de diámetro interno para equipos Alfa Laval y GEA Westfalia. Fuente: Victor Frederico, creado con información levantada de las empresas de purificadores ALFA LAVAL y GEA Westfalia. 208
Tabla 25: Tabla de selección de disco de gravedad para modelo Alfa Laval MAB 103B-24. Extraído de Alfa Laval. Extraído de ALFA LAVAL 208
Tabla 26: Tabla de filtros compatibles con serie racor 2020 encontrados en la flota. Fuente: Victor Frederico, creado con información levantada de la empresa afiliada a la memoria. 209
Tabla 27: Tabla de filtros compatibles para motores en la flota. Fuente: Victor Frederico, creado con información levantada de la empresa afiliada a la memoria. 210
Tabla 28: Tabla de especificaciones del remolcador piloto seleccionado. Fuente: Victor Frederico, creado con información levantada de la empresa afiliada a la memoria. 211
Tabla 29: Especificaciones diésel requeridas por Caterpillar, MTU y Wärtsilä. Datos obtenidos de Caterpillar, MTU y Wärtsilä. 212
Tabla 30: Plan de mantenimiento antiguo del purificador presente en el Piloto. Fuente: Victor Frederico, creado con información levantada de la empresa afiliada a la memoria. 213
Tabla 31: Nuevo plan de mantenimiento para remolcador piloto. Fuente: Victor Frederico, creado con información levantada de la empresa de purificadores GEA Westfalia. 215

Tabla 32: Requisitos de limpieza para el tanque de servicio en remolcadores marítimos. Elaborado con información extraída de MTU, Caterpillar y Wärtsilä. 217
Tabla 33: Plan de Mantenimiento para el equipo prefiltro AK1000P. Elaborado con información extraída la empresa Gigonsa AK. 218
Tabla 34: Procedimiento de toma de muestra para muestreo periódico. Autor: Victor Frederico. Elaborado con información extraído de empresa afiliada a memoria. 219

ÍNDICE DE FIGURAS

Ilustración 1: Sistema de inyección diésel convencional con bomba lineal y líneas individuales hacia cada inyector. Extraído de página web de Bosch. 34
Ilustración 2: Sistema common rail con bomba de alta presión, líneas de alta presión, rail acumulador, inyectores electrónicos y unidad de control del motor (ECU). Extraído de documentación oficial de MTU. 36
Ilustración 3: Posición correcta en la interfase-Aceite distribuido a todos los canales del conjunto de discos. Fuente: Chevron [13]. 62
Ilustración 4: Tablas de eficiencia de separación en relación con: Tamaño de partícula, diferencia de densidad, viscosidad y caudal. Fuente: WinGD [11]. 66
Ilustración 5: Grafico de Impacto esfuerzo. Fuente: Victor Frederico, creado con información levantada de la empresa afiliada a la memoria, Planilla DMAIC facilitada por profesor Nelson Álvarez Campillay. 103
Ilustración 6: Árbol de métricas para el proyecto. Fuente: Victor Frederico, creado con información levantada de la empresa afiliada a la memoria, Planilla DMAIC facilitada por profesor Nelson Álvarez Campillay. 105
Ilustración 7: Diagrama de causa y efecto – ISHIKAWA. Fuente: Victor Frederico, creado con información levantada de la empresa afiliada a la memoria, Planilla DMAIC facilitada por profesor Nelson Álvarez Campillay. 108
Ilustración 8: Grafico de categoría de priorización por periodo de cambio de filtro primario en motor principal. Fuente: Victor Frederico, creado con información levantada de la empresa afiliada a la memoria. 124
Ilustración 9: Grafico de categoría de priorización por periodo de cambio de filtro secundario en motor principal. Fuente: Victor Frederico, creado con información levantada de la empresa afiliada a la memoria. 125
Ilustración 10: Grafico de categoría de priorización por periodo de cambio de filtro primario en generador. Fuente: Victor Frederico, creado con información levantada de la empresa afiliada a la memoria. 126

Ilustración 11: Grafico de categoría de priorización por periodo de cambio de filtro secundario en generador. Fuente: Victor Frederico, creado con información levantada de la empresa afiliada a la memoria. 126
Ilustración 12: Instrucciones de correcta instalación de discos separadores en equipos GEA Westfalia OTC 2-02-137. Extraído de GEA Westfalia. 131
Ilustración 13: Esquema de puntos de muestreo en línea de purificado y filtrado diésel. Autor: Victor Frederico. 137
Ilustración 14: Árbol de decisiones para la instalación de una mejora en la línea de purificado y filtrado diésel de un remolcador. Autor: Victor Frederico. Versión ampliada adjunta en anexo. 149
Ilustración 15: Ilustración ampliada del árbol de decisiones para la instalación de una mejora en la línea de purificado y filtrado diésel de un remolcador. Autor: Victor Frederico 220

INTRODUCCIÓN

SAAM Towage es la división de servicios de remolcaje marítimo del grupo SAAM S.A. Durante 2025 fue el principal prestador de servicios de remolque en el continente americano, el tercer operador global del rubro y al día de hoy se ubica como la empresa con mayor expectativa de crecimiento del portafolio del Grupo Quiñenco. Su flota está compuesta por 203 remolcadores que operan en 12 países: Brasil, México, Canadá, Chile, Colombia, Uruguay, Panamá, Perú, Ecuador, Costa Rica, El Salvador y Guatemala, con servicios que abarcan el remolque portuario y de tránsito, la escolta especializada de buques petroleros y gaseros, el atraque y desatraque, y las operaciones especiales y de salvamento. Durante el año 2025 se ejecutaron más de 155.000 faenas, se recorrieron sobre 886.000 millas náuticas y se mantuvo una disponibilidad de flota del 98,2%, indicador que constituye una de las ventajas competitivas declaradas de la Compañía y un objetivo estratégico sostenido en el tiempo [1].

La flota se distribuye de la siguiente manera: Brasil concentra la mayor operación con 67 remolcadores en 18 puertos, seguido de Canadá con 26 unidades en 8 puertos y México con 24 unidades en 7 puertos [1]. Esta diversidad geográfica implica una alta diversidad de condiciones operacionales, condición particularmente relevante para este estudio, donde la calidad y predictibilidad del diésel disponible en cada mercado difiere. A ello se suma una condición estructural de la operación: muchos remolcadores rotan de país a lo largo de su vida útil, de modo que una unidad originalmente especificada para operar en Canadá, con combustible de alta calidad y predictibilidad, puede terminar operando en un mercado cuyo combustible impone exigencias de filtrado muy superiores a las contempladas en su configuración original. En cuanto al tren motriz de la flota, un 76% de los remolcadores poseen un motor considerado estándar para la empresa, categoría que abarca las marcas Caterpillar y MTU, mientras que el 24% restante se distribuye entre Cummins, MaK, General Electric, Niigata y Yanmar, entre otros. Cada uno de estos fabricantes establece requisitos exigentes respecto de la calidad del combustible que alimenta sus sistemas de inyección, particularmente en las configuraciones equipadas con tecnología common rail, cuyas

tolerancias mecánicas del orden de micrones son altamente sensibles a la presencia de agua, partículas y contaminación microbiana.

La calidad del diésel disponible en los mercados donde opera SAAM Towage no es una variable controlable por la Compañía, y su predictibilidad es significativamente menor en la mayoría de los países de operación. A los factores como la calidad de las refinerías locales, prácticas de almacenamiento y distribución en los puertos, se suman eventos extremos capaces de degradar severamente la calidad del combustible de un mercado en plazos muy cortos. El caso más documentado en la experiencia reciente corresponde a Ecuador en 2024, cuando el país enfrentó la peor crisis hídrica en más de 60 años, con tres represas hidroeléctricas fuera de operación y racionamientos eléctricos de hasta 14 horas diarias [2] [3]. La respuesta inmediata del sector productivo disparó la demanda de generadores diésel y de combustible a nivel nacional [4], forzando a la red logística a reducir el tiempo de sedimentación del combustible de aproximadamente 72 horas a 24 horas para sostener el abastecimiento. El diésel despachado en los puertos llegó así sin completar la decantación por gravedad que normalmente separa el agua y los sedimentos de mayor densidad, y fue cargado en los remolcadores de la flota local con niveles de contaminantes significativamente superiores a los esperados. Las consecuencias se materializaron en una serie de eventos catastróficos recurrentes en motores principales y auxiliares, directamente atribuibles a la calidad del combustible embarcado.

Entre enero de 2024 y fines de 2025 se documentaron seis eventos mayores en la flota: los remolcadores Mississippi, San Lorenzo, Tarqui y Tigre, operando en Ecuador durante 2024, y los remolcadores Godofredo y Renaud, operando en Brasil durante 2025. En todos los casos los daños afectaron tanto al motor principal como al motor auxiliar generador, lo que descarta una causa localizada en un componente específico y confirma que el problema proviene de la alimentación de los motores. El análisis técnico de los eventos identificó la presencia simultánea de tres tipos de contaminantes en el combustible recibido, agua, sedimentos sólidos con fracciones pesadas tipo bunker y contaminación microbiana, configurando un efecto combinado que amplifica

el daño individual de cada agente [5]. El caso del Tarqui, el más severo y mejor documentado del período, presentó desgaste acelerado, corrosión y cavitación en las bombas inyectoras unitarias, con pérdida de estanqueidad y daños visibles en los cuerpos de los inyectores [5]. Los eventos de Brasil, por su parte, presentaron un patrón de contaminantes similar, lo que confirma que la flota está expuesta a múltiples vectores de contaminación con orígenes distintos según el mercado.

El impacto económico de estos eventos justifica por sí solo una intervención estructural. El costo directo de reparar uno de los motores afectados en Ecuador se estimó en aproximadamente 210.000 USD, considerando un overhaul completo con reemplazo de camisas, pistones, sellos, válvulas y retenes. Los remolcadores afectados en Brasil totalizaron más de 100 días fuera de servicio imputables a fallas por combustible contaminado que, valorizados a una tarifa promedio de impacto por indisponibilidad cercana a los 6.000 USD diarios, que incluye tanto los ingresos contractuales como el costo de subcontratar remolcadores de la competencia, elevan el impacto potencial asociado a estos eventos a cerca de un millón de dólares al año. El efecto se extiende además sobre la planificación del mantenimiento: los tres casos más severos de Ecuador excedieron significativamente su presupuesto preventivo durante 2024, con el Tarqui registrando una desviación del 213% sobre lo estimado, reflejo del costo sostenido de las intervenciones correctivas sobre equipos ya deteriorados. Si bien la documentación detallada corresponde a estos seis sucesos, el problema se extiende en distintas magnitudes a la mayoría de la flota, con mercados de alto estándar como Chile y Canadá en un extremo, y el área del Caribe, Brasil y Uruguay, con calidad de combustible estimada como pobre.

Sobre este diagnóstico, el presente estudio se justifica desde tres ejes complementarios. Desde el punto de vista técnico, los motores diésel marinos modernos operan con presiones de inyección superiores a los 30.000 psi, holguras internas inferiores a 5 micrones y tolerancias de filtración secundaria del orden de 4 micrones [8], condiciones necesarias para cumplir la vida útil esperada de los componentes de inyección, y de alta sensibilidad a perturbaciones [9]. A ello se suma la evolución de las propiedades

del diésel en las últimas décadas, particularmente la disminución de su densidad promedio y la aparición de contenidos crecientes de biodiésel, que ha introducido una brecha entre las especificaciones originales de los equipos instalados y el combustible que reciben hoy. Desde el punto de vista económico, el costo marginal de un sistema de limpieza correctamente dimensionado es considerablemente inferior al costo esperado de las fallas que previene, relación que los eventos documentados cuantifican con claridad. Y desde el punto de vista estratégico, los eventos no se concentraron en un único país, fabricante ni generación de remolcador, sino que afectaron transversalmente a la flota, lo que confirma que el problema es sistémico y no local, y que cualquier solución diseñada exclusivamente para la unidad o el mercado donde se detectó el problema deja expuesto al resto de la flota frente a escenarios equivalentes, a la vez, cada evento erosiona el indicador de disponibilidad sobre el cual la Compañía construye parte de su propuesta de valor.

En este contexto, un estudio técnico que levante la situación actual del sistema de purificado y filtrado de diésel a nivel de flota, cuantifique las brechas respecto de las exigencias de los motores modernos, evalúe las alternativas técnicas disponibles en el mercado y proponga un estándar operacional aplicable transversalmente se posiciona como una respuesta adecuada a la naturaleza del problema. El presente trabajo busca, en consecuencia, no resolver un evento puntual, sino elevar la confiabilidad del sistema que en adelante deberá proteger a la flota frente a eventos futuros de naturaleza equivalente o superior a los documentados en 2024 y 2025.

La presente memoria se estructura en cinco capítulos. El Capítulo 1 desarrolla el estado del arte de motores diésel marinos, su línea de purificado y filtrado, abarcando las tecnologías de inyección y sus exigencias de limpieza, las propiedades y contaminantes del combustible, los principios de la purificación centrífuga y la filtración mecánica, la gestión de mantenimiento, el marco metodológico de mejora continua y el marco regulatorio aplicable. El Capítulo 2 presenta la metodología del trabajo, estructurada sobre las cinco fases del enfoque DMAIC, describiendo las herramientas aplicadas en cada fase, desde la definición del problema y la construcción de la línea base hasta el

diseño del plan de control. El Capítulo 3 desarrolla el montaje experimental y los resultados, recorriendo los cuatro objetivos específicos del trabajo: el diagnóstico del estado actual de los sistemas en la flota, la estandarización de la operación, configuración y mantenimiento de los equipos, la implementación del piloto sobre el remolcador Tarqui y la formulación del nuevo estándar de control. El Capítulo 4 discute los hallazgos, examinando en qué medida las intervenciones responden a las causas raíz identificadas, la representatividad del muestreo, las implicancias de extender la solución a la flota y las limitaciones de los resultados. Finalmente, el último capítulo presenta las conclusiones generales y específicas del trabajo junto con las recomendaciones para su continuidad.

ALCANCE

La presente sección delimita el alcance del trabajo y explicita sus limitaciones, definiendo qué problemas aborda el estudio, bajo qué supuestos metodológicos y qué aspectos quedan fuera del análisis. Esta delimitación es particularmente relevante en el contexto de una flota de 203 remolcadores distribuidos en 12 países, donde la heterogeneidad operacional impone decisiones explícitas sobre la profundidad y amplitud del estudio.

El alcance se estructura en dos niveles. El primero es de carácter general, se desarrolla un análisis de la flota completa enfocado en la caracterización del sistema de purificado y filtrado de diésel instalado a bordo, el levantamiento de los patrones de falla asociados a contaminación del combustible y la identificación de las brechas entre las configuraciones vigentes y las exigencias técnicas de los motores modernos, lo que permite sostener conclusiones aplicables a toda la flota reconociendo las particularidades de cada país. El segundo, de carácter específico aclara que el trabajo se profundiza sobre el remolcador identificado como piloto, para los cuales se desarrolla una evaluación técnica detallada, se dimensiona la intervención sobre el sistema de tratamiento y se define el protocolo de seguimiento que permitirá validar la efectividad de la solución bajo condiciones operacionales reales sobre lo planteado en el estudio, debido a eso es requerido su validación posterior mediante los criterios definidos en el presente trabajo.

El estándar propuesto considera tanto el sistema de alimentación del motor principal se deja excluido los generadores y motores menores, esta decisión se tomó de manera interna por la empresa, con la finalidad de dar enfoque a los motores principales al ser de mayor vitalidad e impacto para la operación. El tratamiento integrado evita, además, que una solución aplicada exclusivamente al motor principal deje al motor auxiliar expuesto a los mismos riesgos que motivan la intervención. Sin embargo, se reconoce que los motores generadores también poseen los mismos mecanismos de falla que los motores principales, es debido a eso que los estándares son aplicables de igual manera,

por lo que es posible implementar la misma metodología en este tipo de equipos para lograr los mismos objetivos.

El trabajo reconoce explícitamente cinco limitaciones:

1. El estudio se concentra exclusivamente en el sistema de alimentación de combustible diésel, otros sistemas de fluidos del remolcador, como la lubricación, la refrigeración y la alimentación de aire, constituyen problemas técnicos diferenciados que requieren estudios independientes.
2. El trabajo no tiene por objeto el diseño de equipos de purificado y filtrado desde su concepción, sino la evaluación, selección y estandarización de soluciones comercialmente disponibles, en coherencia con la naturaleza aplicada del proyecto y con plazos de implementación compatibles con la operación de la flota.
3. La calidad del diésel disponible en los puertos se asume como una variable externa no controlable: el trabajo no interviene sobre los procesos de refinación, distribución o almacenamiento previos al punto de abastecimiento, sino que trata la variabilidad del combustible recibido como una condición de entorno.
4. La certificación de las soluciones propuestas ante las sociedades clasificadoras pertinentes queda fuera del alcance, pues si bien toda modificación sobre los sistemas instalados requiere dicha aprobación, el proceso formal de certificación excede el plazo y los recursos de la presente memoria.
5. La implementación extensiva sobre el conjunto de la flota no forma parte del trabajo, los pilotos ejecutados constituyen la evidencia que respalda las recomendaciones finales, pero el despliegue al resto de los 203 remolcadores corresponde a una definición posterior de la División Towage.

Desde el punto de vista de la información, el estudio se apoya en datos operacionales internos de SAAM Towage, reportes técnicos de terceros especializados, registros de eventos del período 2024–2025 y observaciones directas obtenidas durante el proceso de memoria del autor. La heterogeneidad de la flota en marca, modelo, antigüedad y configuración de los motores introduce una dispersión natural sobre los datos

disponibles, que el trabajo gestiona priorizando patrones comunes y criterios de clasificación que permitan derivar conclusiones aplicables, sin pretender cubrir exhaustivamente cada configuración particular. Una limitación particularmente relevante corresponde a la información histórica, los registros sistemáticos de fallas atribuibles a la calidad del diésel comienzan a consolidarse en la Compañía a partir de los eventos de Ecuador en 2024, que motivaron precisamente la creación del proyecto en el que se inscribe esta memoria. Eventos anteriores pueden haber sido gestionados como incidentes aislados sin trazabilidad consolidada, lo que impide un análisis de tendencia de largo plazo y condiciona el diagnóstico a una ventana temporal acotada. Las conclusiones del trabajo deben entenderse, en consecuencia, sobre la evidencia documentada en este período.

OBJETIVOS

Objetivo general

Proponer mejoras que busquen aumentar la confiabilidad del sistema de purificado y filtrado diésel hacia los motores de remolcadores marítimos, integrando estrategias de mantenimiento, operación y una nueva tecnología al sistema, con el fin de entregar un diésel que cumpla las condiciones de pureza que requiere el motor.

Objetivos específicos

1. Diagnosticar el estado actual de los sistemas de purificación y filtrado de combustible en la flota, considerando configuración, presencia de equipos, prácticas operacionales y cumplimiento de mantenimiento.
2. Elaborar estrategias de operación estandarizada, correcta configuración y planes de mantenimiento preventivo para los purificadores, basados en el contexto operacional y las exigencias de la flota.
3. Implementar un plan piloto de las mejoras propuestas en una unidad representativa, aplicando el estándar operacional, correcto mantenimiento, configuración del purificador, y una nueva tecnología en el tren de filtrado.
4. Generar el nuevo estándar de control para el sistema de purificado y filtrado diésel, mediante la validación del piloto propuesto, con la finalidad de aumentar la confiabilidad del sistema.

1. ESTADO DEL ARTE

El presente capítulo desarrolla el estado del arte sobre el purificado y filtrado de combustible diésel en motores marinos, entendido como el cuerpo de conocimiento técnico, normativo y metodológico vigente sobre el cual se sostienen el diagnóstico, el análisis de causas y las propuestas desarrolladas en los capítulos siguientes. Su propósito es establecer las bases conceptuales que permiten comprender por qué los eventos de contaminación documentados en la introducción se materializaron con la severidad observada, y qué herramientas técnicas y de gestión existen actualmente para mitigarlos.

El presente capitulo se organiza siguiendo la trayectoria física del combustible y la lógica del problema. Se parte por caracterizar los motores diésel marinos presentes en remolcadores marítimos, receptores finales del combustible y responsables de fijar las exigencias de limpieza que todo el sistema debe garantizar. A continuación, se describen las propiedades del combustible diésel marino, los contaminantes y mecanismos de daño asociados, que en conjunto definen la brecha entre la calidad recibida en puerto y la calidad requerida por el sistema de inyección. Sobre esa base se desarrollan las dos etapas del tren de tratamiento a bordo, la purificación centrífuga y la filtración mecánica, cuya acción combinada cierra dicha brecha. Posteriormente se aborda la gestión de mantenimiento como dimensión organizacional que sostiene el desempeño del sistema en el tiempo, y la metodología DMAIC como marco que articula el diagnóstico, la mejora y el control del proyecto. Finalmente, se expone el marco regulatorio aplicable, que impone las condiciones de borde sobre el alcance y la naturaleza de las propuestas. El capítulo transita así desde el componente físico hasta el contexto normativo, sosteniendo el desarrollo metodológico posterior.

1.1 Motores diésel marinos utilizados en remolcadores marítimos

Un remolcador marítimo por lo general trabaja con potencias entre 2.000 y 8.000 kW, siendo consideradas potencias altas en relación a su tamaño, esto se realiza con tal de que el remolcador brinde respuestas rápidas en maniobra, debido a eso los motores que potencian estos navíos operan casi exclusivamente con motores de alta revolución. Estos motores, que giran típicamente entre 1.200 y 1.800 rpm a potencia nominal, privilegian la relación potencia-peso, en contraste con los motores de baja revolución que equipan buques mercantes oceánicos de gran calado [16]. En un remolcador, tanto los motores principales (MP) de propulsión como los motores auxiliares (GEN) que generan electricidad a bordo corresponden a esta categoría, lo que determina las exigencias específicas sobre el combustible que alimenta ambos equipos.

1.1.1 Principales fabricantes presentes de motores para remolcadores marítimos

Dos fabricantes concentran la mayor parte de los motores críticos identificados en el levantamiento de remolcadores en Latino América: Caterpillar y Rolls-Royce Solutions (MTU). Esta concentración refleja la dinámica global del mercado de motores marinos para remolcadores, dominado por fabricantes con fuerte presencia comercial en América y redes de servicio establecidas en los puertos latinoamericanos.

Caterpillar es el fabricante con mayor representación, particularmente en su línea 3500 Series para motores principales y su línea C-Series para motores auxiliares. Los motores 3500 Series son motores de cuatro tiempos, configuración V, refrigerados por agua, con potencias entre 1.000 y 2.500 kW por unidad, una velocidad nominal de 1.200, 1.600 o 1.800 rpm según aplicación, ampliamente utilizados en remolcadores de puerto y escolta de clase media y alta [16]. Los motores C-Series y 3300 Series, por su parte, cubren el rango de generación auxiliar con potencias entre 80 y 300 kW, operando típicamente a 1.800 rpm para compatibilidad con generación eléctrica

sincrónica a 60 Hz. Caterpillar posee varios sistemas de alimentación al cilindro, como los sistemas de bomba-inyector unitario electrónico (Electronic Unit Injector, sistemas de common rail de alta presión, y sistemas más antiguos de bomba-línea-tobera (pump-line-nozzle) presentes en motores heredados. El sistema adoptado por la mayoría de los motores modernos y que poseen todos los motores Caterpillar en remolcadores actuales poseen la tecnología common rail. Hoy en día Caterpillar solo diferencia entre inyección tradicional e inyección común para sus exigencias [8].

Rolls-Royce Solutions (MTU) aparece principalmente a través de su Serie 4000, particularmente el modelo 16V 4000 en configuración marítima, aunque algunos motores de la flota poseen la configuración de 8 cilindros. Los motores MTU Serie 4000 son motores de cuatro tiempos, configuración V, refrigerados por agua, disponibles en configuraciones V8, V12, V16 y V20 con potencias de hasta 4.300 kW por unidad [17]. La Serie 4000 fue presentada por primera vez en octubre de 1996 en la feria SMM de Hamburgo, y es históricamente reconocida como el primer motor diésel de alta revolución en el mundo equipado con sistema common rail como estándar, adelantándose incluso a la adopción masiva de esta tecnología en la industria automotriz [17]. La presión de rail inicial de 1.400 bar en 1996 ha sido progresivamente elevada hasta los 2.200 bar en la cuarta generación actual, desarrollada por L'Orange una subsidiaria de Rolls-Royce Solutions especializada en sistemas de inyección, el primer motor de la Serie 4000 para aplicaciones marítimas fue entregado al astillero Heesen en 1997, habiéndose comercializado desde entonces más de 58.000 unidades a nivel global [18]. En términos de cultura técnica, MTU se distingue por mantener una de las especificaciones de combustible más exigentes en relación a la mayoría de sus competidores, lo que se traduce en requisitos de limpieza ISO más estrictos (ISO 18/17/14 en common rail) y recomendación explícita de filtración fina en etapas previas al motor [19].

Otros fabricantes presentes en remolcadores marítimos tanto en motores principales como en generadores son: Wärtsilä, Cummins, MAK, Sanmar, General Electric, ETC.

Sin embargo, estos son la minoría y no presentan la misma participación al compararse con Caterpillar y MTU que dominan este mercado en Latino América.

1.1.2 Tecnologías de inyección: evolución y principios

La historia del motor diésel puede narrarse, en gran medida, como la historia de la evolución de su sistema de inyección. Desde que Rudolf Diesel patentó el motor de autoencendido por compresión en 1892 el cual utilizaba un sistema de inyección mecanico, el problema central ha sido cómo entregar el combustible al cilindro en la cantidad, el momento, la presión y el patrón correctos. La evolución del sistema de inyección diésel puede sintetizarse en cinco arquitecturas sucesivas: inyección por aire comprimido (sistema original abandonado en los años 1920), bomba lineal con líneas individuales a cada inyector, bomba rotativa centralizada, bomba-inyector unitario (unit injector), y finalmente el sistema de riel común llamado “common rail” el cual fue desarrollado a lo largo de la década de los años 80 [21].

Las cuatro primeras arquitecturas, agrupadas bajo el término genérico de inyección convencional, comparten un principio fundamental: la generación de presión y el evento de inyección están mecánicamente acoplados al movimiento del motor. Una leva sobre el árbol de distribución acciona una bomba de émbolo que eleva la presión del combustible en sincronía con la posición del pistón en el cilindro. La consecuencia directa es que la presión de inyección depende del régimen del motor, a bajas revoluciones, la bomba produce menos presión, lo que degrada la atomización del combustible y empobrece la combustión, mientras que, a altas revoluciones, la presión alcanza su valor nominal. Esta dependencia estructural limita la capacidad del motor para operar con combustión óptima en todo el rango de carga, y explica por qué los motores diésel tradicionales presentaban humo negro en el arranque y en transitorios de aceleración [22]. En la Ilustración 1 se aprecia un sistema de inyección convencional con bomba lineal y líneas individuales, representativo de generaciones previas al common rail.

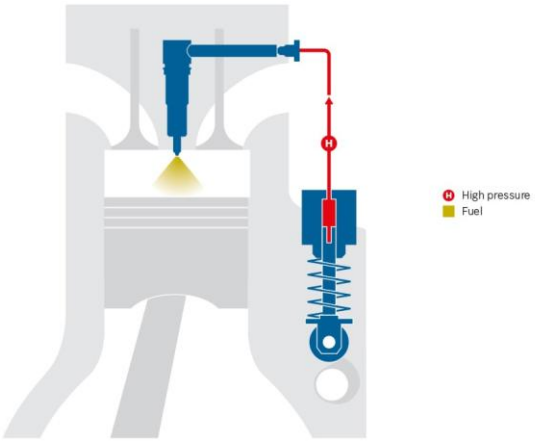


Ilustración 1: Sistema de inyección diésel convencional con bomba lineal y líneas individuales hacia cada inyector. Extraído de página web de Bosch.

El sistema common rail introduce un nuevo concepto al desacopla la generación de presión del régimen del motor. Una bomba de alta presión eleva continuamente el combustible a un nivel de presión elevado (típicamente entre 1.400 y 2.500 bar según la generación) y lo almacena en un acumulador común, conocido como el riel, este actúa como reservorio presurizado. Desde el riel, se extienden líneas individuales que alimentan a cada inyector. El evento de inyección se dispara mediante una señal eléctrica enviada por la unidad de control del motor (ECU) a una electroválvula solenoide o piezoeléctrica integrada en cada inyector, que abre y cierra el paso del combustible hacia la tobera con tiempos de respuesta del orden de fracciones de milisegundo [22].

1.1.3 El sistema common rail

El desarrollo del common rail para motores diésel pesados tuvo dos hitos fundamentales en la segunda mitad de la década de 1990. En octubre de 1996, MTU Friedrichshafen presentó en la feria SMM de Hamburgo su Serie 4000, el primer motor diésel de alta revolución en el mundo equipado con common rail como estándar, con presión de rail inicial de 1.400 bar y ahorro de consumo del 10% frente a los sistemas competidores de la época [17]. Wärtsilä inició en 1997 el desarrollo de su propio sistema common rail para motores medium-speed y low-speed, que entró en servicio

comercial en 2001 con el motor de cuatro tiempos Wärtsilä 46 y con el primer motor de dos tiempos low-speed con common rail del mundo, el Sulzer 6RT-flex58T-B, a bordo del bulk carrier Gypsum Centennial [22]. La adopción masiva en aplicaciones marítimas se consolidó durante la primera década del siglo XXI, y hoy el common rail constituye la arquitectura dominante para motores de alta revolución de nueva fabricación.

Un sistema common rail contemporáneo se compone de seis subsistemas principales trabajando coordinadamente. La bomba de baja presión o de alimentación extrae el combustible desde el tanque de servicio y lo entrega a la bomba de alta presión, generalmente filtrado previamente por filtros primarios y secundarios en serie. La bomba de alta presión, accionada mecánicamente por el motor (correa o engranaje), eleva la presión hasta el rango nominal del sistema, que en los motores marinos contemporáneos se sitúa entre 1.400 y 2.500 bar, se presenta una tendencia a aumentar la presión de la línea con tal de mejorar los niveles de emisión del motor [7]. El rail o acumulador común es una pieza forjada de acero de alta resistencia que almacena el combustible presurizado y lo distribuye a los inyectores, absorbiendo las fluctuaciones de presión generadas por los pulsos de la bomba y los eventos de inyección. Los inyectores electrónicos, uno por cilindro, reciben el combustible del rail y lo atomizan en la cámara de combustión bajo el control de la ECU. La unidad de control del motor (ECU), finalmente, es el cerebro electrónico del sistema, que integra las señales de múltiples sensores (presión del rail, régimen del motor, entre otros) y calcula en tiempo real los parámetros óptimos de cada inyección: momento, cantidad, número de pulsos y duración. El sensor de presión del rail cierra el lazo de control, permitiendo que la ECU ajuste la bomba de alta presión y las válvulas reguladoras para mantener la presión en el valor deseado [7] [23]. La Ilustración 2 muestra el esquema completo del sistema common rail con los componentes etiquetados.

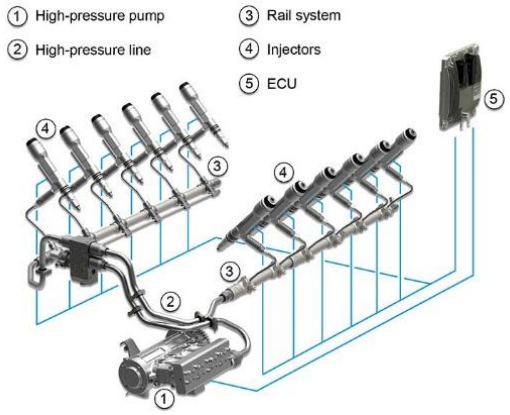


Ilustración 2: Sistema common rail con bomba de alta presión, líneas de alta presión, rail acumulador, inyectores electrónicos y unidad de control del motor (ECU). Extraído de documentación oficial de MTU.

La flexibilidad de control que habilita el common rail permite introducir, en un solo ciclo de combustión, hasta cinco o más eventos de inyección diferenciados: una o dos inyecciones piloto de pequeña cantidad previas a la inyección principal, cuyo propósito es pre-calentar la cámara y reducir el ruido característico del diésel; la inyección principal que entrega la mayor parte del combustible; y una o dos inyecciones post posteriores, utilizadas para reducir emisiones de óxidos de nitrógeno y para regenerar sistemas de postratamiento de gases de escape [24]. Esta capacidad es imposible de replicar con inyección convencional, y constituye la principal razón por la cual los motores common rail logran simultáneamente mayor eficiencia, menor emisión y menor ruido que sus predecesores mecánicos.

1.1.4 Implicancias para el tratamiento del combustible

La ventaja técnica que la tecnología common rail posee también viene con una calidad de combustible significativamente más estricta que la inyección convencional. Esta exigencia deriva de tres características físicas inherentes a la arquitectura common rail.

En primer lugar, las presiones de operación alcanzan valores que superan los 30.000 psi (2.070 bar), generando velocidades del combustible en toberas y orificios de control que amplifican cualquier efecto erosivo de partículas sólidas suspendidas [8]. En segundo lugar, las tolerancias mecánicas internas de bombas, válvulas de control e

inyectores se han reducido a menos de 5 μm para lograr la estanqueidad y el control fino de la presión que el sistema requiere, lo que implica que partículas tan pequeñas como 4 μm pueden causar rayado (scoring) y desgaste acelerado de las superficies de precisión [8]. En tercer lugar, los componentes electrónicos integrados en el sistema como los solenoides, piezoeléctricos y sensores son sensibles a la temperatura y a la contaminación iónica del combustible, factores que no afectaban a los sistemas puramente mecánicos.

La consecuencia operativa de estas tres características es que los fabricantes de motores common rail especifican requisitos de limpieza del combustible significativamente más exigentes que para sus motores convencionales. La norma de referencia es ISO 4406, que clasifica el nivel de contaminación por partículas en tres rangos de tamaño (4, 6 y 14 μm). Para motores common rail, los fabricantes especifican típicamente ISO 18/16/13 (Caterpillar) o ISO 18/17/14 (MTU), mientras que para inyección convencional MTU aceptan valores menos estrictos como ISO 21/20/17 [8] [19]. Adicionalmente, Caterpillar especifica explícitamente que sus motores common rail y sus motores de inyector unitario poseen el mismo requisito de limpieza y requieren filtración secundaria absoluta de 4 μm, y que todos sus motores diésel de producción actual salen de fábrica equipados con filtros Cat Advanced Efficiency de este grado [8].

Estos requisitos, que serán desarrollados en profundidad en las secciones siguientes del presente Estado del arte, establecen el piso técnico que cualquier sistema de purificado y filtrado diésel a bordo de un remolcador debe garantizar para que no se traduzca en fallas prematuras por contaminación del combustible. Cuando esta cadena de exigencias se rompe en un motor que, por diseño, requiere combustible de limpieza ISO 18/16/13 con filtración absoluta de 4 μm, la llegada de combustible contaminado con agua, sedimentos y formas bacterianas produce en cuestión de semanas daños en émbolos, camisas y asientos de aguja equivalentes a varios años de desgaste normal [5].

Esto indica que con las nuevas tecnologías se presenta una tendencia a aumentar las exigencias del combustible, los sistemas de inyección convencionales no poseen el mismo requerimiento que los sistemas common rail, es necesario una cadena de tratamiento abordo exigente

El levantamiento de los motores presentes en la flota permite establecer que un remolcador marítimo opera mayoritariamente con motores diésel de alta revolución equipados con tecnología common rail, provenientes principalmente de Caterpillar y MTU. Esta arquitectura, definida por presiones de inyección superiores a los 2.000 bar y holguras internas inferiores a 5 μm, impone requisitos de limpieza del combustible significativamente más estrictos que los de las generaciones mecánicas precedentes, expresados en códigos ISO 4406 del orden de 18/16/13 y filtración secundaria absoluta de 4 μm. El motor constituye, por lo tanto, el receptor que fija el requerimiento técnico que el sistema de purificado y filtrado a bordo debe garantiza. Esta exigencia define el marco de referencia contra el cual se evalúan, en las secciones siguientes, las propiedades del combustible y los contaminantes que comprometen su calidad.

1.2 Propiedades del combustible diésel marino

1.2.1 Marco normativo de referencia: ISO 8217 y especificaciones OEM

El combustible diésel marino se rige por un sistema de especificaciones técnicas organizado en tres niveles jerárquicos donde todos son de gran importancia para el estudio. El primer nivel corresponde a la norma internacional ISO 8217, publicada por primera vez en 1987 por la Organización Internacional de Normalización y revisada periódicamente para acompañar la evolución de los motores diésel, los procesos de refinación y la regulación ambiental [13]. El propósito declarado de la norma es definir los requisitos mínimos de calidad que debe cumplir un combustible destinado a motores diésel marinos previo al tratamiento a bordo, se comprende como el

combustible antes de ingresar al remolcador. La norma ISO 8217 no especifica la calidad del combustible tal como es recibido por la bomba de alta presión del motor, sino la calidad tal como es entregado al buque, y asume que las instalaciones de a bordo elevan esa calidad al nivel que efectivamente requiere el sistema de inyección.

La norma ISO 8217 organiza los combustibles marinos en dos familias principales: destilados (identificados con la letra "D" inicial) y residuales (identificados con la letra "R" inicial). Los combustibles destilados son productos obtenidos directamente de la destilación atmosférica o que incluyen fracciones destiladas de procesos secundarios de refinación, y constituye como el combustible más utilizado por los remolcadores en Latino America. Los combustibles residuales, en cambio, son fracciones pesadas remanentes del proceso de refinación y se utilizan exclusivamente en motores de mediana y baja velocidad, común mente utilizado por grandes buques mercantes, categoría fuera del alcance del presente trabajo. Dentro de la familia de destilados, la norma define dos sub-familias según su contenido de ésteres metílicos de ácidos grasos (FAME, por sus siglas en inglés), el primer grupo consiste en los grados DM (distillate marine, sin contenido especificado de FAME) y el segundo corresponde a los grados DF (distillate marine containing FAME, introducidos en la edición ISO 8217:2017 para acomodar la creciente presencia de biodiésel en los mercados de combustible) [13]. La designación completa de un grado sigue la nomenclatura estandarizada ISO, seguido de la letra F indicando que es un combustible y finalmente la combinación de letras indicando sus características [13].

Los grados destilados marinos relevantes para los remolcadores son cuatro: DMA y DMZ estos dos son conocidos comercialmente como marine gasoil o MGO, DMB y DFB los cuales son conocidos como *marine diesel oil* o *MDO*. El grado DMA corresponde al gasoil marino clásico, con viscosidad cinemática máxima de 6,0 cSt a 40°C y densidad máxima de 890 kg/m³ a 15°C [11]. El grado DMZ, introducido en la edición 2010 de la norma, mantiene las mismas propiedades que el DMA pero impone una viscosidad mínima más alta, orientada a asegurar la lubricidad del combustible en sistemas de inyección de alta presión [13]. El grado DMB acepta viscosidades más

altas, hasta 11,0 cSt a 40°C, y densidades hasta 900 kg/m³ [11].Los grados con FAME (DFA, DFZ, DFB) replican las especificaciones de sus equivalentes sin FAME pero admiten contenidos de ésteres metílicos de ácidos grasos hasta 7,0% en volumen en la edición ISO 8217:2017, límite que la edición 2024 ha flexibilizado hasta 100% en volumen bajo condiciones específicas [11] [13].

El segundo nivel de especificación corresponde a las especificaciones técnicas emitidas por cada fabricante de motor (OEM), que en general son más restrictivas que la norma ISO y que constituyen la referencia contractual para la garantía del motor. Caterpillar, en su publicación SEBU6251-32, establece requisitos específicos sobre viscosidad, densidad, azufre, agua, cenizas, sedimentos, índice de cetano y, críticamente, sobre el nivel de limpieza por partículas expresado en la escala ISO 4406, exigiendo ISO 18/16/13 para motores modernos equipados con common rail e inyector unitario [8]. MTU, por su parte, en su documento de referencia A001061/45E, exige un nivel de limpieza ISO 18/17/14 para sus motores common rail y establece límites máximos de 200 mg/kg de agua y 24 mg/kg de sólidos, valores considerablemente más estrictos que los tolerados por la norma ISO 8217 para combustibles destilados [19]. Wärtsilä al igual que los anteriores, entrega rangos aceptables para sus motores, sin embargo, no presentan la misma rigidez que Caterpillar y MTU al no solicitar un nivel de limpieza por tamaño de partícula ISO [25]. El combustible debe cumplir como mínimo la norma ISO 8217 en el punto de entrega al buque, y debe cumplir adicionalmente las especificaciones del fabricante del motor en el punto de entrada al sistema de inyección, cualquier brecha entre ambos puntos debe ser cubierta por el sistema de tratamiento a bordo.

El tercer nivel corresponde a las especificaciones nacionales y regionales aplicables en cada mercado de abastecimiento, que pueden modificar la composición efectiva del combustible disponible en puerto. Estas especificaciones nacionales se desarrollan en profundidad en próximas secciones del estado de arte.

El combustible máximo tolerable que puede llegar al remolcador el cual debe ser acotado por ISO 8217 como piso y que eventualmente puede ser excedido por regulaciones nacionales, el combustible mínimo requerido por el motor, valores establecidos por el OEM según la tecnología de inyección y la diferencia entre ambos, que es precisamente la carga operacional que debe ser absorbida por los equipos a bordo. Las subsecciones siguientes desarrollan cada una de las propiedades fisicoquímicas que definen estos límites.

1.2.2 Propiedades de combustión

Las propiedades de combustión del diésel marino definen la calidad del proceso termodinámico que ocurre en la cámara de combustión del motor, y condicionan de manera directa el rendimiento, las emisiones y la durabilidad mecánica del sistema de inyección y los componentes asociados. Tres propiedades concentran la atención técnica en esta dimensión: El número de cetano, la densidad y el poder calorífico.

El número de cetano (Cetane Number) solo es aplicable para los combustibles MDO y MGO con bajo contenido de biodiesel [13]. Es la medida fundamental de la calidad de ignición del combustible diésel, entendida como la facilidad con que el combustible entra en autoignición bajo las condiciones de compresión del cilindro. La escala se construye tomando como referencia el n-cetano puro (hexadecano, $C_{16}H_{34}$), hidrocarburo de cadena lineal con 16 átomos de carbono al que se asigna arbitrariamente un número de cetano de 100 por su muy corta demora de ignición bajo compresión [9]. Un combustible con número de cetano elevado presenta menor demora de ignición, combustión más suave, mejor capacidad de arranque en frío, menor emisión de humo blanco y operación más silenciosa. Por otro lado, un combustible con número de cetano bajo, presenta demoras de ignición extendidas, mayor posibilidad de engine knock, mayor consumo específico, pérdida de potencia y en casos extremos daño mecánico [9]. Caterpillar especifica un número de cetano mínimo de 40 para motores de inyección directa y de 35 para motores con cámara de pre-combustión, valores que constituyen el piso técnico para que el motor arranque y opere

correctamente [9]. WinGD adopta valores equivalentes en sus guías de combustible, con un mínimo de 40 para motores que operan con MGO y de 35 para motores que operan con MDO [11]. La medición directa del número de cetano requiere un motor estandarizado Cooperative Fuel Research (CFR), equipo costoso y cada vez menos disponible en la industria [13], en caso de no poseer el método de medición directa se puede estimar con la densidad del combustible y rango de destilación, ese valor es conocido como Índice de cetano [11]. El índice de cetano es una aproximación aceptada cuando no se dispone de medición directa y sus valores superiores a 40 permiten asumir con razonable confianza que el combustible cumplirá los requisitos de número de cetano del motor [13]. Es fundamental notar, sin embargo, que el índice de cetano y el número de cetano no es aplicable a combustibles que contengan FAME ni a combustibles con aditivos mejoradores de cetano [13].

La densidad, su unidad oficial es kg/m³ a 15 °C, se utiliza para calcular el combustible entregado en el buque, si bien se mide el flujo entregado a la hora de realizar el cobro se realiza en base a la masa [13]. La densidad tiene relación con las propiedades de ignición, las densidades más altas suelen asociarse a mayor contenido aromático y, por tanto, a menor número de cetano [13]. Además, como punto relevante para el trabajo la densidad determina los parámetros operacionales de los purificadores centrífugos a bordo, el proceso de separado por centrifugado se basa en la diferencia de densidades entre el combustible y los contaminantes (agua y sólidos) que se desean remover, por lo que una alta variación en la densidad del combustible procesado obliga a reajustar la configuración del purificador para mantener la eficiencia del equipo [25]. La norma ISO 8217 establece un límite máximo de densidad de 890 kg/m³ para los grados DMA, DMZ, DFA y DFZ, y de 900 kg/m³ para los grados DMB y DFB, ambos medidos a 15 °C mediante ISO 3675 o ISO 12185 [11] [13].

Finalmente, el poder calorífico inferior (Lower Heating Value, LHV) mide la energía liberada por la combustión completa de una masa o volumen unitario de combustible, la diferencia entre el poder calorífica inferior vs el superior (higher heating value, HHV) es que el inferior no cuenta el calor latente de condensación del vapor de agua

producido. Para combustibles destilados marinos convencionales, el LHV se sitúa cercano a 42,7 MJ/kg [11], valor que determina el consumo específico del motor y el rango operacional del buque. La edición ISO 8217:2024 exige reportar explícitamente el LHV cuando el combustible contenga FAME debido a que este presenta un poder calorífico inferior al del diésel fósil convencional y su presencia en la mezcla reduce proporcionalmente la densidad energética disponible haciendo necesario inyectar un mayor volumen de mezcla para alcanzar la energía necesaria [11]. Este aumento de flujo necesario indica una mayor carga operacional sobre purificadores y filtros.

1.2.3 Propiedades de manejo y flujo

Para un correcto funcionamiento de los motores el diésel debe mantener propiedades adecuadas de flujo y transferencia, las propiedades que lo gobiernan son: la viscosidad, el flujo en frío y el punto de inflamación.

La viscosidad cinemática es la propiedad más determinante para el desempeño del sistema de inyección. Cuantifica la resistencia interna del flujo para fluir, se mide en milímetros cuadrados por segundo (mm^2/s), un mm^2/s equivale a un centistokes (cSt), y responde a la norma de ensayo ISO 3104 [11]. Para combustibles destilados marinos, la temperatura de referencia es 40 °C, mientras que para combustibles residuales se usa 50 °C debido a su mayor densidad y rango operativo [13]. La norma ISO 8217 fija para los grados DMA y DFA una viscosidad máxima de 6,0 cSt y mínima de 2,0 cSt. Para los grados DMZ y DFZ una viscosidad máxima de 6,0 cSt y mínima de 3,0 cSt. Para los grados MDO (DMB, DFB) el máximo se eleva a 11,0 cSt y el mínimo de 2,0 cSt [13]. El requisito de viscosidad mínima es altamente importante, bajas viscosidades afectan la lubricación del sistema pudiendo generar raspado o hasta fallas por atascamiento de las piezas [8].

El otro extremo del rango de viscosidad es igualmente crítico. Viscosidades pueden causar alta resistencia para la bomba del motor, impactar negativamente el patrón de inyección y causar daño a los filtros [8]. En combustibles pesados este problema se gestiona mediante precalentamiento controlado antes de la bomba de alta presión. Los

destilados marinos poseen un rango de viscosidad diseñado precisamente para permitir operación sin precalentamiento en climas templados, aunque los climas más fríos pueden requerir acondicionamiento térmico para mantener la viscosidad dentro del rango de diseño del sistema de inyección [13].

Las propiedades de flujo en frío (cold flow properties) caracterizan el comportamiento del combustible a bajas temperaturas. Hay tres parámetros relevantes, el punto de enturbiamiento (cloud point), el punto de fluidez (pour point) y el punto de obstrucción de filtro en frío (Cold Filter Plugging Point) [11]. El punto de enturbiamiento corresponde a la temperatura a la cual los cristales de cera (parafinas de cadena larga) comienzan a formarse y hacen visible la pérdida de transparencia del combustible [13]. Por debajo de este punto, los cristales de cera crecen progresivamente hasta alcanzar tamaños capaces de obstruir filtros, este punto es conocido como punto de obstrucción de filtro en frío siendo la temperatura a la cual esta obstrucción efectivamente impide el flujo normalizado del combustible a través de un filtro [13]. El punto de fluidez corresponde a la temperatura más baja a la cual el combustible aún fluye bajo condiciones controladas; por debajo, el combustible se gela y pierde la capacidad de ser bombeado [26]. La norma ISO 8217 fija para MGO un pour point máximo de −6 °C en invierno y 0 °C en verano, con valores menos estrictos para MDO de 0 °C en invierno y 6 °C en verano [13]. La edición ISO 8217:2024 eliminó la distinción verano/invierno y exige reportar tanto el cloud point como el Cold Filter Plugging Point de manera sistemática, en reconocimiento de que los combustibles con mayor contenido de parafinas pesadas o de biodiésel pueden presentar problemas de flujo en frío aun cumpliendo el pour point especificado [13].

El punto de inflamación (flash point) corresponde a la temperatura mínima a la cual los vapores del combustible, en contacto con el aire forman una mezcla capaz de inflamarse ante una fuente de ignición. La norma ISO 8217 fija un mínimo absoluto de 60 °C para todo combustible diésel marino destinado a uso en buques mercantes [11]. Este límite es una exigencia de seguridad contra incendio: por arriba de 60 °C, los vapores acumulados en el espacio superior de los tanques de combustible podrían

formar atmósferas explosivas bajo condiciones operacionales normales. En la práctica, los suministros de MGO y MDO entregados comercialmente presentan puntos de inflamación sustancialmente superiores al mínimo normativo, y cualquier valor cercano al límite debe tratarse como señal de contaminación potencial con fracciones más volátiles [13].

1.2.4 Propiedades lubricantes

La función lubricante del combustible diésel, posee una relevancia operacional directa sobre la vida útil del sistema de inyección. A diferencia de los motores de encendido por chispa, donde el combustible no cumple función lubricante, en los motores diésel es de extrema importancia para las superficies móviles de las bombas de alta presión y de los inyectores. Esta función lubricante es particularmente crítica en los componentes con tolerancias internas inferiores a 5 µm característicos de los sistemas common rail modernos [8].

La medida estandarizada de la capacidad lubricante de un combustible diésel es el diámetro de huella de desgaste corregido (corrected Wear Scar Diameter, WSD) [13]. La norma ISO 8217 establece para combustibles destilados marinos un diámetro máximo de huella de desgaste de 520 µm a 60 °C [13]; WinGD adopta este mismo limite al igual que Caterpillar [11] [8]. Valores por encima de 520 µm indican que el combustible no desarrolla la película lubricante requerida aumentando el desgaste en la bomba de alta presión y los inyectores [13].

Con tal de aumentar la lubricidad del sistema una solución es la utilización de aditivos o pequeñas cantidades de biodiesel en la mezcla [9]. La consecuencia operacional para una empresa multinacional es que la lubricidad del combustible es una propiedad que puede variar significativamente entre proveedores y mercados, y que un combustible aparentemente dentro de especificación por densidad, viscosidad y azufre puede sin embargo presentar una mala lubricidad haciéndolo un parámetro de importante verificación para el sistema.

La presencia de agua degrada la lubricidad por dos mecanismos simultáneos. El primero es por desplazamiento físico del combustible lubricante desde la zona de contacto, esto expone las superficies a contacto directo y a corrosión. La segunda es degradación química de los aditivos de lubricidad por hidrólisis [8]. Estas razones explican por qué la exigencia normativa sobre contenido de agua en combustibles destinados a sistemas common rail es particularmente estricta, 0,02% vol Caterpillar y MTU [8] [19]. Siendo una de varias razones del por qué los sistemas de purificado centrífugo a bordo es de suma importancia para combatir el desgaste acelerado del sistema de inyección.

1.2.5 Propiedades de estabilidad y envejecimiento

El combustible diésel desde el momento de su producción en refinería hasta su combustión en el cilindro, el combustible experimenta procesos de degradación que modifican progresivamente sus propiedades físicoquímicas. Estos procesos se agrupan bajo el concepto de estabilidad del combustible, que la literatura técnica marítima subdivide en estabilidad oxidativa, estabilidad térmica y estabilidad al almacenamiento [13]. Para un remolcador, el cual puede mantener combustible en tanques de servicio durante semanas antes de consumirlo completamente, la estabilidad del combustible es una propiedad de relevancia operacional.

La estabilidad oxidativa caracteriza la resistencia del combustible a la formación de productos de oxidación cuando es expuesto al oxígeno atmosférico bajo condiciones controladas. La degradación de los destilados por oxidación puede causar problemas de estabilidad en el sistema, el combustible destilado inestable puede crear partículas orgánicas insolubles [13]. La presencia de FAME reduce significativamente la estabilidad oxidativa del combustible, los enlaces dobles de los ácidos grasos insaturados son sitios preferenciales de ataque por oxígeno, y los productos de oxidación del FAME con mayor propensión a formar depósitos que sus equivalentes en diésel fósil [13]. Esta diferencia explica por qué combustibles con alto contenido de

FAME requieren aditivos antioxidantes específicos y tiempos de almacenamiento significativamente menores que los destilados convencionales [12].

La estabilidad térmica caracteriza la resistencia del combustible a la degradación cuando es expuesto a altas temperaturas durante intervalos cortos, típicamente en las etapas finales del sistema de inyección donde el combustible puede alcanzar temperaturas elevadas por compresión y por recirculación desde los inyectores. La degradación térmica produce polímeros insolubles y depósitos carbonosos que se acumulan en las toberas y comprometen el patrón de atomización [13].

La estabilidad al almacenamiento integra ambos fenómenos anteriores bajo condiciones reales de tanque a bordo, donde el combustible está expuesto simultáneamente al oxígeno, a fluctuaciones térmicas diarias, al contacto con agua de condensación y con posibilidad de actividad microbiana. La buena práctica operacional es evitar tiempos de residencia prolongados en tanques de servicio, mantener rotación de inventario y, cuando sea posible, realizar análisis periódicos de sedimentos y de ácidos totales para detectar degradación avanzada antes de que comprometa el sistema de inyección [13].

La caracterización de las propiedades del combustible diésel marino permite concluir que su calidad no se reduce a un atributo aislado, sino que responde a un conjunto de propiedades de combustión, flujo, lubricidad y estabilidad que condicionan simultáneamente el rendimiento del motor y la integridad mecánica del sistema de inyección. El sistema de especificaciones de tres niveles: La norma ISO 8217 como piso de entrega al buque, las exigencias OEM como referencia contractual en la entrada al motor y las regulaciones nacionales como fuente de variabilidad, entrega una evidente brecha estructural entre la calidad del combustible recibido en puerto y la calidad efectivamente requerida por el sistema de inyección, brecha que constituye precisamente la carga operacional que los equipos de tratamiento a bordo deben absorber. Entre todas las propiedades analizadas, la densidad adquiere una relevancia particular para este trabajo, dado que gobierna directamente los parámetros

operacionales del purificador centrífugo, mientras que la incorporación creciente y variable de FAME introduce una fuente adicional de incertidumbre sobre el comportamiento del combustible.

1.3 Contaminantes del combustible y mecanismos de daño

1.3.1 Clasificación general de los contaminantes

La identificación rigurosa de los contaminantes presentes en el combustible diésel marino constituye el punto de partida para dimensionar correctamente cualquier sistema de tratamiento a bordo. La literatura técnica de referencia adopta clasificaciones ligeramente distintas según el ámbito de aplicación. La guía CIMAC publicada en 2024, orientada principalmente a combustibles residuales utilizados en motores de mediana y baja velocidad, distingue cuatro categorías principales: agua dulce o salada, sedimentos de origen orgánico e inorgánico, sólidos abrasivos como los finos cataliticos y otros materiales sospechosos no derivados del proceso de refinación. Caterpillar, en su publicación SEBU6251-32, agrupa los contaminantes desde la perspectiva del motor receptor en partículas sólidas, agua, microorganismos, asfaltenos, gomas y resinas, ácidos orgánicos y sales [8].

Para los efectos del presente trabajo, los contaminantes se agrupan en tres grandes categorías que sintetizan los mecanismos efectivamente observados. La primera corresponde a la contaminación por agua, en sus estados libre, emulsionado y disuelto, con efectos de corrosión, cavitación y degradación lubricante. La segunda comprende los sedimentos sólidos y las fracciones pesadas del tipo bunker, que reúnen tanto las partículas abrasivas como los asfaltenos y los residuos de hidrocarburos pesados eventualmente presentes en suministros fuera de especificación. La tercera corresponde a la contaminación microbiana, originada por bacterias, levaduras y hongos que colonizan la interfase agua-combustible y producen biopelículas, ácidos orgánicos y subproductos corrosivos.

1.3.2 Contaminación por agua

El agua es el contaminante más frecuente del combustible diésel marino y el de mayor relevancia operacional, tanto por su capacidad de daño directo sobre los componentes del sistema de alimentación y distribución diésel como por su rol habilitador de los demás mecanismos de contaminación. Su presencia en el combustible no es solo debido a procesos deficientes de refinería, transporte y almacenamiento. Aun en operaciones normales el agua puede ingresar al sistema por condensación en el espacio superior de los tanques debido a las fluctuaciones diarias de temperatura, por respiraderos no protegidos durante la operación en climas húmedos o infiltraciones. El caso de Ecuador 2024, descrito en la sección 1.3, ilustra una deficiente calidad debido a malas prácticas por parte de la refinería, la reducción del tiempo de sedimentación de 72 a 24 horas en la cadena logística nacional produjo un combustible distribuido en puerto con contenido de agua libre significativamente superior al esperado [5].

El agua puede coexistir con el combustible en tres estados físicos. Primero es agua libre, esta se separa por gravedad en el fondo de los tanques y constituye la fracción más sencilla de extraer mediante purga manual periódica de los puntos bajos del sistema. El agua emulsionada se mantiene dispersa en la matriz del combustible bajo forma de pequeñas gotas y requiere la acción de un purificador centrífugo para ser desplazada por diferencia de densidad. El agua disuelta, finalmente, se incorpora a la matriz del combustible a nivel molecular y solamente puede ser removida mediante procesos especializados como filtros coalescentes o tratamientos térmicos controlados. La presencia de agua disuelta es prácticamente inevitable en cualquier combustible expuesto a la atmósfera, y los límites normativos se establecen reconociendo que esta puede quedar dentro del valor admisible cuando los demás estados son adecuadamente controlados [26].

Los mecanismos de daño asociados a la presencia de agua en el sistema de inyección son múltiples y operan simultáneamente. El primero y más documentado en los eventos recientes de la flota es la corrosión localizada por picado o pitting sobre las superficies metálicas como se menciona en el informe interno y anteriormente en el trabajo [5]. El

segundo mecanismo es la cavitación interna, fenómeno por el cual las gotas de agua se vaporizan bajo las condiciones de baja presión local y colapsan posteriormente bajo presión, liberando energía suficiente para generar erosión de las superficies de precisión, este mecanismo fue específicamente identificado en el análisis post-falla del remolcador Tarqui [5]. El tercer mecanismo, igualmente crítico, es el lavado de la película lubricante que el propio combustible forma sobre las superficies móviles de bombas e inyectores, en el agua desplaza al combustible de la zona de contacto, expone las superficies al contacto metal-metal y produce desgaste acelerado por adhesión y posible gripado [5] [8].

Las consecuencias operacionales de estos mecanismos se presentan principalmente en los siguientes puntos. Primero en las bombas inyectoras, la combinación de corrosión, cavitación y lavado lubricante produce desgaste acelerado del émbolo y la camisa, pérdida progresiva de estanqueidad interna, fugas de combustible hacia el cárter, caída de la presión de inyección efectiva y, en escenarios extremos, gripado de los componentes [5]. Segundo, en los inyectores, los mismos mecanismos producen corrosión de la aguja y su asiento, cavitación en la cámara de control, goteo posterior al cierre del inyector y patrón de pulverización deficiente, manifestado externamente en humo blanco o gris durante la combustión [8] [9]. La presencia de agua actúa además como un habilitante para los otros dos vectores de contaminación analizados en este capítulo, este provee el medio físico para el crecimiento microbiano y favorece la aglomeración de sólidos suspendidos, lo que amplifica indirectamente el daño total sobre el sistema. Los límites normativos sobre contenido de agua refuerzan esta criticidad, la norma ISO 8217 establece máximos que van desde 200 mg/kg para los grados destilados sin FAME hasta 0,3% en volumen para los grados con FAME, mientras que Caterpillar y MTU exigen 0,02% en volumen o 200 ppm para sus motores common rail [8] [19].

1.3.3 Sedimentos sólidos y fracciones pesadas tipo bunker

La segunda categoría de contaminantes agrupa las partículas sólidas suspendidas en el combustible y los residuos provenientes de fracciones más pesadas del proceso de refinación. Aunque los combustibles destilados marinos teóricamente no deberían contener cantidades significativas de asfaltenos ni de finos catalíticos, ya que estos compuestos se asocian principalmente al procesamiento de combustibles residuales, eventos de falla en los últimos años confirman que la realidad operacional puede apartarse de la especificación nominal por contaminación cruzada en los puntos de la cadena de suministro o por incumplimiento de las prácticas de segregación de productos en las refinerías y terminales [9].

Los sólidos pueden agruparse en función de su origen y composición. Las partículas inorgánicas más comunes corresponden a polvo, arena, óxidos metálicos y residuos de la infraestructura de almacenamiento y transporte, que se incorporan al combustible durante el manejo en terminales, mangueras y los tanques. Los finos catalíticos son de naturaleza cerámica lo que los hace naturalmente duros, compuestos principalmente de aluminio y silicio, se originan en las refinerías y se cuantifican mediante el contenido total de Al+Si en el combustible. Aunque normalmente se asocian a combustibles residual, su aparición en destilados marinos es posible cuando ocurren mezclas indebidas con productos pesados del mismo proceso sea en la refinería o en su transporte [26]. Los asfaltenos son fracciones pesadas de hidrocarburos con alto peso molecular, estos son solubles en compuestos aromáticos, son hidrocarburos típicos de los combustibles residuales y, en concentraciones elevadas, son los responsables del aspecto oscuro y viscoso característico de un suministro contaminado con fracciones bunker. La guía técnica de Caterpillar señala explícitamente que los asfaltenos no están presentes en combustibles destilados, por lo que su detección en un destilado marino es un indicador inequívoco de contaminación cruzada con productos pesados [9]. A estos contaminantes se suman las gomas, resinas y depósitos formados por procesos de oxidación y degradación durante el almacenamiento prolongado, que aumentan la

viscosidad efectiva del combustible y comprometen su comportamiento en filtros y bombas [9].

Los mecanismos de daño asociados a estos contaminantes operan en distintos puntos del remolcador. El mecanismo dominante para las partículas duras es la abrasión, esta ocurre cuando partículas suspendidas en el combustible quedan atrapadas entre dos superficies en movimiento relativo y arrancan material de ambas superficies por desplazamiento mecánico [26]. La criticidad de este mecanismo dependerá del tamaño de las partículas y las holguras internas del sistema, las partículas pequeñas al pasar por una alta holgura entre superficies no causarán daños, mientras que partículas significativamente mayores tampoco al no lograr ingresar al espacio crítico. El rango más dañino se ubica en partículas comparables o ligeramente superiores a la holgura, que en los sistemas common rail modernos se sitúa por debajo de 5 µm. WinGD documenta específicamente que los finos catalíticos de 10 a 20 µm son las más peligrosas en los sistemas de inyección, ya que se quedan atrapadas en la película lubricante de aceite y en la estructura de las camisas, donde continúan provocando desgaste por largo tiempo después de haber ingresado al motor [11]. Caterpillar, en línea con esta lógica, identifica el rango crítico para sus motores de altas revoluciones entre 5 y 7 µm [9].

Las fracciones pesadas tipo bunker introducen mecanismos adicionales más allá del simple desgaste abrasivo. La alta viscosidad de los asfaltenos eleva el esfuerzo mecánico sobre la bomba inyectora, altera el patrón de inyección y compromete la atomización en la cámara de combustión, produciendo combustión incompleta [9]. Los depósitos carbonosos se acumulan en la punta del inyector, modifican el área efectiva de los orificios de salida y generan asimetrías en el patrón de pulverización, este efecto fue específicamente observado en los inyectores del remolcador Tarqui durante el análisis de falla [5].

Las consecuencias de contaminación por sedimentos se aprecian en todo el sistema. Desde los purificadores centrífugos, donde los sólidos se acumulan en el rotor y obligan

a operaciones de descarga más frecuentes. En los filtros de combustible, el ingreso masivo de sólidos y fracciones pesadas produce saturación prematura, evidenciada por incrementos rápidos en la presión diferencial y por la necesidad de cambios de filtros con frecuencias muy superiores a las planificadas, esto se aprecia el caso Mississippi 2024, donde los filtros primarios y secundarios fueron retirados con saturación masiva por matriz viscosa de sólidos y depósitos consistentes con fracciones bunker, ilustra este efecto con claridad [5]. En las bombas inyectoras, se genera un desgaste por abrasión y la corrosión química conducen a pérdida progresiva de presión de inyección y eventualmente a fallas catastróficas como las documentadas en la flota. Hasta en los inyectores, donde los sólidos abrasivos producen erosión de los orificios y desgaste de los asientos de aguja, y los depósitos carbonosos comprometen el patrón de pulverización.

1.3.4 Contaminación microbiana

La contaminación microbiana ocurre típicamente en la interfase agua-combustible existente en los tanques de almacenamiento y servicio, requiere la presencia simultánea de agua, nutrientes y temperaturas favorables, y resulta particularmente problemática en regiones tropicales y subtropicales donde la combinación de alta humedad ambiental y temperaturas comprendidas entre 15 °C y 40 °C provee condiciones cercanas al óptimo para el desarrollo de los microorganismos involucrados [13]. Remolcadores en la zona del Caribe, Brasil y Ecuador presentan precisamente estas condiciones climáticas, lo que sitúa a la contaminación microbiana como un factor de riesgo para una proporción relevante de la flota.

Los agentes responsables de la contaminación pertenecen a tres familias principales: bacterias, hongos y levaduras. Las bacterias y los hongos son los agentes principales, mientras que las levaduras aparecen normalmente como co-contaminantes [13]. La fuente de contaminación inicial es prácticamente inevitable, pequeñas poblaciones microbianas siempre encontrarán su camino al sistema de combustible a través del aire ambiente, las mangueras de trasiego, los tanques de barcazas de abastecimiento o

residuos no removidos de operaciones previas, y el problema operacional no reside en eliminar el ingreso, sino en evitar que las poblaciones residuales encuentren las condiciones para multiplicarse [13].

La presencia de FAME en el combustible amplifica significativamente el riesgo de contaminación microbiana por dos mecanismos. El biodiésel actúa como fertilizante para las poblaciones microbianas existentes y por sus cualidades físicas y químicas naturalmente absorben con más facilidad el agua. Mientras que un diésel petrolero convencional puede contener aproximadamente 60 ppm de agua, el biodiésel puede alcanzar niveles de 1.200 a 1.500 ppm o hasta 20 veces estos valores [9]. Este aumento en el contenido de agua incrementa de manera proporcional la probabilidad de crecimiento microbiano y de corrosión asociada [12].

Los mecanismos de daño asociados a la contaminación microbiana son múltiples y operan en distintos puntos del sistema. El primer mecanismo es la formación de biofilm y lodos gelatinosos en el fondo de los tanques y en la interfase agua-combustible, las colonias microbianas producen una matriz pegajosa similar a una película plástica capaz de atrapar partículas y obstruir filtros con rapidez extrema, estas tienen una naturaleza altamente viscosa [13]. El segundo mecanismo es la producción de ácidos orgánicos que atacan las superficies metálicas de los tanques, líneas de combustible y componentes del sistema de inyección, produciendo corrosión localizada particularmente agresiva en aceros y aleaciones de aluminio [13]. El tercer mecanismo, es la generación de H_2S, un gas que además de su toxicidad genera ácido sulfhídrico al combinarse con humedad y produce corrosión severa sobre componentes metálicos [13]. El cuarto mecanismo corresponde al desprendimiento de partículas del biofilm y de fragmentos de colonias microbianas, estas al liberarse circulan por el sistema y producen desgaste abrasivo sobre los componentes de precisión del sistema de inyección [5].

Las consecuencias operacionales son tanto inmediatas como acumulativas. En el corto plazo, los filtros de combustible se saturan con velocidad anormalmente alta por

acumulación de biofilm y lodos, obligando a frecuencias de cambio muy superiores a las planificadas, el combustible adquiere aspecto turbio o lechoso, se observan capas de interfase viscosas entre agua y combustible, y los sistemas de purificación centrífuga muestran descargas anormales con presencia de matriz biológica [13]. En el mediano plazo, las superficies metálicas de tanques, líneas e inyectores presentan corrosión localizada que compromete progresivamente la estanqueidad y las tolerancias críticas del sistema. En el largo plazo, los daños son equivalentes a los producidos por agua y sólidos en términos de pérdida de presión de inyección, gripado de émbolos y necesidad de intervenciones correctivas mayores. La detección oportuna requiere muestreos regulares en el fondo de los tanques, donde la concentración de microorganismos es máxima. El análisis específicos de carga microbiana que la norma ISO 8217 no cuantifica directamente pero que los fabricantes de motores establecen como inadmisibles para garantizar la confiabilidad del sistema [8] [19].

1.3.5 Efecto combinado y sinergia entre contaminantes

Los eventos catastróficos documentados entre 2024 y 2025 confirman, sin excepción, la presencia simultánea de los tres tipos principales de contaminantes en el combustible afectado, agua, sedimentos sólidos con fracciones pesadas y formas microbianas activas. Esto demuestra que los problemas de contaminación no se pueden evaluar de manera independiente, es necesario comprender como se potencian los efectos de contaminación al presentarse 2 o más contaminantes en el sistema. Las ocurrencias en 2024 y 2025 no constituyen una casualidad sino es el resultado predecible de las relaciones causales que existen entre los tres vectores de contaminación, y es precisamente el efecto combinado de estos contaminantes lo que explica la severidad y la rapidez con que los daños se materializan en los componentes del sistema de inyección [5].

La relación más directa de amplificación cruzada se establece entre el agua y la contaminación microbiana. El agua libre o emulsionada en el combustible no solamente produce los mecanismos de daño descritos en la sección 2.3.2, sino que

constituye el medio físico para el desarrollo de las poblaciones microbianas, en ausencia de agua, las bacterias y hongos no encuentran las condiciones necesarias para multiplicarse, y el problema microbiano queda neutralizado [13]. Las colonias microbianas establecidas degradan las propiedades del combustible y elevan su capacidad de retener agua, produciendo emulsiones más estables que dificultan la separación posterior por gravedad y por centrifugación [13]. Esta relación bidireccional explica por qué los protocolos de prevención de contaminación microbiana enfatizan, antes que el uso de biocidas, el control riguroso del contenido de agua en los tanques. Eliminar el agua es eliminar la condición habilitante del crecimiento microbiano.

Una segunda relación de amplificación cruzada conecta los sedimentos sólidos con las otras dos categorías. Las partículas sólidas en suspensión saturan los filtros y comprometen la eficiencia de los purificadores centrífugos, lo que reduce la capacidad efectiva del sistema de tratamiento para remover el agua emulsionada y, en consecuencia, deja al combustible más expuesto a actividad microbiana [26]. Las partículas que se desprenden del biofilm contribuyen, a su vez, a la carga total de sólidos en el combustible, esto genera un mecanismo de retroalimentación haciendo que uno potencie al otro.

Una tercera relación, particularmente relevante desde el punto de vista del diseño del sistema de tratamiento, es la interacción entre los contaminantes y la capacidad efectiva de los equipos a bordo. Cada equipo del tren de tratamiento, sea purificador centrífugo, filtro coalescente o filtro mecánico de etapa primaria y secundaria, está diseñado para remover preferentemente un tipo de contaminante bajo condiciones nominales de los demás. Cuando los tres contaminantes están presentes simultáneamente y en concentraciones elevadas, los equipos operan fuera del régimen para el que fueron especificados: los purificadores centrífugos saturan prematuramente por carga de sólidos, los filtros se obstruyen por biofilm antes de alcanzar su capacidad nominal de retención de partículas, y la eficiencia individual de cada etapa cae significativamente por la interacción cruzada de los contaminantes. El resultado neto es un sistema de

tratamiento cuya capacidad real de protección puede ser significativamente inferior a la suma de las capacidades nominales individuales de sus equipos.

Esta caracterización del efecto combinado tiene una consecuencia directa para el dimensionamiento del sistema de purificado y filtrado a bordo, conclusión técnica central de la presente sección. Una estrategia de mitigación efectiva no puede sostenerse sobre la mejora aislada de un componente o sobre la respuesta puntual a un tipo específico de contaminante. Reforzando que se requiere una arquitectura multietapa que aborde simultáneamente las tres categorías de contaminación.

El análisis de los contaminantes confirma que los tres vectores relevantes para la flota: Agua, sedimentos sólidos con fracciones pesadas tipo bunker y contaminación microbiana, estos actúan mediante mecanismos de daño distintos pero interrelacionados, y cuya presencia simultánea amplifica el efecto individual de cada uno. El agua opera como contaminante habilitante, al proveer el medio para el crecimiento microbiano y favorecer la aglomeración de sólidos, mientras que la saturación cruzada de los equipos reduce la capacidad real de protección por debajo de la suma de sus capacidades nominales. La conclusión técnica central de esta sección, que orienta el dimensionamiento del sistema, es que ninguna estrategia de mitigación orientada a un único contaminante resulta suficiente, se requiere una arquitectura de tratamiento multietapa capaz de abordar las tres categorías de manera coordinada.

1.4 Purificación centrífuga

1.4.1 Rol del purificador centrífugo en el sistema de purificado y filtrado

El purificador centrífugo constituye el equipo principal de la primera etapa de tratamiento del combustible diésel a bordo, situado entre el tanque de sedimentación y el tanque de servicio (también conocido como tanque diario). Su función específica es

remover los contaminantes que no pueden ser eliminados por sedimentación gravitacional en tiempos compatibles con el flujo solicitado por la operación. Como se describió en la sección 2.3, algunos de los contaminantes más relevantes para los motores de la flota corresponden al agua emulsionada y a los sólidos finos suspendidos, estos contaminantes no logran sedimentar dentro del tiempo adecuado para una operación adecuada. La sedimentación gravitacional, regida por la ley de Stokes, requiere períodos de varias horas para desplazar partículas del orden de micrones, plazo que el caso Tarqui ilustra con claridad: la reducción del tiempo de sedimentación de 72 a 24 horas en la cadena logística ecuatoriana fue suficiente para que el combustible llegara a los remolcadores con niveles de contaminación significativamente superiores a los esperados [5].

El purificador centrífugo resuelve esta limitación al sustituir el campo gravitacional por un campo centrífugo cuya intensidad supera en miles de veces la aceleración de la gravedad, lo que permite separar contaminantes en segundos lo que en un tanque tomaría horas. Esta característica convierte al purificador en el único equipo del tren de tratamiento capaz de procesar de forma continua todo el caudal de combustible que alimenta los motores dentro del remolcador mientras simultáneamente remueve agua y sólidos en una sola etapa. La presente sección desarrolla los fundamentos técnicos del purificador centrífugo, necesarios para comprender su correcto dimensionamiento y operación. Esta sección abordará, el principio físico que sustenta el equipo, la arquitectura mecánica de un separador moderno, los modos de operación disponibles, los factores que condicionan su eficiencia de separación, y los criterios de dimensionamiento aplicables a una flota de remolcadores.

1.4.2 Principio físico: ley de Stokes y campo centrífugo

El fundamento teórico de la purificación centrífuga reposa sobre la ley de Stokes, que describe la velocidad para que una partícula esférica sedimente al fondo de un tanque bajo la influencia del campo gravitacional, la velocidad de sedimentación (V_g) de una partícula está dada por la expresión:

$$V_g = \left[\frac{d^2(D_2 - D_1)}{18\eta}\right] \cdot g$$

Ecuación 1: Ecuación de velocidad de sedimentación.

donde d es el diámetro de la partícula, D_2 es la densidad de la partícula o gota a separar, D_1 es la densidad del fluido en el que está suspendida, η es la viscosidad dinámica del fluido y g es la aceleración de la gravedad [13]. Esta ecuación pone de manifiesto las cuatro variables que gobiernan la separación: el tamaño de la partícula entra al cuadrado, lo que implica que partículas muy pequeñas sedimentan extremadamente despacio; la diferencia de densidades entre la partícula y el fluido aparece como factor lineal, de modo que cuando ambas densidades son cercanas la sedimentación se vuelve impráctica, la viscosidad del fluido reduce la velocidad de manera inversamente proporcional, lo que justifica el calentamiento del combustible para mejorar la separación, y la aceleración del campo entra como factor multiplicativo, lo que abre la posibilidad de acelerar el proceso si se logra reemplazar la gravedad por un campo de mayor magnitud.

El purificador centrífugo realiza precisamente esta sustitución. Al hacer girar el combustible a velocidades del orden de 7.500 a 10.000 revoluciones por minuto en separadores marinos de las categorías utilizadas en remolcadores [27] [28] [29] [30], se genera un campo centrífugo cuya intensidad multiplica la aceleración de la gravedad por un factor adimensional Z, definido como:

$$Z = r \cdot \frac{\omega^2}{g}$$

Ecuación 2: Factor de corrección para sedimentación por centrifuga.

donde r es la distancia de la partícula al eje de rotación y ω es la velocidad angular del bol [13]. La velocidad efectiva de sedimentación bajo el campo centrífugo se obtiene multiplicando la velocidad de sedimentación por el factor Z:

$$V = V_g \cdot Z$$

Ecuación 3: Velocidad de sedimentación por centrifuga.

Para los separadores marinos típicos, el factor Z alcanza valores del orden de varios miles, lo que significa que una partícula que en un tanque tardaría una hora en sedimentar lo hace en fracciones de segundo dentro del bol rotatorio. Esta amplificación es la que hace operacionalmente viable la remoción continua de contaminantes que la sedimentación gravitacional jamás podría procesar en tiempos prácticos para una operación marítima [13] [26].

La consecuencia metodológica de la ley de Stokes es que las cuatro variables identificadas (diámetro de partícula, diferencia de densidades, viscosidad y aceleración) se transforman en parámetros operacionales del purificador. La diferencia de densidades depende del combustible y del contaminante, y queda condicionada por la calidad del suministro y por la temperatura de operación, dado que ambas densidades varían con la temperatura, pero con coeficientes distintos. La viscosidad depende del combustible y se puede controlar mediante el calentamiento previo al separador. La aceleración centrífuga es una característica fija del equipo, determinada por el diseño del bol y por su velocidad de rotación. Y el diámetro de partícula es la variable independiente no controlable, el equipo puede separar partículas por encima de un tamaño crítico que depende de los demás parámetros, mientras que las partículas por debajo de ese tamaño escapan con el combustible limpio y deben ser capturadas por los filtros mecánicos posteriores al purificador. Las subsecciones siguientes desarrollan cómo estos parámetros se traducen en la arquitectura del equipo y en sus modos de operación.

1.4.3 Arquitectura del equipo: bol, paquete de discos e interfase

Un separador centrífugo marino moderno se construye sobre tres componentes funcionales principales: el bol rotatorio que genera el campo centrífugo, el paquete de discos que organiza el flujo del combustible para optimizar la separación, y los sistemas de descarga que evacúan los contaminantes separados. Los manuales de los equipos efectivamente utilizados en aplicaciones marinas describen una construcción del bol en tipo solid-wall disk-type, en el que la pared del bol es continua y los sólidos se

acumulan en su periferia hasta ser retirados manualmente durante la limpieza, configuración característica de los separadores de tamaño medio y bajo caudal aplicables a remolcadores [27] [28] [29] [30].

El bol es el corazón mecánico del equipo. Construido en aleaciones de acero de alta resistencia y diseñado para soportar las fuerzas centrífugas asociadas a las velocidades nominales de operación, el bol gira sobre un eje vertical accionado por un motor eléctrico a través de un sistema de engranajes o correa que multiplica la velocidad del motor hasta el régimen de operación del separador. Los datos de los manuales muestran ratios típicos como se aprecia en la Tabla 1.

Tabla 1: Especificaciones técnicas velocidades angulares en purificadores.

Modelo	**Velocidad angular del motor [RPM]**	**Frecuencia [Hz]**	**Ratio de reducción [-]**	**Velocidad angular del bol [RPM]**
MAB 103B-24	1.500/1.800	50/60	40:7/43:9	8.571/8.600
MAB 104B-14/24	1.500/1.800	50/60	50:10/49:12	7.500 / 7.350
OTC 2-02-137	3.000/3.600	50/60	10:3/25:9	10.000
OTC 3-02-137	3.000/3.600	50/60	10:3/25:9	10.000

Estas velocidades generan, en el radio operacional del bol, fuerzas centrífugas que multiplican la gravedad por factores del orden de varios miles, condición necesaria para activar la separación de partículas finas y de gotas de agua emulsionadas en tiempos compatibles con el caudal de procesamiento.

En el interior del bol se encuentra el paquete de discos, componente central de la separación efectiva. Los discos son láminas de geometría cónica de acero apiladas con

una separación de aproximadamente 0,5 mm entre sí, lo que genera un conjunto de canales paralelos por los que circula el combustible durante el procesamiento como se aprecia en la Ilustración 3. La función del paquete de discos es subdividir el volumen total del bol en un gran número de cámaras de sedimentación de espesor reducido, lo que aumenta el área de captura significativamente reduciendo la distancia que debe recorrer cada partícula para alcanzar una superficie de captura, en consecuencia, aumenta significativamente la eficiencia de separación respecto de un bol sin discos [13]. Los manuales de los separadores Alfa Laval y GEA Westfalia describen este paquete como uno de los componentes que requieren limpieza periódica más cuidadosa, ya que la acumulación de sólidos y depósitos viscosos sobre las superficies de los discos compromete el flujo entre cámaras y degrada progresivamente el rendimiento del equipo, haciendo su limpieza periódica uno de los procedimientos más importantes de realizar [27] [28] [29] [30].

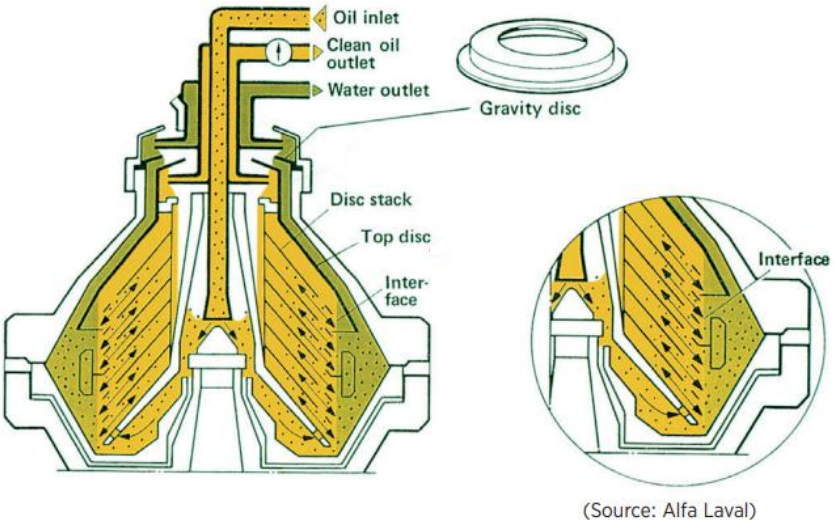


Ilustración 3: Posición correcta en la interfase-Aceite distribuido a todos los canales del conjunto de discos. Fuente: Chevron [13].

El concepto operacional más crítico para la operación de un separador convencional es el de la interfase entre el agua y el combustible, denominada habitualmente sello de agua (water seal) en la literatura técnica. Cuando el separador opera en modo purificador, el bol contiene simultáneamente combustible limpio (fase ligera, hacia el

centro del bol) y agua separada (fase pesada, hacia la periferia), con una superficie de contacto entre ambas fases denominada interfase. La posición correcta de esta interfase debe situarse fuera del paquete de discos, pero dentro del borde exterior del disco superior como se aprecia en la Ilustración 3, si la interfase se desplaza hacia adentro y entra en el paquete de discos, el agua bloquea los canales y compromete la separación; si se desplaza hacia afuera y sobrepasa el borde del disco superior, el sello de agua se rompe y el combustible escapa por la salida de agua sin haber sido limpiado [13] [26].

1.4.4 Modos de operación: purificador y clarificador

Un separador centrífugo puede operar bajo dos modos básicos según la configuración interna de su bol. Esta subsección desarrolla los dos modos operacionales relevantes para el tratamiento de combustible diésel marino: purificador convencional con disco de gravedad y clarificador.

El modo purificador es la configuración que separa simultáneamente dos líquidos de densidades distintas (combustible y agua) y los sólidos contenidos en ellos. En esta configuración, el bol está equipado con un disco de gravedad (gravity disc), una pieza anular intercambiable cuyo diámetro de orificio interior determina la posición radial de la interfase agua-combustible dentro del bol. La selección correcta del disco de gravedad es un factor operacional crítico del modo purificador, el disco se debe seleccionar de acuerdo con la densidad del combustible procesado de modo que la interfase quede correctamente posicionada [27] [28] [29] [30]. La regla general establecida por los fabricantes consiste en seleccionar el disco con el orificio de mayor diámetro que no provoque la ruptura del sello de agua, criterio que privilegia la eficiencia de separación sin sacrificar la estanqueidad operacional. Cuando el combustible es más denso el valor de referencia, o cuando el caudal de alimentación es elevado, debe utilizarse un disco con orificio más pequeño, en contraste, cuando el combustible es más ligero, debe utilizarse un disco con orificio mayor [27]. Los manuales de los fabricantes entregan tablas con tal de seleccionar el disco adecuado de acuerdo a la densidad. Estas tablas operativas evidencian que cualquier cambio

significativo en la densidad del combustible procesado obliga a reemplazar físicamente el disco de gravedad para mantener la eficiencia de separación, intervención que requiere detener el equipo, abrir el bol y manipular componentes internos.

El modo purificador convencional presenta un límite estructural de densidad. La construcción mecánica de los discos de gravedad disponibles permite el procesamiento de combustibles con densidades de hasta aproximadamente 991 kg/m³ a 15 °C en separadores Alfa Laval clásicos, valor que coincide con el límite reportado por la guía técnica de Chevron Marine Products. Por encima de esta densidad, el disco de gravedad necesario tendría dimensiones físicamente inviables y la operación purificadora deja de ser posible.

El segundo modo se conoce como clarificador, este corresponde a una configuración alternativa del mismo bol en la que la salida de agua se cierra mediante el reemplazo del disco de gravedad por un disco clarificador (clarifier disc) que sella la fase pesada [27] [28]. En esta configuración el separador remueve solamente sólidos de un líquido de menor densidad que las partículas, sin capacidad de procesar volúmenes significativos de agua. El agua eventualmente presente en el combustible se acumula junto con los sólidos en el espacio de lodos del bol y se descarga durante las operaciones periódicas de limpieza. La capacidad de retención de agua del modo clarificador es estructuralmente limitada [13]. Por esta razón, la configuración clarificadora no se utiliza de manera autónoma para combustibles que contienen cantidades significativas de agua sino habitualmente en serie después de un purificador, configuración en la que el clarificador captura los sólidos finos remanentes y el agua residual ya minimizada por la etapa previa [13]. Los equipos Alfa Laval MAB y GEA Westfalia OTC documentan explícitamente la posibilidad de convertir la misma máquina entre purificador y clarificador mediante el cambio de piezas internas.

1.4.5 Factores que afectan la eficiencia de separación

La eficiencia efectiva de un purificador centrífugo en operación depende de un conjunto de factores que pueden agruparse en cuatro categorías principales: el caudal

de alimentación, la temperatura de operación, las propiedades fisicoquímicas del combustible procesado y el tamaño de las partículas o gotas que se desean separar. La comprensión cuantitativa de estos factores es indispensable para dimensionar correctamente el equipo y para definir las prácticas operacionales que mantienen su rendimiento dentro de los rangos esperados.

El caudal de alimentación establece una relación inversa con la eficiencia de separación. A mayor caudal, menor el tiempo de residencia del combustible en el bol, menor la distancia radial que las partículas alcanzan a recorrer durante el procesamiento, y mayor la fracción de contaminantes que escapa con el combustible limpio [26]. Esta relación tiene una consecuencia operacional directa, al reducir el caudal por debajo del nominal mejora significativamente la eficiencia de separación, mientras que excederlo degrada el rendimiento del equipo aun cuando todos los demás parámetros sean correctos. Las prácticas recomendadas por Alfa Laval proponen ajustar el caudal del separador al consumo real del motor, lo que en operaciones a carga reducida del propulsor implica caudales sustancialmente inferiores al nominal y, en consecuencia, eficiencias de separación significativamente superiores [13]. Para un remolcador, cuya operación es altamente variable con transiciones frecuentes entre ralentí y potencia máxima, hace que al utilizar un caudal único no se aproveche la capacidad de mejora disponible bajo condiciones operacionales reales.

La temperatura de operación afecta la eficiencia por dos mecanismos simultáneos que actúan en el mismo sentido. Por un lado, el aumento de temperatura reduce la viscosidad del combustible, lo que según la ley de Stokes incrementa la velocidad de sedimentación de las partículas en el campo centrífugo. Por otro lado, las densidades del combustible y del agua varían con la temperatura siguiendo coeficientes distintos: la densidad del agua disminuye más lentamente que la del combustible, de modo que la diferencia de densidades entre ambas fases aumenta con la temperatura, lo que también según Stokes incrementa la velocidad de separación [13]. La consecuencia combinada es que la eficiencia de separación mejora con la temperatura dentro del rango operacional del equipo. Para combustibles destilados marinos, la temperatura de

separación recomendada se sitúa entre 20 °C y 40 °C, rango que en climas tropicales reduce o elimina la necesidad de precalentamiento. Mientras que para combustibles residuales, el procesamiento requiere temperaturas del orden de 50 a 98 °C. Los manuales de los separadores estudiados declaran una temperatura máxima admisible de 100 °C [27] [28] [29] [30], pero esta cifra corresponde al límite de seguridad mecánica del equipo, y debe adicionalmente mantenerse al menos 10 °C bajo el punto de inflamación del combustible, con tal de evitar la formación de atmósferas explosivas en el sistema [9].

El tamaño de partícula define el límite inferior de los contaminantes que el equipo puede capturar. Como se aprecia en la Ilustración 4 la curva de eficiencia de un separador centrífugo decae rápidamente para partículas por debajo de un tamaño crítico que depende del diseño del bol, del caudal, viscosidad y diferencia de densidades. Las partículas con diámetro de 10 a 20 µm, se sitúan en el rango eficientemente removible por un separador correctamente operado. Las partículas más finas, en el rango de 1 a 5 µm, escapan parcialmente del campo centrífugo y deben ser capturadas por los filtros mecánicos ubicados después del purificador. Esto justifica desde el punto de vista técnico la arquitectura de tratamiento en dos etapas adoptada por la práctica del sector marítimo.

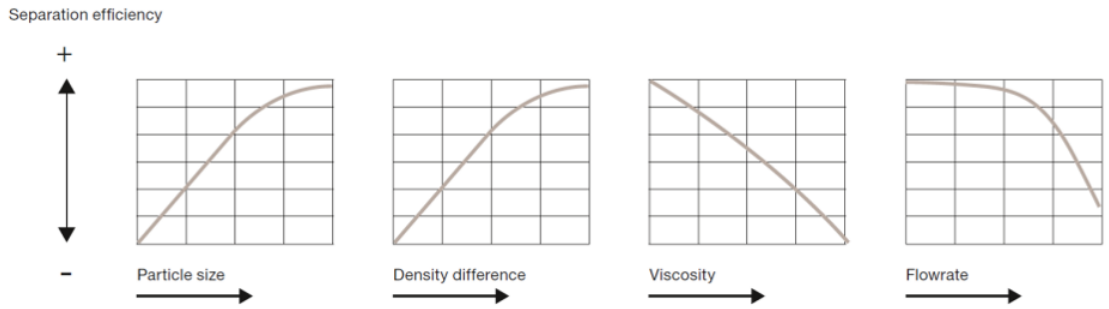


Ilustración 4: Tablas de eficiencia de separación en relación con: Tamaño de partícula, diferencia de densidad, viscosidad y caudal. Fuente: WinGD [11].

1.4.6 Prácticas operacionales recomendadas

Las prácticas operacionales recomendadas para mantener el rendimiento del separador a lo largo de su vida útil son las siguientes. Primero, ajustar el caudal al consumo real del motor, en lugar de la operación a caudal nominal fijo, mejora la calidad de separación durante períodos de operación a carga reducida, condición frecuente en remolcadores que permanecen en stand-by entre maniobras. El monitoreo de la densidad del combustible en cada operación de bunker permite verificar la compatibilidad del suministro con el disco de gravedad instalado en separadores convencionales, y detectar a tiempo la necesidad de cambiar el disco antes de comprometer la operación del equipo [26]. El mantenimiento periódico del paquete de discos, las descargas regulares de lodos y la verificación de la integridad de los sellos del bol son condiciones necesarias para sostener el rendimiento del separador en el tiempo, según los procedimientos detallados en los manuales de cada fabricante [27] [28] [29] [30].

La purificación centrífuga, según los principios desarrollados en esta sección, constituye la primera etapa del tratamiento del combustible a bordo y resuelve la remoción simultánea de agua emulsionada y sólidos suspendidos en cantidades significativas, pero no captura las partículas de tamaño inferior al límite operacional del campo centrífugo ni provee redundancia frente a fallas o ineficiencias de la propia etapa centrífuga. La sección siguiente desarrolla los fundamentos técnicos de la filtración mecánica como segunda etapa complementaria del tratamiento, encargada de la protección final del sistema de inyección antes del ingreso del combustible al motor.

La purificación centrífuga constituye la primera etapa del tren de tratamiento y resuelve, sobre la base de la ley de Stokes amplificada por un campo centrífugo de varios miles de veces la gravedad, la remoción continua y simultánea de agua emulsionada y sólidos suspendidos en cantidades significativas. Su desempeño efectivo, sin embargo, no es una constante del equipo sino el resultado de la interacción entre el caudal de alimentación, la temperatura de operación, la diferencia de densidades y el tamaño de partícula, de modo que un purificador correctamente

especificado puede degradar su eficiencia ante combustibles de densidad variable o ante caudales superiores al óptimo. El modo purificador depende además del posicionamiento de la interfase mediante el disco de gravedad, cuya selección está condicionada a la densidad del combustible.

1.5 Filtración mecánica

1.5.1 Rol de la filtración mecánica en el sistema

La filtración mecánica constituye la segunda etapa del tren de tratamiento del combustible diésel a bordo, situada entre el tanque de servicio y la bomba de alta presión que entrega el combustible al sistema de inyección. Su función específica es capturar los contaminantes que el campo centrífugo no logró remover eficientemente, en específico las partículas sólidas con diámetro inferior al límite operacional del separador. La sección presente desarrolla los principios físicos de la filtración mecánica, las métricas estandarizadas que caracterizan su rendimiento, las configuraciones típicas a bordo de un remolcador, los factores operacionales que afectan su comportamiento real y las prácticas de mantenimiento que permiten sostener su efectividad a lo largo del intervalo de servicio.

1.5.2 Principios físicos: filtración de superficie y de profundidad

La captura de partículas en un medio filtrante responde a la acción de varios mecanismos físico, para ellos es importante el tamaño de la partícula, la velocidad del fluido y la geometría del medio. El mecanismo dominante para partículas mayores que el tamaño de los poros del medio es el tamizado o cribado, en el que la partículas no puede atravesar la abertura y queda retenida en la superficie del filtro. Para partículas menores que los poros, interviene la intercepción directa, en la que la partícula sigue una línea de corriente que la lleva a contactar la fibra del medio y queda adherida [26].

En el contexto del presente trabajo, el rango crítico de partículas se sitúa entre uno y veinte micrones.

La industria distingue dos arquitecturas principales de medio filtrante según la distribución espacial de la captura. La filtración de superficie utiliza medios de espesor reducido, típicamente papel plisado tratado o mallas metálicas finas, con una distribución de tamaño de poro estrecha y bien definida. La captura ocurre en la cara del medio expuesta al flujo, y el rendimiento del filtro responde del tamaño nominal del poro, las partículas mayores quedan retenidas y las menores pasan. Este tipo de filtración alcanza eficiencias elevadas para tamaños cercanos a la capacidad del medio, pero su retención de suciedad es limitada porque dichas partículas se acumulan sobre una superficie reducida, generando una pérdida de carga creciente conforme avanza la operación.

La segunda arquitectura es conocida como filtración de profundidad, esta utiliza medios de mayor espesor compuestos por fibras de celulosa, microfibra de vidrio o materiales sintéticos enmarañados, en ella las partículas se distribuyen a lo largo de todo el volumen del medio. Las partículas son retenidas por intercepción y adhesión a medida que avanzan por el laberinto interno de fibras. La consecuencia operacional es una mayor capacidad de retención de suciedad por superficie externa, propiedad denominada en la literatura técnica como capacidad de captura de suciedad (dirt holding capacity) y una curva de pérdida de carga más gradual a lo largo del intervalo de servicio [26]. Los filtros modernos para combustible marino combinan habitualmente ambas arquitecturas, integrando una capa de profundidad para la captura de gruesos y una capa de superficie para asegurar el rating absoluto exigido por el motor.

1.5.3 Caracterización del rendimiento: ISO 4406, razón Beta y rating absoluto

La norma ISO 4406, además de utilizarse como referencia para el nivel de limpieza del combustible, también se utiliza como referencia operacional para verificar el desempeño de un filtro instalado a bordo. Consiste en clasificar la concentración de partículas en tres rangos de tamaño (mayores a cuatro, mayores a seis y mayores a catorce micrones) y se expresan como un código de tres cifras separadas por barras, donde cada cifra corresponde a un orden de magnitud creciente de partículas por mililitro de muestra. Las exigencias documentadas por los fabricantes para sus motores common rail, ISO 18/16/13 establecida por Caterpillar y ISO 18/17/14 establecida por MTU, definen los valores objetivo que el sistema de tratamiento completo debe entregar en el punto de ingreso a la bomba de alta presión [8] [19].

El rendimiento de un filtro caracteriza mediante la razón Beta, este determina el cociente entre el número de partículas mayores a un tamaño determinado antes del filtro y el número de partículas mayores a ese mismo tamaño después del filtro, bajo condiciones de ensayo estandarizadas. Una razón Beta igual a dos para un tamaño de cinco micrones, por ejemplo, indica que el filtro retiene el cincuenta por ciento de las partículas mayores a ese tamaño. Un valor de cien indica una retención del noventa y nueve por ciento, y un valor de doscientos indica una retención del noventa y nueve coma cinco por ciento. El concepto de rating absoluto significa que la razón Beta del filtro alcanza o supera el valor de doscientos, equivalente a una eficiencia de retención del noventa y nueve coma cinco por ciento al tamaño de partícula que aclame [26].

La distinción entre rating nominal y rating absoluto es relevante. El rating nominal es un valor declarado por el fabricante del filtro sin un protocolo único de medición, y puede corresponder a eficiencias muy variables según la metodología empleada por cada proveedor. El rating absoluto, en cambio, está vinculado a un ensayo estandarizado y a un umbral mínimo de eficiencia, es la referencia técnica utilizada por los fabricantes de motor cuando especifican exigencias de filtración. Caterpillar establece explícitamente que sus motores common rail y de inyector unitario

electrónico requieren filtración secundaria absoluta de cuatro micrones, y que sus filtros de eficiencia avanzada de fábrica cumplen este rating [8]. MTU posee la misma exigencia en sus filtro [19]. Wärtsilä, en su guía de producto para el motor 20, no impone un rating absoluto en el mismo formato, pero establece tamaños de filtración recomendados para cada etapa del tren de tratamiento [25]. Al seleccionar un filtro cualquier especificación que se exprese únicamente como rating nominal, sin referencia a la razón Beta se considera insuficiente para alcanzar las exigencias solicitadas por los fabricantes.

1.5.4 Configuraciones típicas a bordo: filtración primaria, secundaria y separación coalescente

La configuración de filtración mecánica adoptada en remolcadores marítimos se organiza en dos etapas principales en serie, complementadas con un elemento específico para la separación de agua emulsionada residual. La primera etapa, denominada filtración primaria o pre-filtración, se sitúa después del tanque de servicio y antes de la bomba de alimentación que entrega el combustible a la bomba de alta presión. Su rating típico se sitúa en el rango de diez a treinta micrones, y su función es proteger los componentes mecánicos y prolongar la vida útil del filtro secundario al retener la fracción gruesa de la contaminación.

La segunda etapa, denominada filtración secundaria o fina, se sitúa inmediatamente antes de la bomba de alta presión y se encuentra integrada en el propio motor como filtro de máquina. Su rating responde directamente a la exigencia del fabricante, cuatro micrones absolutos en motores Caterpillar y MTU [8] [19]. En los casos de Caterpillar y MTU estos filtros son específicos de cada motor y no se recomienda utilizar otro tipo de filtro o fabricante. Esta etapa es la última barrera de protección del sistema de inyección, y los elementos típicamente combinan una capa de profundidad para la captura intermedia con una capa de superficie de poro estrecho para asegurar el rating absoluto. La degradación de un filtro se manifiesta a través del aumento progresivo de

la presión diferencial a lo largo del intervalo de servicio, indicador que se desarrolla en la subsección siguiente.

A las dos etapas anteriores se puede sumar una tercera, un separador de agua coalescente, este componentes se encarga de remover el agua emulsionada que el purificador centrífugo no captura completamente. El principio de operación de un coalescente consiste en forzar el paso del combustible a través de un medio de fibras hidrofílicas que provocan la unión de las gotas microscópicas de agua dispersas en el combustible, formando gotas mayores que pueden separarse posteriormente por gravedad en una cámara de decantación incorporada al cuerpo del filtro. El agua acumulada en el fondo de la cámara se drena periódicamente mediante una válvula manual o automática, según el equipo. La función del separador coalescente es complementaria al purificador centrífugo. Los fabricantes recomiendan integrar ambos equipos en el tren de tratamiento, particularmente en remolcadores que operan en mercados donde la calidad y predictibilidad del combustible es baja [13].

La configuración duplex es una variante operacional común en aplicaciones marinas, en la que dos filtros idénticos se instalan en paralelo con una válvula selectora que permite derivar el flujo a uno, al otro o ambos elementos a la vez, brinda la versatilidad de que no se detiene la operación del motor. Esta arquitectura permite reemplazar el elemento saturado mientras el motor continúa operando con el filtro de respaldo, característica particularmente valorada en remolcadores que no pueden interrumpir el servicio durante una maniobra. [26]

1.5.5 Factores que afectan el rendimiento operacional

El rendimiento efectivo de un filtro mecánico en operación depende de un conjunto de factores que pueden agruparse en cuatro grupos: la presión diferencial como indicador integrado del estado del filtro, las condiciones del fluido procesado, los efectos de la temperatura, y la naturaleza específica de los contaminantes presentes.

La presión diferencial entre la entrada y la salida del filtro es la métrica operacional de referencia para evaluar el estado del elemento durante su vida en servicio. Un filtro nuevo presenta una presión diferencial inicial baja, determinada por la resistencia hidráulica del medio limpio. A medida que la operación progresa y el medio captura partículas, las partículas acumuladas se juntan formando un sedimento conocido como "torta", esta reduce el área efectiva y aumenta la presión diferencial de manera progresiva. Los fabricantes de motor establecen un valor máximo admisible de presión diferencial para el filtro secundario, típicamente reportado en bar o en unidades equivalentes, por encima del cual el elemento debe ser reemplazado independientemente de las horas de operación acumuladas [26]. Cuando la presión diferencial alcanza el valor máximo en frecuencias mayores a los previstos por la historia del sistema o el programa de mantenimiento, el sistema está señalando una carga de contaminantes superior a la nominal o diseñado, condición observada de manera consistente durante los sucesos descritos en la flota.

La viscosidad del combustible afecta la presión diferencial a través de la resistencia hidráulica del medio, que se incrementa de manera proporcional a la viscosidad. Las propiedades de flujo en frío se manifiestan en el filtro como un aumento brusco de la presión diferencial cuando la temperatura del combustible cae por debajo del punto de obstrucción de filtro en frío. La cristalización de parafinas de cadena larga forma una matriz cerosa que satura el medio en plazos extremadamente cortos, y la operación bajo estas condiciones puede llevar al filtro al colapso hidráulico antes de que el sistema alcance a alarmar por presión diferencial. Este mecanismo es relevante para la operación de los remolcadores en climas fríos, particularmente en Canadá, y exige que el dimensionamiento del filtro y la temperatura mínima del combustible en el sistema sean compatibles con el suministro local [13].

El comportamiento del filtro frente a contaminación microbiana, desarrollado anteriormente, presenta diferencias respecto del comportamiento frente a contaminación por partículas sólidas convencionales. La biopelícula y los lodos gelatinosos producidos por colonias bacterianas saturan el medio con una matriz

viscosa independiente del rating del filtro, y producen incrementos abruptos de presión diferencial en plazos cortos, sin un patrón de degradación gradual asociado al desgaste normal del elemento [13].

Finalmente, el caudal afecta el rendimiento del filtro en dos direcciones simultáneas. Caudales superiores al nominal aumentan la velocidad del flujo a través del medio, reducen el tiempo de contacto entre las partículas y las fibras de captura y degradan la eficiencia efectiva, particularmente para los mecanismos de intercepción y difusión. Adicionalmente, caudales elevados aumentan la presión diferencial inicial y aceleran la saturación del medio.

1.5.6 Prácticas operacionales y mantenimiento

La correcta operación de un filtro implica una serie de prácticas que combinan monitoreo continuo del medio, intervenciones programadas y reacciones correctivas frente a desviaciones detectadas. El monitoreo de la presión diferencial es la práctica fundamental, y debe realizarse mediante instrumentación instalada permanentemente sobre el filtro. Los criterios de cambio del elemento integran tres variables complementarias, presión diferencial máxima alcanzada, horas de operación acumuladas y programa de mantenimiento preventivo definido. El cambio se ejecuta cuando cualquiera de las tres referencias alcanza su umbral, no cuando se alcanzan todas simultáneamente. Esta jerarquía evita que un evento de contaminación severa, capaz de saturar el filtro en plazos inferiores al programa, comprometa la protección del sistema de inyección [24] [26].

El drenaje del agua acumulada en los filtro primarios y separadores coalescentes es una práctica complementaria de frecuencia diaria o por turno, según la operación del remolcador y el clima de operación. La acumulación prolongada de agua en la cámara de decantación reduce el volumen disponible para la separación, degrada el rendimiento del filtro y, en escenarios extremos, puede producir el arrastre de agua libre hacia las etapas siguientes del sistema. La práctica recomendada es verificar la cámara al inicio de cada turno de máquinas y registrar el volumen drenado, dado que

un incremento sostenido del volumen drenado constituye una señal temprana de degradación de la calidad del combustible suministrado, pérdida de eficiencia del purificador centrífugo [13] [26] o incluso infiltraciones en el sistema.

La instalación de un filtro debe realizarse con limpieza absoluta del entorno del cuerpo del filtro, dado que cualquier partícula introducida durante el cambio queda automáticamente después del medio y alcanza el sistema de inyección sin filtración. Los manuales de los fabricantes de motor incluyen procedimientos específicos para el cebado del sistema posterior al cambio del elemento, paso necesario para evitar la entrada de aire a la bomba de alta presión y para verificar la estanqueidad de las conexiones [8].

La filtración mecánica constituye la segunda etapa del tren de tratamiento y la última barrera de protección antes del ingreso del combustible a la bomba de alta presión. Mediante la combinación de filtración de superficie y profundidad, y caracterizada por métricas estandarizadas como el código ISO 4406, la razón Beta y el rating absoluto, esta etapa captura las partículas finas que el campo centrífugo no logra remover, alcanzando el grado de 4 μm absolutos que exigen Caterpillar y MTU para sus motores common rail. La configuración típica a bordo refleja una lógica de protección escalonada y redundante. La presión diferencial se consolida como la variable de condición de referencia del estado del elemento, si bien su comportamiento ante contaminación microbiana, caracterizado por saturaciones abruptas, advierte que el monitoreo no puede sustituir el control del agua en las etapas previas. La conclusión de esta sección es que filtración y purificación son complementarias y no sustituibles entre sí, su operación coordinada garantiza la calidad de combustible que el sistema de inyección requiere.

1.6 Gestión de mantenimiento

1.6.1 Tipos de mantenimiento y aplicación al sistema de combustible

La gestión del mantenimiento de un activo industrial se puede categorizar en cuatro tipos. El primero es el mantenimiento del tipo correctivo, se ejecuta una vez ocurrida la falla, y su utilidad reside en que captura los modos de falla cuya predicción no es técnicamente viable o cuyo costo de prevención excede al de la propia intervención. Segundo se encuentra el mantenimiento preventivo, se ejecuta a intervalos programados, definidos a partir de las recomendaciones del fabricante, las horas de operación acumuladas o el calendario, y opera bajo métodos estadísticos los cuales predicen que el componente intervenido se aproxima al final de su vida útil esperada, tiene como principal inconveniente que no se posee certeza de que el componente efectivamente iba a fallar. El mantenimiento basado en condición se ejecuta cuando una variable monitoreada atraviesa un límite establecido, y permite intervenir solamente cuando existe evidencia objetiva de degradación, lo que en principio extiende la vida útil del componente y reduce el costo total de mantenimiento. El mantenimiento predictivo, finalmente, integra el monitoreo continuo con modelos de extrapolación basados en experiencia o ensayos que estiman el tiempo restante hasta la falla, y permite planificar la intervención logrando optimizar tanto la disponibilidad operacional como la logística de repuestos.

En el sistema de tratamiento del combustible diésel, debido a la complejidad y naturaleza del proceso los cuatro tipos de mantenimiento coexisten. La saturación brusca de filtros por contaminación masiva del suministro, observada en los casos descritos en el Capítulo 1, corresponde a un modo de falla cuya prevención exige actuar sobre la calidad del combustible recibido y exige reacción saliéndose de los parámetros clásicos, por lo que se gestiona como evento correctivo. El reemplazo de elementos filtrantes a intervalos definidos, las descargas programadas de lodos en purificadores y los servicios mayores con apertura del bol son intervenciones típicas de mantenimiento

preventivo, siempre y cuando se mantenga un baja variabilidad del combustible embarcado, frente a condiciones fuera de común estos procesos se salen de este tipo de mantenimiento. El monitoreo de la presión diferencial en los filtros, desarrollado en la sección 2.5.5, es un caso de mantenimiento basado en condición, en el que el cambio del elemento se gatilla por el cruce de un límite y no por el calendario. La extrapolación de las curvas de presión diferencial en el tiempo, así como el análisis de tendencias en la frecuencia de descarga de lodos, son insumos para enfoques predictivos cuya viabilidad depende de la calidad y consolidación de los registros operacionales.

La consecuencia metodológica para el presente trabajo es que el sistema de combustible reúne las condiciones técnicas para una gestión preventiva, basada en condición y predictiva. Sus modos de falla son progresivos y es posible de monitorear, sus variables clave son posibles de medir y el costo de una falla no detectada a tiempo es significativamente superior al costo del monitoreo. Esta caracterización justifica que la propuesta de mejora del sistema.

1.6.2 Indicadores de gestión y vínculo con la disponibilidad de flota

Los indicadores de gestión de mantenimiento permiten cuantificar el desempeño del programa y traducir las intervenciones técnicas en magnitudes comparables a lo largo del tiempo y entre activos. El tiempo medio entre fallas (MTBF) mide el intervalo promedio que transcurre entre eventos de falla consecutivos sobre un mismo equipo, y constituye una medida directa de la confiabilidad operacional. El tiempo medio para reparar (MTTR) mide la duración promedio de una intervención correctiva desde la detección hasta el restablecimiento del servicio, refleja la mantenibilidad del activo y la madurez logística del programa. La disponibilidad, definida como el cociente entre el tiempo en que el activo está efectivamente disponible y el tiempo total considerado, integra ambos indicadores anteriores y constituye la métrica de salida del sistema de mantenimiento para equipos reparables desde la perspectiva operacional.

Para la operación de un remolcador, la disponibilidad adquiere una jerarquía particular respecto de otros indicadores porque está directamente vinculada al cumplimiento contractual con los clientes y al costo de subcontratación de unidades de la competencia. La indisponibilidad de un remolcador propio en el momento requerido genera un costo neto del orden de 6.000 a 7.000 USD por día en operaciones portuarias, según se documentó anteriormente. Esto se traduce en que cada punto porcentual de disponibilidad sobre una flota de cientos de unidades representa un impacto significativo.

1.6.3 Mantenimiento basado en condición aplicado al sistema de tratamiento del combustible

La aplicación correcta del mantenimiento basado en condición requiere identificar las variables monitoreables, definir los límites de intervención, establecer la frecuencia y metodología de adquisición de los datos. El conjunto de variables relevantes ya ha sido desarrollado parcialmente en las secciones técnicas anteriores, pero la presente subsección lo integra desde la perspectiva de gestión de mantenimiento.

En el filtro mecánico, la presión diferencial entre entrada y salida es la variable de referencia, según se desarrolló en la sección 2.5.5. La evolución temporal de la misma variable permite distinguir entre degradación normal por acumulación gradual de partículas o degradación anómala por contaminación severa o presencia de biofilm. El registro sistemático de la presión diferencial al inicio y al cierre de cada turno de máquinas, junto con el caudal estimado de procesamiento, constituye la base de datos mínima necesaria para construir indicadores de condición confiables sobre la etapa de filtración. En el purificador centrífugo, las variables relevantes cuantitativas incluyen la temperatura de entrada, el volumen y la frecuencia de las descargas de lodos. Una desviación sostenida en cualquiera de estas variables respecto del comportamiento histórico del equipo es un indicador temprano de degradación interna o de cambio en las propiedades del combustible procesado.

A las variables monitoreadas a bordo se suma el análisis periódico del combustible mediante muestreo y ensayo en laboratorio. El código ISO 4406 obtenido sobre muestras tomadas en distintos puntos del sistema permite caracterizar la efectividad real del tratamiento y detectar derivas en el desempeño antes de que se manifiesten como fallas mecánicas en el motor. La práctica recomendada por la guía CIMAC y por las publicaciones técnicas de los fabricantes consiste en establecer puntos de muestreo en el bunker, en el tanque de servicio y en la línea de retorno del motor, lo que permite comprender el comportamiento del tren de tratamiento y mejorarlo [13] [26]. Se presenta la limitación de que el ensayo de laboratorio no es instantáneo, esto presentará un desfase temporal en los resultados retroalimentan al sistema que puede ser relevante para suministros particularmente problemáticos o impredecibles.

Una observación metodológica adicional, ya anticipada en el Capítulo 1, refuerza la necesidad de adoptar enfoques basados en condición. El estudio sobre motores generadores de drillships mostró, mediante ajuste por distribución de Weibull sobre datos operacionales reales, que la vida útil característica efectiva de los inyectores resultó ser de 1.308 horas frente a las 3.000 horas establecido por el fabricante, esto representa una reducción cercana al 56% respecto de la referencia OEM [10]. Este hallazgo demuestra que es esencial ajustar estos intervalos a partir de los datos operacionales propios de cada flota. Para una operación como la analizada en el presente trabajo, donde la calidad del combustible varía significativamente entre mercados y los ciclos de carga del motor presentan transiciones frecuentes, exige una adaptación frente al caso ideal que plantean los fabricantes.

1.6.4 Gestión de tanques de almacenamiento y servicio

Los tanques de sedimentación y servicio presentan una alta relevancia operacional para el sistema. Debido a eso, su correcta gestión presenta alta relevancia para la integridad del sistema, el agua libre acumulada en el fondo de los tanques es la condición habilitante del crecimiento microbiano y, simultáneamente, la fuente principal del agua emulsionada que el purificador centrífugo debe procesar. La práctica fundamental es

el drenaje sistemático del agua libre desde los puntos bajos de cada tanque, con frecuencia diaria o por turno según las condiciones operacionales. Esta intervención, es la primera barrera contra el desarrollo microbiano y debe ejecutarse de manera disciplinada incluso cuando no se detecte agua visible en el drenaje, ya que la ausencia de evidencia inmediata no implica ausencia de acumulación. Si bien es una de las recomendaciones fundamentales para el correcto condicionamiento del tanque, no todos los remolcadores poseen un sistema de purga, haciendo este procedimiento imposible sin una modificación en los tanques. Sumado a esto, se debiera registrar el volumen drenado, esta acción de medir actuaría como un indicador de condición del suministro y del estado del tanque acción que en la práctica tampoco se aprecia.

La limpieza periódica de los tanques (vaciado, raspado mecánico y secado de las superficies internas) constituye la segunda línea de gestión y se debe ejecutar típicamente de manera anual, aprovechando las paradas programadas o los mantenimientos mayores del remolcador. La oportunidad de este tipo de intervención es operacionalmente compleja, dado que un remolcador en servicio rara vez puede tomarse fuera de operación únicamente para limpieza de tanques, proceso que toma cerca de dos días en realizarse (referencia para los tanques de servicio), esto obliga integrar el proceso con otros mantenimientos cuya planificación define el calendario. La metodología incluye la inspección visual de las superficies internas y la verificación de la integridad de los recubrimientos protectores cuando los tanques los poseen [26].

El muestreo desde el punto más bajo del tanque permite detectar de manera temprana la presencia de biofilm y la sedimentación de fracciones pesadas antes de que estas comprometan el suministro al purificador. La frecuencia recomendada por la literatura técnica varía según la operación, y las regiones tropicales con mayor riesgo microbiano justifican frecuencias más cortas que las de operaciones en climas fríos.

La rotación del inventario en los tanques de servicio es otra práctica relevante, conectada con la estabilidad al almacenamiento. El combustible que permanece estancado por períodos prolongados en un tanque de servicio degrada progresivamente

sus propiedades por oxidación, acumula condensación de humedad atmosférica y favorece el establecimiento de poblaciones microbianas, aun cuando el suministro original cumpliera la especificación nominal. La gestión adecuada exige establecer tiempos máximos de residencia y consumir el inventario más antiguo de manera prioritaria, principio que en la práctica operacional requiere disciplina en la planificación de las cargas y operación del remolcador.

1.6.5 Trazabilidad, documentación y aprendizaje a nivel de flota

La efectividad de un programa de mantenimiento sobre un activo como una flota de remolcadores depende, de la capacidad de la organización para consolidar la información generada por cada unidad y extraerla a los departamentos de análisis relevantes. Los registros operacionales como bitácoras de máquinas, reportes de bunker, registros de cambio de filtros, descargas de lodos en purificadores. Su valor analítico, sin embargo, depende críticamente de la consistencia y correcta toma de datos por parte de los jefes de máquinas de cada unidad y de la centralización efectiva de la información.

La limitación documental presente en la empresa es un reflejo de las consecuencias de dicha falta. Los registros sistemáticos de fallas atribuibles a calidad del combustible se consolidaron recién a partir de 2024, lo que impidió reconstruir con detalle eventos previos que pudieron haber existido. Esta limitación condiciona el alcance temporal del diagnóstico y constituye un aprendizaje metodológico para la gestión futura, la trazabilidad documental es esencial para habilitar el aprendizaje a nivel de flota y la búsqueda de mejora continua. Sin registros consistentes, los patrones que un evento aislado hacen imposible comprender problemas categóricos y crónicos del sistema. Esto desencadeno en que las decisiones de inversión sobre el sistema de tratamiento del combustible deben tomarse sobre evidencia parcial buscando una solución que se proyecte a toda la flota.

El análisis de causa raíz como práctica estructurada sobre cada evento de falla relevante cumple una función complementaria importante. Además de identificar la causa

específica del evento analizado, el análisis sistemático sobre múltiples eventos permite distinguir entre causas atribuibles a una unidad específica y causas vinculadas a la calidad del suministro, al diseño del sistema de tratamiento o a las prácticas operacionales transversales. La distinción es metodológicamente relevante porque las dos categorías exigen respuestas distintas: las primeras se gestionan mediante intervenciones correctivas sobre la unidad afectada, mientras que las segundas exigen ajustes sobre el estándar operacional o sobre la configuración del sistema a nivel de flota. Los eventos documentados durante 2024 y 2025 corresponden a la segunda categoría, una distribución transversal entre países, motores y antigüedades de las unidades afectadas confirma una causa sistémica y no localizada.

La revisión de la gestión de mantenimiento permite concluir que el sistema de tratamiento de combustible reúne las condiciones técnicas para una gestión basada en condición y de carácter predictivo, dado que sus modos de falla son progresivos, sus variables clave son medibles: presión diferencial, frecuencia y volumen de descarga de lodos, código ISO 4406 sobre muestras del sistema, y el costo de una falla no detectada supera con amplitud el costo de su monitoreo. La vinculación directa entre la disponibilidad de la flota, el cumplimiento contractual y el costo de subcontratación eleva la confiabilidad del sistema de combustible a la categoría de indicador de gestión y no meramente técnico. Dos aprendizajes metodológicos cierran la sección: por una parte, los intervalos de mantenimiento del fabricante deben ajustarse a los datos operacionales reales de cada flota. Por otra, la trazabilidad documental es condición habilitante del aprendizaje en el sistema, y su consolidación tardía constituye en sí misma un hallazgo del diagnóstico. Estas consideraciones fundamentan la dimensión organizacional de la propuesta de mejora.

1.7 Metodología DMAIC y mejora continua

La aplicación de cualquier propuesta técnica sobre un activo industrial distribuido como una flota de remolcadores requiere un marco metodológico explícito que

organice el levantamiento del estado actual, el análisis de causas, el diseño y validación de soluciones y la transferencia de los resultados al estándar operacional. Las secciones anteriores del estado del arte desarrollaron los aspectos técnicos como los tipos de motores, contaminantes, purificadores, entre otros, y la dimensión organizacional como la gestión de mantenimiento del trabajo. La presente sección desarrolla el marco metodológico que articulará estas dimensiones a lo largo del trabajo, fundamentando la adopción del enfoque DMAIC y discutiendo los marcos alternativos considerados.

1.7.1 Origen y fundamentos del enfoque Six Sigma

Six Sigma vio su origen en Estados Unidos por la empresa Motorola a mediados de la década de 1980 como un programa interno orientado a reducir los defectos en sus procesos de manufactura de televisores. Hasta la fecha se medían los defectos con una muestra de mil oportunidades, el equipo se dio cuenta que con mil muestras no lograban obtener el nivel de detalle que buscaban para mejorar sus procesos, en consecuencia, decidieron aumentar su muestra a un millón de oportunidades. Con la implementación y mejora del método Six Sigma se estima que Motorola logró reducir 16 billones de dólares en pérdidas en 12 años [31].

General Electric (GE), bajo la conducción de Jack Welch, expandió y refinó la metodología durante los años noventa logrando pasar de una empresa cuatro sigma a una seis sigma estimando una reducción de pérdidas de 7 a 10 billones de dólares. El nombre del enfoque deriva de un concepto estadístico, un proceso que opera al "seis sigma" presenta una tasa de defectos del orden de 3,4 ocurrencias por millón de oportunidades, valor que corresponde a tener seis desviaciones estándar entre la media del proceso y el límite de especificación más cercano [31].

Los fundamentos conceptuales del enfoque combinan dos ideas. La primera es reconocer que todo proceso real presenta variación, y que la variación no gestionada es la causa subyacente de los defectos, reprocesos y costos imprevistos. La segunda es un compromiso con la toma de decisiones basada en datos por sobre la intuición o experiencia, lo que se traduce en la exigencia de que los proyectos de mejora se

estructuren en torno a variables medibles y a cambios validados estadísticamente [32]. De estos dos elementos derivan las dos ramas metodológicas principales del enfoque: DMAIC (Define-Measure-Analyze-Improve-Control) para la mejora de procesos existentes, y DMADV (Define-Measure-Analyze-Design-Verify) para el diseño de procesos nuevos que deben alcanzar niveles objetivo de desempeño desde su origen [31]. El presente trabajo se ubica en la primera rama, dado que el sistema de tratamiento de combustible existe en operación y el objetivo es mejorar su desempeño.

1.7.2 Las cinco fases de DMAIC

La estructura DMAIC organiza un proyecto de mejora de procesos en cinco fases secuenciales. Esta secuencialidad se debe por que, cada fase produce los insumos necesarios para las que siguen, y una fase mal cerrada compromete la validez técnica de las conclusiones del proyecto [31].

La fase Define (Definir) establece el alcance del proyecto, identifica a los actores involucrados, formula el problema en términos operacionales y define los criterios de éxito contra los que se evaluará el resultado. Las herramientas estandarizadas asociadas a esta fase incluyen el project charter, que formaliza el alcance, los objetivos, los recursos y los plazos del proyecto, y el diagrama SIPOC (Suppliers-Inputs-Process-Outputs-Customers), que esquematiza el proceso a mejorar identificando sus proveedores, entradas, salidas y clientes [32]. Se definen los KPIs con un árbol de métricas e incorpora también la captura formal de los requisitos del cliente, dimensión que en el contexto del presente trabajo se traduce en las exigencias técnicas de los fabricantes de motor como receptores del combustible tratado.

La fase Measure (Medir) establece la línea base contra la cual se evaluará el proyecto, identifica las métricas relevantes y verifica la integridad del sistema de medición que produce los datos a utilizar. Este último punto, formalizado en el Análisis del Sistema de Medición (Measurement System Analysis, MSA), es operacionalmente crítico, un sistema de medición que introduce dispersión o sesgos sistemáticos sobre las variables de interés invalida las conclusiones estadísticas posteriores [31]. La fase Measure

produce una caracterización objetiva del estado actual del proceso, que en el presente trabajo corresponde al diagnóstico de los sistemas de tratamiento existentes en la flota y al levantamiento de los eventos documentados durante 2024 y 2025.

La fase Analyze (Analizar) identifica las causas raíz de la brecha entre la línea base y el estado deseado. Las herramientas estandarizadas incluyen el diagrama Ishikawa o de causa-efecto, que organiza las causas potenciales en categorías estructuradas; los cinco porqués, que cuestionan iterativamente cada causa aparente hasta llegar a una explicación fundamental; el análisis Pareto, que identifica las pocas causas responsables de la mayor parte del impacto; y el FMEA (Failure Mode and Effects Analysis), que prioriza los modos de falla por su probabilidad de ocurrencia, severidad y detectabilidad [32]. La distinción entre causas localizadas y causas sistémicas es precisamente el tipo de distinción que las herramientas estructuradas de la fase Analyze permiten operar.

La fase Improve (Mejorar) desarrolla las propuestas de solución, las evalúa, selecciona la más adecuada y la valida mediante implementación piloto. Se aplican métodos como la Matriz de Selección, Análisis Costo Beneficio o implementación de piloto. Este último es el mecanismo de validación por excelencia de esta fase, dado que permite observar el comportamiento de la solución propuesta bajo condiciones reales antes de comprometer el despliegue extenso del cambio [31].

La fase Control (Control) consolida la mejora implementada, transfiriéndola a la operación estándar mediante procedimientos, monitoreo y capacitación. Las herramientas asociadas incluyen las cartas de control estadístico, que monitorean la variable mejorada en el tiempo y detectan desviaciones antes de que se traduzcan en fallas observables, los procedimientos operacionales estándar (SOPs), que formalizan la práctica operacional que sostiene la mejora, y los sistemas de capacitación y documentación del personal, que aseguran que el cambio persista a pesar de la rotación natural del equipo. Sin una fase Control efectiva, incluso las mejoras técnicamente

sólidas tienden a diluirse con el tiempo, y el proyecto termina sin consolidar su impacto [32].

1.7.3 DMAIC aplicado a la gestión de mantenimiento y activos

La aplicación de DMAIC a la gestión de mantenimiento industrial y de activos físicos presenta características que lo distinguen de su origen de gestión en la producción. La diferencia fundamental es que en mantenimiento el "proceso" que se mejora es el propio proceso de intervención sobre equipos físicos, donde ciclos de operación-degradación-intervención abarcan meses o hasta años, considerablemente más extensas que las de los ciclos productivos típicos [32]. Esta extensión temporal es una limitante para el presente proyecto debido a la logística natural de un proceso de Trabajo de Título. Sin embargo, tales equipos si pasarán por los periodos de tiempo adecuados, pero no se encontrará documentado en el presente archivo.

Otra limitación relevante de DMAIC es su origen en sola ubicación física y una sola estructura de gestión. Para sistemas distribuidos geográficamente, como una flota de remolcadores que opera en doce países, la implementación de la fase Control enfrenta desafíos adicionales relacionados con el contexto de cada filial, la jurisdicción de cada país y la capacidad de consolidar datos de cada ubicación. La literatura reconoce esta limitación y recomienda adaptar la fase Control mediante herramientas de estandarización que contemplen explícitamente la diversidad operacional del sistema [32].

1.7.4 Marcos comparables de mejora continua

El campo de las metodologías de mejora continua está compuesto por múltiples marcos que comparten fundamentos, pero difieren en su foco analítico, en el nivel de rigor estadístico que exigen y en el tipo de problemas para los cuales han demostrado mayor eficacia. La presente subsección revisa brevemente los más relevantes para el tipo de problema analizado en este trabajo.

El ciclo PDCA (Plan-Do-Check-Act), atribuido históricamente a Walter Shewhart y popularizado por W. Edwards Deming durante los años cincuenta, constituye el antecesor conceptual de prácticamente todos los marcos de mejora posteriores en la fecha. Su estructura de cuatro fases iterativas, planificar el cambio, ejecutarlo en escala controlada, verificar los resultados y adoptar o rechazar el cambio según la verificación, estableció el principio de que toda mejora debe ser validada experimentalmente antes de ser generalizada [32]. PDCA, sin embargo, presenta dos características que limitan su aplicación directa a proyectos complejos, no especifica herramientas analíticas estandarizadas para cada fase, y no impone un criterio estadístico, lo que deja la profundidad metodológica dependiente de la disciplina del equipo que lo aplica. El DMAIC, se han construido sobre esta base conceptual añadiendo herramientas y rigor.

Kaizen, de origen japonés, su traducción se acerca al concepto de "Cambio a mejor" y es una de las herramientas de la metodología Lean. Su premisa central es que las pequeñas mejoras cotidianas, aportadas por todo el personal operativo y acumuladas en el tiempo, generan impactos acumulativos superiores a los de los grandes proyectos de mejora ocasionales. Al ser pequeños cambio y de fácil implementación se logran realizar muchos en un corto periodo de tiempo. Kaizen destaca en entornos donde el problema a mejorar no requiere análisis técnico profundo. Su limitación para el presente trabajo es precisamente su rigor reducido para problemas que requieren análisis técnico integrado, multivariable y transversal a nivel de flota [32].

La metodología 8D (Eight Disciplines, es una estructura de resolución de problemas en ocho pasos diseñada principalmente para la respuesta rápida a incidentes específicos de calidad en cadenas de suministro. Su fortaleza es la velocidad y claridad de la respuesta inmediata frente a un incidente definido. Su limitación, en el contexto del presente trabajo, es que no está diseñada para proyectos que combinan diagnóstico, análisis técnico, diseño de soluciones y estandarización a nivel de flota durante períodos extendidos [32].

Lean Manufacturing, se enfoca en la eliminación de desperdicios (muda) a lo largo del flujo de valor. Su caja de herramientas incluye el value stream mapping, las 5S, kanban y otras técnicas orientadas a la eficiencia operacional. La integración de Lean con Six Sigma en la variante Lean Six Sigma es una práctica consolidada que aprovecha las fortalezas complementarias de ambos enfoques: Lean para la reducción de desperdicios y la fluidez operacional, Six Sigma para la reducción de variabilidad y el rigor estadístico [32]. El componente Lean es conceptualmente relevante para el presente trabajo en dimensiones como la estandarización y la disciplina operacional, pero no aporta por sí mismo la estructura analítica que el problema técnico de variabilidad de calidad del combustible requiere.

1.7.5 Justificación metodológica del uso de DMAIC en el presente trabajo

A partir de la comparación desarrollada en la subsección anterior, la selección de DMAIC como marco metodológico del presente trabajo se sostiene sobre los siguientes argumentos.

El primero tiene relación con la amplitud del proyecto. El problema del presente trabajo parte sin una línea base consolidada, transita por análisis técnico de modos de falla y comparación de alternativas, y concluye con la implementación de un piloto y la formulación de un estándar operacional transferible a la flota. Esta trayectoria completa, desde el diagnóstico hasta la estandarización, coincide con la estructura de las cinco fases de DMAIC. PDCA cubre conceptualmente el mismo arco pero sin herramientas estandarizadas; Kaizen y 8D cubren solo fragmentos del arco; Lean aborda dimensiones operacionales, pero no análisis técnico. DMAIC es la opción más completa con tal de cumplir con las necesidades del proyecto.

Segundo es la naturaleza orientada a datos de DMAIC con las variables disponibles del problema. El presente trabajo dispone, o puede construir, datos cuantitativos sobre presión diferencial de filtros, código de limpieza ISO 4406, frecuencia de descarga de

lodos en purificadores, costos de mantenimiento ejecutado, días de indisponibilidad y eventos históricos de contaminación. Cumple con el rigor cuantitativo estadístico que trabaja el DMAIC lo cual permite transformar estos datos en decisiones operacionales sustentadas sobre evidencia objetiva.

El tercero es la estructura de DMAIC la cual cuenta con entregables explícitos por fase y criterios de éxito definidos. Esta estructura es naturalmente compatible con el formato de una memoria de titulación de ingeniería, en la cual la progresión metodológica debe ser transparente para el panel evaluador y los entregables de cada etapa deben ser verificables. Los demás marcos revisados no presentan una estructura equivalente de entregables con la misma claridad que presenta el DMAIC.

El cuarto argumento, va vinculado al diseño del presente trabajo y los objetivos definidos en la primera parte del documento. Esto consolida explícitamente lo que la planificación del proyecto ya incorporaba implícitamente.

Estos cuatro argumentos conforman lo que es la justificación de utilizar la metodología DMAIC frente a otras opciones.

La revisión de las metodologías de mejora continua permite concluir que el enfoque DMAIC es el marco más adecuado para el presente trabajo. Frente al ciclo PDCA, que comparte el arco conceptual, pero carece de herramientas estandarizadas; frente a Kaizen y 8D, que abordan solo fragmentos del problema; y frente a Lean, orientado a la eficiencia operacional más que al análisis técnico de variabilidad, DMAIC ofrece la combinación de amplitud, rigor cuantitativo y estructura de entregables que el proyecto exige. Su trayectoria de cinco fases, desde la definición y medición de la línea base hasta el control del estándar implementado, coincide con la naturaleza del problema. Se reconoce, no obstante, que la aplicación de DMAIC a un sistema distribuido en múltiples países exige adaptar especialmente la fase de control mediante herramientas de estandarización que contemplen la diversidad operacional de la flota.

1.8 Marco regulatorio aplicable

El sistema de tratamiento del combustible diésel a bordo opera bajo un marco regulatorio compuesto por múltiples actores y documentación necesaria para su correcta regulación y funcionamiento. Las secciones anteriores del estado del arte desarrollaron las dimensiones técnicas (motores, combustible, contaminantes, purificación, filtración), la dimensión organizacional (gestión de mantenimiento) y la dimensión metodológica (DMAIC). La presente sección cierra el capítulo desarrollando el marco regulatorio aplicable, organizando sus niveles jerárquicos y explicitando las condiciones de borde que impone sobre el alcance y las propuestas del presente trabajo.

1.8.1 Estructura jerárquica del marco regulatorio aplicable

El marco regulatorio aplicable al combustible y al sistema de tratamiento de la flota posee una estructura jerárquica de cinco niveles. En el nivel internacional, la Organización Marítima Internacional (IMO) establece estándares ambientales obligatorios mediante el convenio MARPOL y sus anexos, particularmente Annex VI para emisiones a la atmósfera. En el nivel de estandarización técnica, la Organización Internacional de Normalización (ISO) publica normas voluntarias que la industria ha adoptado como referencia, entre las que destacan ISO 8217 para combustibles marinos, la ISO 4406 y la ISO 16889 para limpieza y rendimiento de filtración. En el nivel de certificación, las sociedades clasificadoras operan como organismos privados que verifican el cumplimiento de los buques con estándares técnicos y estatutarios, en este último caso por delegación de los estados de bandera. En el nivel nacional, cada país establece regulaciones sobre el combustible comercial y, separadamente, sobre el combustible marino, que pueden exceder o modificar los parámetros definidos en los niveles superiores. Y en el nivel contractual, los fabricantes de motor (OEM) establecen sus propias especificaciones técnicas como condición para la garantía y la vida útil esperada del motor.

1.8.2 Regulación internacional: IMO y MARPOL Annex VI

La Organización Marítima Internacional (IMO) es la agencia especializada de Naciones Unidas responsable de regular la navegación marítima internacional, con mandatos que incluyen seguridad, protección ambiental y estandarización de prácticas operacionales. En el ámbito de los combustibles marinos, el instrumento regulatorio central es MARPOL Annex VI, "Regulations for the Prevention of Air Pollution from Ships", que entró en vigor en 2005 y ha sido enmendado sucesivamente para reducir progresivamente la huella ambiental del transporte marítimo [13].

La provisión de mayor relevancia operacional de MARPOL Annex VI para el presente trabajo es el límite global de contenido de azufre en el combustible marino, reducido progresivamente desde 4,5% m/m antes de 2012, a 3,5% m/m entre 2012 y 2019, y a su valor actual de 0,5% m/m a partir del 1 de enero de 2020. Esta transición regulatoria es la que motivó la adopción sistemática de procesos de hidrotratamiento severo en las refinerías, con la consecuente reducción de la densidad promedio y la variabilidad de propiedades del combustible documentada en 1.2 [13].

Adicionalmente al límite global, MARPOL Annex VI establece zonas de control de emisiones (Emission Control Areas, ECA), áreas geográficas específicas donde aplican límites más estrictos. En las zonas ECA el contenido máximo de azufre es 0,1% m/m, considerablemente más exigente que el límite global. Las zonas ECA actualmente vigentes incluyen el Mar del Norte, el Báltico, el área norteamericana (que cubre porciones significativas de las costas atlántica y pacífica de Estados Unidos y Canadá) y el área caribeña de Estados Unidos.

Un elemento relevante de la relación entre la regulación IMO y la norma ISO 8217 desarrollada en 2.2.1 es que la regulación IMO no establece directamente especificaciones técnicas del combustible más allá del contenido de azufre y otros parámetros de emisión. Las especificaciones técnicas del combustible como producto (viscosidad, densidad, contenido de agua, partículas, lubricidad, entre otros) no están reguladas por la IMO sino por ISO 8217, que la industria ha adoptado como estándar

y que se referencia en las relaciones contractuales entre proveedores de combustible y armadores.

1.8.3 Sociedades clasificadoras y procedimientos de aprobación de modificaciones

Las sociedades clasificadoras son organismos privados que desarrollan estándares técnicos para la construcción, operación y mantenimiento de buques, y que certifican el cumplimiento de las naves con estos estándares. Históricamente su rol se originó en la industria del seguro marítimo del siglo XVIII, cuando los comerciantes requerían evaluar objetivamente la condición técnica de los buques antes de asegurar su carga. Hoy las sociedades clasificadoras de mayor relevancia en la actividad marítima internacional son miembros de la International Association of Classification Societies (IACS), entre las que figuran Lloyd's Register, DNV, American Bureau of Shipping (ABS), Bureau Veritas, RINA, ClassNK y la China Classification Society. En Latino America los remolcadores se distribuyen entre varias de estas sociedades, pero para la gran mayoría de estos buques predomina Lloyd's Register, y por eso que se adopta como referencia primaria de la regulación clasificadora aplicable a las modificaciones del sistema de tratamiento de combustible a bordo. El contenido técnico de las reglas LR relevantes para el trabajo está organizado en tres capítulos consecutivos del Part 5 de las Rules and Regulations for the Classification of Ships, edición July 2025 [33]. El Capítulo 12 establece los requisitos generales de diseño aplicables a todos los sistemas de tuberías a bordo (Pt 5, Ch 12), incluyendo especificaciones sobre materiales, accesorios y juntas. El Capítulo 13 especializa estos requisitos para el contexto de los sistemas de tuberías de un buque (Pt 5, Ch 13), incluyendo materiales aceptables, métodos de construcción y arreglos de drenaje de compartimentos. El Capítulo 14 cubre específicamente los sistemas de tuberías de maquinaria (Pt 5, Ch 14), con secciones detalladas sobre los sistemas de combustible (Sec. 2 y Sec. 4) y sobre los sistemas de control y alarma (Sec. 12).

El piloto desarrollado en el presente trabajo se ejecuta como prueba de concepto y validación técnica interna de la solución propuesta, y no transita el proceso formal de aprobación clasificadora descrito anteriormente. La certificación de la modificación ante Lloyd's Register, así como su ejecución sobre las múltiples banderas y áreas de operación de la flota, queda reconocida como fuera del alcance del trabajo debido a la naturaleza y complejidad de un Trabajo de Titulo. La descripción del procedimiento regulatorio incluida en la presente subsección tiene el propósito de contextualizar la naturaleza regulatoria del sistema de combustible como un sistema cuya modificación efectiva sobre la flota requiere aprobación clasificadora, y además, anticipar los entregables técnicos (planos modificados, especificaciones de equipo, dossier técnico) que el piloto produce y que constituyen el insumo necesario para iniciar un proceso formal de aprobación antes de decidir escalar la solución más allá del piloto. La gestión efectiva de la certificación corresponde a una fase posterior que excede el alcance del presente trabajo.

1.8.4 Regulaciones nacionales y heterogeneidad entre mercados

Cada país establece regulaciones nacionales sobre el combustible diésel comercial y, separadamente, sobre el combustible diésel marino, que pueden exceder o modificar los parámetros definidos en los niveles internacionales. Esta gran variedad regulatoria añade una fuente estructural de variabilidad a la calidad del combustible disponible en puerto, y configura escenarios operacionales reales en los que el combustible recibido por un remolcador puede exceder las especificaciones de diseño de los sistemas de tratamiento a bordo.

Para el caso de Brasil esta variedad es particularmente relevante por su extensión y gran número de remolcadores en la flota. El regulador brasileño del sector energético estableció una mezcla obligatoria de 14% de biodiésel (B14) en el diésel comercial a partir de marzo de 2024, incrementada a 15% (B15) desde agosto de 2025. Esta regulación aplica al diésel comercial para uso vial e industrial, y es independiente de la regulación del diésel marino. El diésel marino en Brasil, por marco normativo, no

debiera contener biodiésel, y su suministro debe cumplir con las especificaciones ISO 8217 correspondientes. El caso del remolcadores en Brasil, como el documentado anteriormente sugiere, sin embargo, que pueden existir contaminaciones cruzadas en la etapa de refinación o distribución, en las que biodiésel destinado al diésel comercial se incorpora parcialmente a los suministros marinos. El marco regulatorio, en este caso, no protege efectivamente la calidad del combustible suministrado, y su efecto operacional consiste en imponer al sistema de tratamiento a bordo la absorción de una contaminación que la regulación, en principio, debería haber prevenido.

El caso ecuatoriano, también desarrollado anteriormente, ilustra caso distinto. La crisis de calidad del combustible de 2024 no fue consecuencia de una regulación nacional que permitiera el suministro de combustible fuera de especificación, sino un factor externo, el cual tuvo efecto en los tiempos de sedimentación en la cadena logística nacional como respuesta al pico de demanda generado por la crisis energética del país. El marco regulatorio existía, pero su implementación efectiva se vio comprometida por un contexto coyuntural, con consecuencias operacionales técnicamente equivalentes a las de una regulación inadecuada.

Esta alta variabilidad y complejidad en la flota deja en claro que un sistema de tratamiento especificado para un mercado de alta calidad y predictibilidad de combustible, como Canadá o Chile, puede resultar rápidamente insuficiente cuando el mismo buque rota a un mercado con menor predictibilidad, como los del clúster del Caribe o Brasil. Esta consideración refuerza la necesidad de una solución estandarizada a nivel de flota, capaz de operar bajo supuestos realistas de variabilidad de suministro.

El marco regulatorio aplicable se estructura en cinco niveles jerárquicos que van desde la regulación internacional de la IMO hasta las especificaciones contractuales de los fabricantes de motor, pasando por la normalización técnica ISO, la certificación de las sociedades clasificadoras y las regulaciones nacionales. De su análisis se desprenden tres condiciones de borde que delimitan el trabajo. Primero, los límites de azufre de MARPOL Annex VI constituyen una base que el sistema de tratamiento no modifica,

sino que toma como dado al dimensionar la corrección de calidad necesaria. Segundo, toda modificación estructural sobre el sistema de combustible requiere la aprobación de la sociedad clasificadora usando a Lloyd's Register como referencia primaria de la flota, lo que confiere a los entregables del trabajo un doble carácter, técnico y de precertificación, aun cuando el proceso formal de certificación quede fuera de su alcance. Tercero, la heterogeneidad regulatoria nacional, configura una variabilidad de suministro que obliga a dimensionar el sistema por criterios de escenario exigente antes que por el promedio esperado.

2. METODOLOGÍA

El presente capítulo desarrolla la aplicación de la metodología DMAIC al sistema de purificado y filtrado de diésel dentro del remolcador. Los fundamentos conceptuales, la descripción de sus cinco fases y la justificación de su elección frente a marcos alternativos fueron establecidos en la sección anterior, por lo que este capítulo no reitera esa base teórica, en cambio profundiza sobre la herramienta y su implicancia en el presente trabajo.

El desarrollo recorre las fases Definir, Medir, Analizar, Mejorar y Controlar, donde cada fase produce los entregables que alimentan a la siguiente: Definir delimita el problema y formaliza el alcance, Medir construye la línea base y verifica el sistema de medición, Analizar identifica y valida las causas raíz, Mejorar diseña, selecciona e implementa las acciones de mejora sobre la unidad piloto, y Controlar consolida la mejora en un estándar operacional sostenible en el tiempo.

2.1 Fase Definir

La fase Definir tiene por objeto delimitar el problema, formalizar el alcance del proyecto, identificar a los actores involucrados y capturar los requisitos que el resultado debe satisfacer. Para ello se aplicaron cinco herramientas complementarias: el análisis 5W-2H para la definición estructurada del problema, el Project Charter para la formalización del alcance, los objetivos y los plazos, el diagrama SIPOC para el mapeo del proceso, la voz del cliente para la captura de los requerimientos críticos y el análisis de interesados para el mapeo de los actores y su disposición frente al proyecto.

2.1.1 Definición del problema (5W-2H)

El análisis 5W-2H organiza la definición del problema en torno a un conjunto de preguntas que acotan su naturaleza, su localización, su mecanismo, su magnitud y su relevancia [31]. Su aplicación al problema de contaminación del combustible de la flota

se resume en la Tabla 3 presente en el anexo, y de ella se desprende que la falla no es un evento puntual sino un desgaste progresivo, y cuyo origen no reside en el motor sino en la incapacidad de la línea de purificado y filtrado para acondicionar el combustible a los parámetros que exige la tecnología common rail.

De la herramienta se desprende el siguiente enunciado del problema:

El ingreso de combustible contaminado a los motores ha afectado la disponibilidad de la flota, desviando el presupuesto de mantenimiento planificado para los remolcadores y generando un elevado gasto por mantenimiento correctivo en los equipos. La línea de purificado y filtrado de diésel no logra acondicionar el combustible según los estándares requeridos por estos motores, lo que causa un desgaste prematuro en las bombas de alta presión y los inyectores.

Esta situación afecta a todos los motores de cada remolcador, provocando un desgaste progresivo que, en el peor de los casos, podría derivar en una falla catastrófica. Se han registrado 6 eventos críticos en los últimos dos años: en 2024 se alcanzaron desviaciones superiores al 200% en relación al mantenimiento planificado por remolcador, además de altos índices de indisponibilidad y pérdidas que superan los 2 millones de dólares anuales para la empresa. Actualmente, no se posee certeza sobre la calidad del combustible que está ingresando a los motores, los parámetros técnicos exigidos, ni las condiciones bajo las cuales se están realizando los mantenimientos.

2.1.2 Project Charter

El Project Charter formaliza el proyecto consolidando en un único documento el enunciado de la oportunidad, el caso de negocio, el alcance, los objetivos, el equipo de trabajo y el plan de ejecución, según se describió en el capítulo anterior. El charter del proyecto se presenta en la Tabla 4 presente en el anexo, y sus elementos se desarrollan a continuación.

El caso de negocio reconoce que el ingreso de combustible contaminado al sistema de inyección de los motores principales y auxiliares comprometió simultáneamente tres

dimensiones del activo durante 2024–2025: la disponibilidad operacional de la flota, la ejecución del presupuesto de mantenimiento preventivo y el costo total del ciclo de vida de los motores afectados. La causa estructural se ubica en la línea de purificado y filtrado de diésel a bordo, que no acondiciona el combustible recibido en puerto a los estándares exigidos por las tecnologías common rail modernas, y se agrava por la ausencia de una línea base consolidada sobre la calidad del combustible que efectivamente alcanza los motores. El alcance del proyecto comprende el sistema de combustible diésel a bordo desde su ingreso al remolcador hasta los inyectores, incluyendo el tanque de sedimentación, el purificador centrífugo, el tanque de servicio y la filtración primaria y secundaria, con cobertura sobre los doce países de operación de la Compañía. Quedan fuera los demás sistemas de fluidos del remolcador y los procesos de refinación, distribución y almacenamiento previos al punto de abastecimiento, que se asumen como no controlables. El charter recoge el objetivo general y los cuatro objetivos específicos definidos en la sección de objetivos, orientados a diagnosticar el estado actual del sistema, estandarizar la operación, configuración y mantenimiento de los purificadores, implementar las mejoras sobre una unidad piloto incorporando una nueva tecnología en el tren de filtrado y validar técnicamente los resultados. El equipo se estructura en torno a un patrocinador, siendo el Ingeniero Senior de Planes de Mantenimiento y al autor como líder, ejecutor e historiador del proyecto, y el plan de ejecución distribuye las cinco fases entre marzo y agosto de 2026: Definir entre marzo y abril, Medir entre abril y mayo, Analizar entre mayo y junio, Mejorar entre junio y julio, y Controlar entre julio y agosto.

2.1.3 Mapa del proceso: diagrama SIPOC y cadena de tratamiento

El diagrama SIPOC ofrece una vista de alto nivel del proceso identificando sus proveedores, entradas, salidas y clientes, lo que permite delimitar las fronteras del sistema bajo estudio. El SIPOC del sistema de tratamiento del combustible se presenta en la Tabla 5 presente en el anexo y reconoce dos flujos de proveedor y entrada. El

primero corresponde a los superintendentes técnicos como proveedores del mantenimiento de los equipos, cuya entrada es la correcta ejecución de dicho mantenimiento. El segundo corresponde a los proveedores de combustible, cuya entrada es el diésel destilado MDO o MGO, que debe cumplir un mínimo de especificaciones definido por la compra o por la regulación aplicable. El proceso es la cadena de tratamiento a bordo, compuesta por el tanque general, el purificador centrífugo, el tanque de servicio y las etapas de filtración primaria y secundaria interna al motor. Las salidas del proceso son:

- la calidad del combustible que ingresa al motor, donde CAT y MTU especifica los requisitos antes del filtro primario y los clientes son, los motores principales y generadores.
- Frecuencia de eventos catastróficos por combustible contaminado, donde se busca minimizar a 0 o 1 al año con cliente las filiales y el equipo de ingeniería.
- Desviación del presupuesto de mantenimiento, donde se busca un margen de máximo 20% de lo planificado para componentes de filtrado diésel, teniendo como cliente las filiales de la empresa.
- Disponibilidad operacional, buscando minimizarlo, meta para 2030 alcanzar un 1% de indisponibilidad por todo tipo de fallas. El cliente son las filiales y el equipo de ingeniería.

El SIPOC deja explícito que el motor es el cliente último del sistema y que su especificación OEM constituye el requisito de salida que el proceso debe satisfacer, brecha que anteriormente se caracterizó en detalle.

2.1.4 Voz del cliente (VOC) y requerimientos críticos

La voz del cliente traduce las necesidades expresadas por los clientes del proceso en requerimientos críticos verificables. El levantamiento, presentado en la Tabla 6 adjunta en anexo, se realizó sobre los dos clientes internos del sistema. El primer cliente son los motores, cuya voz expresa la necesidad de recibir diésel en condiciones; el problema declarado es que el diésel no llega en condiciones, y el requerimiento crítico

asociado es el cumplimiento de las especificaciones de limpieza del combustible, que según las secciones 1.2 y 1.5 corresponde a los códigos ISO 4406 y a los límites de agua establecidos por cada OEM. El segundo cliente son los purificadores y filtros, cuya voz en poseer una correcta operación, mantenimiento y configuración para su correcto funcionamiento. El problema declarado es que la contaminación del combustible ha provocado la falla de componentes del motor, y el requerimiento crítico es que ingrese diésel en las condiciones correctas y que existan planes de control sobre el sistema. Ambos requerimientos críticos convergen en una misma exigencia técnica y medible: Que el combustible tratado cumpla la especificación de limpieza del motor y para ello se requiere comprender las entradas a los equipos encargados de ello dentro del remolcador.

2.1.5 Análisis de interesados

El análisis de interesados identifica a los actores con influencia sobre el proyecto y mapea su posición actual y deseada en una escala que va desde firmemente en contra hasta firmemente a favor, lo que permite anticipar resistencias y focalizar la gestión del cambio [32]. El mapa de interesados del proyecto se presenta en la Tabla 7 anexada y abarca a los actores de la estructura corporativa y de las filiales: la Gerencia de Flota & Supply Chain y la Subgerencia de Ingeniería a nivel corporativo, el Ingeniero Senior de Planes de Mantenimiento como patrocinador, y los responsables de mantenimiento y técnicos de las filiales del Caribe, Uruguay, Chile-Perú, Brasil, Canadá, Ecuador y México, incluyendo gerencias de mantenimiento, direcciones técnicas, superintendencias e inspección de calidad. El proyecto cuenta con un patrocinio corporativo firme y un apoyo transversal. Algunos actores se ubican en una posición neutral o moderada en el estado actual, y la gestión del cambio busca llevarlos a un apoyo firme como estado deseado. La amplitud y transversalidad de este respaldo entre todos los clústeres de operación refuerza la idea de ser un problema transversal.

El análisis 5W-2H y el Project Charter establecieron que el desgaste prematuro de las bombas de alta presión y los inyectores no obedece a fallas localizadas de

mantenimiento, sino a la incapacidad de la línea de purificado y filtrado para acondicionar el combustible a los estándares que exige la tecnología common rail, con un impacto económico muy relevante. El diagrama SIPOC y la voz del cliente convergen en la conclusión central de la fase: El motor es el cliente final del sistema y su requerimiento crítico es único y medible. El combustible tratado cumplir con la especificación de limpieza establecida por el fabricante, lo que aporta un criterio objetivo de éxito para las etapas siguientes. El análisis de interesados confirma, además, que el problema es percibido de manera transversal en la flota de remolcadores y que el proyecto dispone del respaldo necesario para su ejecución. Por último, la fase deja en evidencia que la ausencia de una línea base cuantitativa sobre la calidad del combustible que efectivamente alcanza los motores constituye, en sí misma, parte del problema, lo que define con precisión el objeto de la fase Medir: Construir dicha línea base y verificar el sistema de medición que la sustenta.

2.2 Fase Medir

La fase Medir construye la línea base cuantitativa sobre la cual se evaluará el proyecto, identifica las métricas relevantes y verifica la integridad del sistema de medición que las produce. Para ello se aplicaron seis herramientas: la identificación y cuantificación de los desperdicios asociados al problema, la matriz de impacto y esfuerzo para su priorización, el árbol de métricas para estructurar las variables de medición, el plan de medición junto con la campaña de muestreo del combustible, la formulación de metas bajo el criterio SMART y la caracterización estadística de la línea base.

2.2.1 Identificación y cuantificación de desperdicios

La identificación de desperdicios cuantifica el costo anual asociado a cada uno. El levantamiento, presentado en la Tabla 8 presente en el anexo, identificó ocho desperdicios con un costo anual estimado conjunto del orden de 2,1 millones de USD. Los de mayor magnitud corresponden a los eventos catastróficos con overhaul de

motor, estimados en 700.000 USD anuales por uno a dos eventos al año, y a la indisponibilidad por falla, del orden de 600.000 USD anuales por la subcontratación de remolcadores de la competencia durante períodos de entre quince y noventa días por evento. A estos se suman el sobreconsumo de filtros internos y primarios por frecuencias de cambio entre cuatro y siete veces superiores a las esperadas, el capital inmovilizado en juegos completos de inyectores de repuesto mantenidos por tipo de motor, la desviación del costo de mantenimiento correctivo y la pérdida de eficiencia asociada a purificadores mal configurados. La inexistencia de un plan de mantenimiento para algunos equipos en la plataforma corporativa de gestión del mantenimiento, que impide establecer una relación entre el estado del equipo con los eventos posteriores de contaminación, y la falta de verificación del disco de gravedad en los purificadores, que ningún remolcador había confirmado y cuya consecuencia directa es una eficiencia de separación desconocida o reducida respecto del valor esperado del equipo. Esto alcanza una pérdida estimada de 2.102.000 USD al año en desperdicios relevantes para el proyecto.

2.2.2 Matriz de impacto y esfuerzo

La matriz de impacto y esfuerzo prioriza los desperdicios identificados ponderando, por una parte, su impacto sobre la seguridad, el cliente, el negocio y otras áreas, y por otra, el esfuerzo de intervención en términos de tiempo de implementación, resistencia al cambio, costo de implementación y costo de operación. El resultado, presentado en la Tabla 9 adjunta en el anexo, permite distinguir las intervenciones de alto impacto y bajo esfuerzo de aquellas que, siendo críticas, exigen un esfuerzo mayor. Los eventos catastróficos y la indisponibilidad por falla concentran el mayor impacto, con ponderaciones de 4,5 y 4,25 respectivamente, pero corresponden a resultados del problema más que a causas directamente intervenibles, y su esfuerzo de mitigación es elevado. En contraste, la configuración incorrecta de los purificadores y la ausencia de un plan de mantenimiento de estos combinan un impacto alto, de 3,75 y 3,5, con el menor esfuerzo de intervención del conjunto, de 1,75 y 2, lo que los sitúa como las acciones prioritarias del proyecto. Esta priorización es coherente con los objetivos del

trabajo y orienta la fase Mejorar hacia la estandarización de la configuración y el mantenimiento de los purificadores como punto de entrada de mayor retorno. Con ello se logra la siguiente figura:

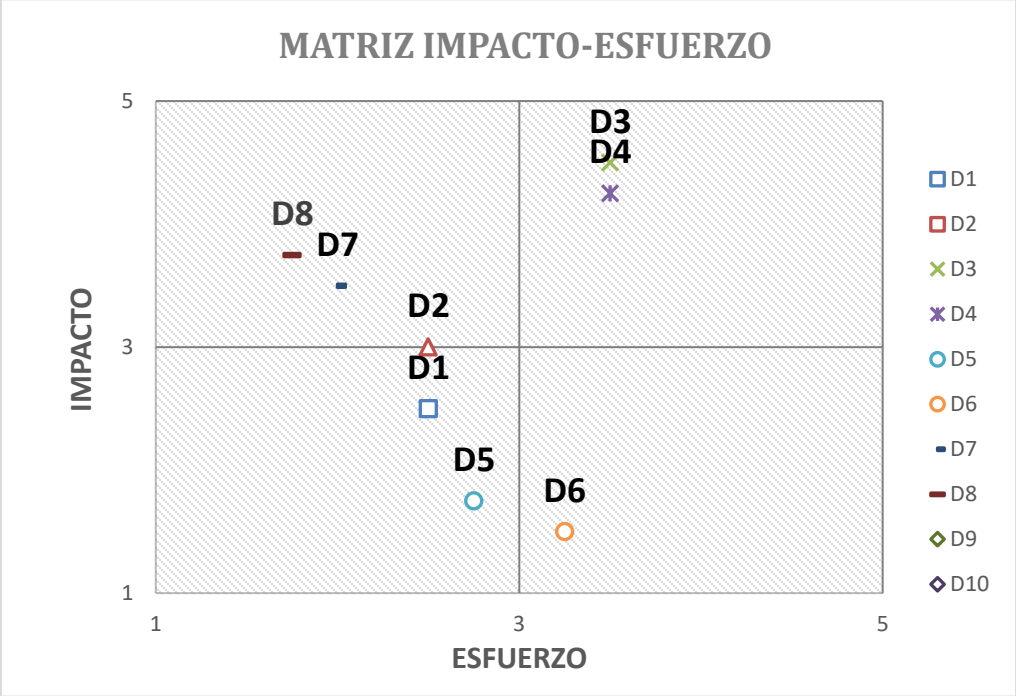


Ilustración 5: Grafico de Impacto esfuerzo. Fuente: Victor Frederico, creado con información levantada de la empresa afiliada a la memoria, Planilla DMAIC facilitada por profesor Nelson Álvarez Campillay.

Con ello se define como acciones prioritarias D7: Mantenimiento desconocido a los purificadores de la flota sin plan en la plataforma de gestión del mantenimiento y D8: Purificadores mal configurados. Como desperdicios relevantes de gran impacto y esfuerzo se encuentran D3: Eventos catastróficos con overhaul de motor y D4: Indisponibilidad por Falla.

Como QuickWins del proyecto se definen D1: Cambio de filtros primarios cada 160 horas de operación en unidades afectadas por contaminación severa y D2: Cambio de filtros internos cada 160 horas de operación en unidades afectadas por contaminación severa. Sale del enfoque los desperdicios 5 y 6 al ser de bajo impacto y alto esfuerzo.

2.2.3 Árbol de métricas

El árbol de métricas estructura las variables de medición descomponiendo dos métricas principales en sus métricas base y en los factores de influencia que las explican. La primera métrica principal es el costo anual de los problemas por contaminación del combustible, que se descompone en el costo de mantenimiento correctivo de los motores y en el gasto anual por consumibles del sistema. La segunda es la indisponibilidad de los remolcadores por combustible contaminado, que se descompone en los días fuera de servicio por eventos y en el correcto mantenimiento y operación de los equipos. El árbol, presentado en la Ilustración 6: Árbol de métricas para el proyecto., indica que los factores de mayor importancia para explicar ambas métricas: Para el conteo de partículas en el diésel, su contenido de agua y la correcta configuración de los equipos no existen actualmente como dato medido, mientras que los factores ya disponibles, como la frecuencia de cambio de filtros existe, pero son acotados. Esto confirma cuantitativamente la complejidad en la fase al presentarse información limitada en la actualidad y define la prioridad del plan de medición con fin de instrumentar precisamente aquellas variables de alta importancia que hoy no se miden.

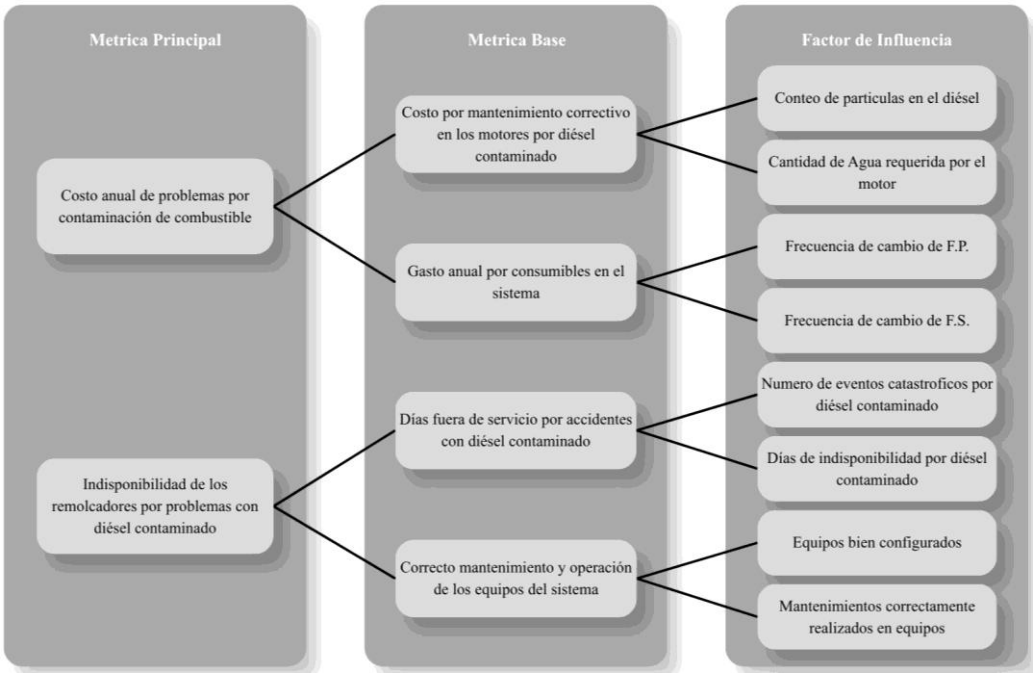


Ilustración 6: Árbol de métricas para el proyecto. Fuente: Victor Frederico, creado con información levantada de la empresa afiliada a la memoria, Planilla DMAIC facilitada por profesor Nelson Álvarez Campillay.

2.2.4 Plan de medición

El plan de medición, presentado en la Tabla 10: Plan de medición del proyecto., define para cada métrica su definición operativa, su naturaleza como variable de entrada o de salida, su fuente, el tamaño de muestra, el responsable de su captura, la forma de presentación de los datos y el método de análisis del sistema de medición. Las métricas de salida que caracterizan la calidad del combustible son: el conteo de partículas en el diésel y la cantidad de agua., ambas se obtienen mediante muestreo enviado a laboratorio, tomado en la línea de succión entre el tanque de servicio y los filtros primarios del remolcador piloto, antes y después de implementada la mejora y procesado en el mismo laboratorio para asegurar la comparabilidad. Ambas se contrastan contra los límites de especificación de cada fabricante mediante gráficos de control de Shewhart. Las frecuencias de cambio de los filtros primario e interno se obtienen de las bitácoras de los jefes de máquinas y se analizan mediante gráficos I-

MR; el número de eventos catastróficos y los días de indisponibilidad provienen del centro de gestión de operaciones y mantenimiento y se presentan mediante diagrama de Pareto y run chart. Finalmente, las dos variables de entrada del sistema: el porcentaje de purificadores correctamente configurados, que verifica la cantidad de discos y la selección del disco de gravedad, y el porcentaje de equipos con el plan de mantenimiento correctamente cargado, se controlan mediante gráficos P. El diseño detallado de los puntos de muestreo y la ejecución de la campaña se desarrollan en el Capítulo 3.

2.2.5 Formulación de metas (SMART)

La meta del proyecto se formuló bajo el criterio SMART, presentado en la Tabla 11: Formulación de metas SMART. El proyecto busca entregar combustible dentro de las especificaciones requeridas por el fabricante del motor, resultado que se verifica midiendo la calidad del diésel mediante muestreo, el período de cambio de los filtros y el porcentaje de equipos correctamente mantenidos y configurados. La meta es relevante porque incide directamente sobre la indisponibilidad del remolcador y sobre el gasto excesivo en consumibles como filtros e inyectores, y se plantea con una temporalidad doble: una mejora inmediata al aplicar las intervenciones y una confirmación de su efectividad mediante un análisis a los primeros años de operación. Esta formulación traduce el requerimiento crítico capturado en la fase Definir en un objetivo medible y acotado en el tiempo.

La fase Medir es encarga de recibir las variables mencionadas y definidas de la etapa anterior y transformarlas en cifras medibles. Se cuantificaron los desperdicios en torno a 2,1 millones de USD anuales el costo conjunto de las pérdidas asociadas a la contaminación del combustible, y la matriz de impacto y esfuerzo permitió priorizar la configuración incorrecta de los purificadores y la ausencia de un plan de mantenimiento de los mismos se identificaron como los puntos de intervención de mayor impacto y menor esfuerzo, orientando el foco del proyecto, seguido de un énfasis en mejorar la disponibilidad de los equipos y reducir la cantidad de fallas catastróficas a largo plazo.

El árbol de métricas expuso los factores de mayor importancia para explicar el problema, siendo el conteo de partículas en el diésel, su contenido de agua y la correcta configuración de los equipos, los cuales no existen actualmente como dato medido. Sobre esta base, el plan de medición definió las variables de entrada y de salida, sus definiciones operativas, sus fuentes y el análisis del sistema de medición que garantiza la validez de los datos. Por último, la formulación SMART tradujo el requerimiento crítico del motor en una meta medible y en un horizonte de tiempo. Con ello la fase Medir entrega los insumos necesarios para la fase Analizar, cuyo objeto es identificar y validar las causas raíz que explican la brecha entre la calidad del combustible recibido y la que exige el motor.

2.3 Fase Analizar

La fase Analizar identifica y valida las causas raíz que explican la brecha entre la calidad del combustible recibido y la que exige el motor, aspectos mencionados anteriormente. Se aplicaron cuatro herramientas analíticas de manera convergente: el diagrama de Ishikawa, el análisis de los cinco porqués, la matriz de causa y efecto, y el análisis de modos de falla y efectos, cuyos resultados se sintetizan en un listado de causas raíz validadas que constituye el insumo directo de la fase Mejorar.

2.3.1 Diagrama de Ishikawa

El diagrama de Ishikawa organiza las causas potenciales del problema en torno a sus principales ramas, presentado en la Ilustración 7. El análisis agrupa las causas en seis familias, siendo:

- La primera corresponde a mano de obra y abarca la operación incorrecta del purificador, la limpieza incorrecta del equipo y un excedente de tareas correctivas para los jefes de máquinas.
- La segunda corresponde a máquinas y agrupa mala configuración del equipo, filtraje incorrectamente seleccionado y mantenimientos incorrectos.

- La tercera es medio ambiente donde se encuentra el clima tropical que incentiva la creación de bacterias en los tanques, la rotación de remolcadores en la flota a distintos países, sacándolos del diésel para el cual fueron configurados, y eventos de dios, haciendo referencias a sequias, terremotos, tsunamis, entre otros.
- La cuarta agrupa el material, como suministro diésel fuera de especificación, excedente de contaminantes alcanza la etapa y filtros con incorrecto micraje.
- La quinta se refiere al método de realizar los procedimiento, No existe un estándar de limpieza de los equipos, la ausencia de estándar para cambiar el filtro y largos periodos de almacenamiento de diésel.
- El ultimo se refiere a la medición, refiere a la ausencia de muestreo en el diésel, la falta de un registro virtual y unificado tanto para el cambio de los filtros como para el purificador.

El diagrama evidencia que el problema no obedece a una causa única, sino a la concurrencia de factores de configuración, procedimiento, mantenimiento, suministro y medición.

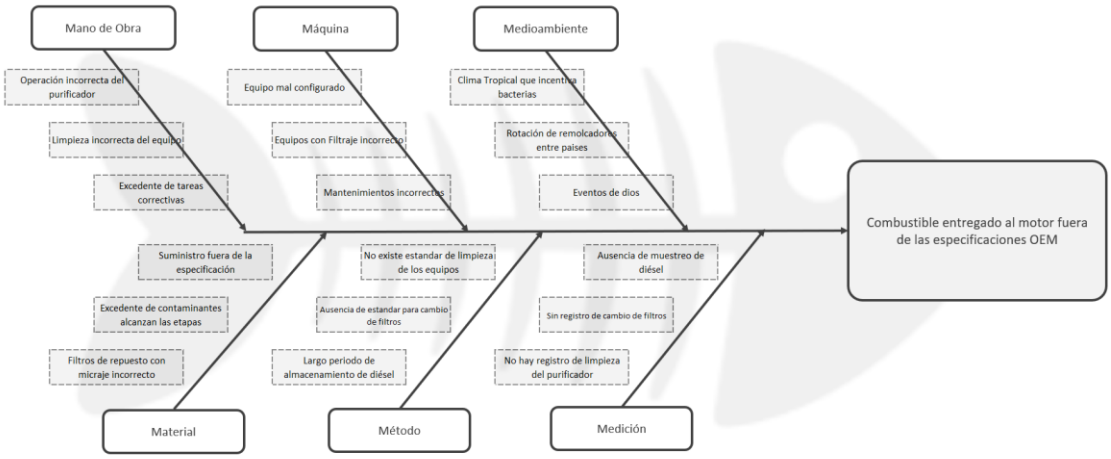


Ilustración 7: Diagrama de causa y efecto – ISHIKAWA. Fuente: Victor Frederico, creado con información levantada de la empresa afiliada a la memoria, Planilla DMAIC facilitada por profesor Nelson Álvarez Campillay.

2.3.2 Análisis de los cinco porqués

El análisis de los cinco porqués profundiza de forma iterativa desde la indisponibilidad del remolcador hasta sus causas fundamentales, presentado en la Tabla 12. Esto lleva la indisponibilidad del remolcador como causa directa al origen del problema, llegando a las siguientes afirmaciones:

- Se heredaron procedimientos de otras gestiones las cuales llevaron a una falta de estandarización de procesos de mantenimiento y operación del purificador. Esto llevo a que un equipo pueda tener hasta 41 tereas diferentes distribuidas entre las filiales. Logrando una alta tasa de mantenimientos incorrectos para el purificador.
- No existe un estándar de control o filtros aceptables por tipo de motor a comprar e instalar.
- No se posee un procedimiento de verificación para la configuración del purificador, esto lleva a que el equipo posea la misma configuración que a la fecha que se compró, hace 10 o 20 años en algunos casos. Esto sumado al cambio de propiedades en el diésel en los años lleva a que los equipos se encuentren mal configurados.
- No existe una tarea de muestreo periódico, haciendo que no se posea un registro de calidad de diésel enviado a los motores, afectando la trazabilidad y comprensión de causas raíz de los accidentes en los años. Además, fuerza la toma de decisiones sesgadas.
- La cantidad de contaminantes excede el diseño de los equipos, estos en muchos casos son eventos de fuerza mayor donde no se puede adquirir otro diésel, forzando que el sistema funcione fuera de los parámetros para los cuales fueron diseñados.

Todas las cadenas fueron confirmadas como causas efectivas, lo que orienta la priorización de ellas.

2.3.3 Matriz de causa y efecto

La matriz de causa y efecto prioriza las variables del proceso según su correlación con las salidas críticas del sistema, ponderadas por su importancia: la frecuencia de eventos catastróficos (10), la calidad del combustible que ingresa al motor (9), la disponibilidad operacional (9) y la desviación del presupuesto de mantenimiento (7). El resultado, presentado en la Tabla 13, prioriza entre ocho variables del proceso. Las de mayor puntuación son el excedente de contaminantes en las etapa para el proceso de filtrado primario (287), El equipo mal configurado para la etapa del purificador (247), Mantenimiento incorrecto para el purificador (233) y equipo con filtraje incorrecto para el proceso de filtrado primario (205). Esta jerarquía es relevante: la variable de mayor puntuación refleja la condición externa de calidad variable del suministro que el sistema debe absorber, mientras que las tres variables controlables que le siguen corresponden a configuración, mantenimiento y rating del filtro, estas coinciden con el foco de intervención del proyecto, dándole un valor con tal de confirmar la prioridad ya anticipada por la matriz de impacto y esfuerzo de la fase Medir.

2.3.4 Análisis de modos de falla y efectos (AMFE)

El AMFE evalúa los modos de falla a lo largo de toda la cadena del combustible, desde el tanque general de almacenamiento hasta los inyectores, ponderando la severidad, la ocurrencia y la detectabilidad de cada uno en un número de prioridad de riesgo (NPR), y se presenta en la Tabla 14. Los modos de mayor riesgo corresponden a un excedente de contaminantes que alcanza el filtro primario (NPR 576) y el filtro secundario (NPR 567), la configuración incorrecta del purificador (NPR 567) y la selección inadecuada del filtro primario por micraje (NPR 504). Los cuatro modos de mayor riesgo comparten una detectabilidad de 9, porque no existe un control de la calidad del diésel, ni un período definido de cambio de filtros, ni un procedimiento para verificar la configuración del purificador, lo que vuelve estas fallas prácticamente indetectables hasta que se manifiestan. Para los componentes mecánicos posteriores, las bombas de baja y alta presión y los inyectores alcanzan severidades altas (9) pero NPR bajos (126

y 90), ya que cuentan con alarmas integradas y, en algunos motores, con sistemas predictivos que les otorgan una detectabilidad de 2. Esto indica que el riesgo no se concentra donde el daño es más severo, sino donde la detección es más débil, de modo que la palanca más efectiva para reducirlo es el monitoreo y la estandarización de las etapas de tratamiento, confirmando la necesidad de tener un enfoque en los sectores de purificado y filtrado del sistema.

2.3.5 Listado de causas raíz validadas

La convergencia de las cuatro herramientas anteriores permite consolidar cinco causas raíz validadas del problema, presentadas en la Tabla 15, a esto se le suma una verificación en terreno junto a los superintendentes técnicos. Se obtienen las siguientes causas raíz validadas:

1. La primera es la configuración incorrecta del purificador, que reduce la eficiencia de separación y permite que agua y sólidos pasen al tanque de servicio, con riesgo de ruptura del sello de agua: aparece en el Ishikawa y los cinco porqués, y obtiene el segundo puntaje más alto tanto en la matriz de causa y efecto (247) como en el AMFE (NPR 567).
2. La segunda es la ausencia de un plan estandarizado de mantenimiento y monitoreo del purificador, que provoca pérdida de eficiencia por acumulación de lodos y degradación de componentes, impide correlacionar el estado del equipo con los eventos y favorece la pérdida de conocimiento por la rotación del personal: se respalda en el Ishikawa y en la matriz de causa y efecto (233).
3. La tercera es la ausencia de monitoreo y verificación del diésel a bordo, que mantiene el desconocimiento sobre la calidad del combustible que alcanza el motor, impide adoptar acciones predictivas y sesga la toma de decisiones por falta de evidencia: se confirma en el árbol de métricas, donde el conteo de partículas y el contenido de agua no existen hoy como dato medido.
4. La cuarta es la selección inadecuada de los filtros por la falta de criterios definidos, que admite micrajes incorrectos o repuestos "iguales al OEM" sin

equivalencia de rating, dejando pasar partículas al sistema: se sustenta en el Ishikawa, la matriz de causa y efecto (205) y el AMFE (504).

5. La quinta es el excedente de contaminantes que alcanza el filtro primario, que degrada su eficiencia de filtrado y de separación de agua y daña los componentes posteriores: obtiene el puntaje más alto tanto en la matriz de causa y efecto (287) como en el AMFE (576).

Cada una de estas causas raíz constituye el punto de partida de una acción de mejora desarrollada en la fase siguiente, entre las que destaca, para la quinta causa, la integración de un sistema de prefiltros que reduzca la carga de contaminantes que llega al filtro primario.

La fase Analizar identifica y valida las causas raíz del problema mediante la convergencia de cuatro herramientas que, aplicadas de manera independiente, apuntan al mismo conjunto de causas. El diagrama de Ishikawa organizó el espacio de causas potenciales, los cinco porqués profundizaron hasta su origen, la matriz de causa y efecto las organiza según su correlación con las salidas críticas y el AMFE las priorizó por su riesgo, entregando una validación de ello. De este análisis se desprenden cinco causas raíz validadas, concentradas en la configuración y el mantenimiento del purificador, la ausencia de verificación de la calidad del diésel, la selección inadecuada de los filtros y el excedente de contaminantes que alcanza el filtrado. Un hallazgo transversal indica que los modos de falla de mayor riesgo deben su prioridad no a la severidad del daño, sino a la ausencia de detección, no se posee un control de calidad, ni procedimientos y ni monitoreo, lo que identifica la medición y la estandarización como la palanca central de la solución. Estas cinco causas raíz, junto con sus ideas de mejora asociadas, constituyen la entrada de la fase Mejorar, donde se desarrollan, evalúan y seleccionan las acciones de mejora.

2.4 Fase Mejorar

La fase Mejorar desarrolla, evalúa, selecciona y planifica la implementación de las acciones que dan respuesta a las causas raíz validadas en la fase Analizar.

2.4.1 Definición de las acciones de mejora

Con las causas raíz validadas es posible definir las acciones de mejora para combatirlas. En la Tabla 16 (Adjunta en anexo) se puede apreciar las soluciones a implementar, las cuales se estructuran en dos frentes: por una parte, la correcta configuración y selección del sistema de tratamiento, complementada para los escenarios de contaminación extrema con la incorporación de una nueva tecnología en el tren de filtrado, y por otra, una dimensión de control que sostiene el desempeño del sistema en el tiempo y permite detectar los cambios bruscos provocados por eventos externos. La fase define primero las acciones de mejora, selecciona luego la tecnología de filtrado mediante una matriz de decisión y, finalmente, planifica la implementación sobre el remolcador piloto.

2.4.2 Evaluación y selección de alternativas: matriz de decisión

La selección de la tecnología de pre filtrado se realizó mediante una matriz de decisión que pondera cada alternativa frente a un conjunto de criterios con peso asignado, entregando una base contable para la elección final, presentada en la Tabla 17, adjunta en anexo. Los criterios y sus pesos fueron:

- la eficiencia de remoción de contaminantes (10)
- la mantenibilidad y disponibilidad de repuestos (9)
- el costo de inversión (8)
- la complejidad de instalación (7)
- la compatibilidad con el caudal requerido (3)

Sobre esta base se evaluaron cuatro alternativas: un prefiltro hidro ciclónico, un prefiltro de tipo sistema de pulido, un filtro primario de mayor capacidad y un purificador más eficaz.

El prefiltro hidro ciclónico obtuvo el mayor puntaje ponderado (291), seguido del sistema de pulido (248), el filtro primario de mayor capacidad (217) y el purificador más eficaz (200). El resultado revela que el prefiltro hidro ciclónico no prevalece por ofrecer la mayor eficiencia de remoción, sino por su equilibrio entre los criterios, con una alta mantenibilidad y un costo y una complejidad de instalación moderados. Un purificador más eficaz, pese a su elevada eficiencia, queda penalizado por su alto costo, su complejidad de instalación y su menor mantenibilidad, lo que refleja la importancia de una solución no solo eficaz, sino sostenible e implementable a nivel de flota. En consecuencia, el prefiltro hidro ciclónico se selecciona como la tecnología a validar en el piloto.

2.4.3 Plan de implementación del piloto

El plan de implementación organiza la ejecución de las acciones de mejora sobre el remolcador piloto mediante una estructura 5W-2H, presentada en la Tabla 18 adjunta en anexo. La secuencia comienza con la selección y el diagnóstico inicial del remolcador piloto, que establece la línea base y la toma de la muestra inicial de combustible. Continúa, con la verificación y corrección de la configuración del purificador y con la instalación del prefiltro hidro ciclónico antes del filtro primario. Durante el proceso se incorpora la aplicación del instructivo de muestreo, con análisis de laboratorio antes y después de las intervenciones, la estandarización de la selección de filtros y del plan de mantenimiento, y la definición del plan de control y seguimiento.

El plan se ejecuta entre junio y agosto de 2026, con un costo estimado de 12.000 USD, de los cuales 8.800 corresponden al prefiltro y su instalación y 3.200 al muestreo y los análisis de laboratorio, y queda bajo la responsabilidad del autor, con el apoyo del jefe de máquinas y del equipo técnico de la operación.

La fase Mejorar traduce las causas raíz validadas en un conjunto coherente de acciones de mejora, las cuales se organizan en dos frentes complementarios: la correcta configuración, selección y mantenimiento del sistema de tratamiento, y la incorporación de una nueva tecnología de pre filtrado para los escenarios de mayor

carga de contaminantes. La selección de esa tecnología se resolvió mediante una matriz de decisión que, pondero la eficiencia de remoción, la mantenibilidad, el costo, la complejidad de instalación y la compatibilidad con el caudal. Se identificó el prefiltro hidro ciclónico como la alternativa de mayor puntaje. Finalmente, el plan de implementación organizó la ejecución de estas acciones sobre el remolcador piloto bajo una estructura 5W-2H, con un costo estimado de 12.000 USD y un horizonte acotado entre junio y agosto de 2026. Con las acciones definidas, la tecnología seleccionada y la implementación planificada, la fase Mejorar entrega los insumos para la fase Controlar, cuyo objeto es consolidar la mejora en un estándar operacional sostenible y transferible a la flota.

2.5 Fase Controlar

La fase Controlar consolida la mejora en un estándar operacional y establece el monitoreo que asegura que los resultados se mantengan en el tiempo. Esta fase responde a los modos de falla de mayor riesgo debido a su prioridad a la ausencia de detección, de modo que formaliza el monitoreo y lo estandariza constituyendo el núcleo de la solución. La fase comprende el plan de control, la estandarización de la operación, el plan de réplica a la flota y el cierre del proyecto.

2.5.1 Plan de control

El plan de control establece el monitoreo del sistema, organizado en las variables de salida y el control de las variables de proceso por etapa, presentado en la Tabla 19. El control de los resultados verifica la calidad del combustible entregado mediante tres métricas: el conteo de partículas y el contenido de agua en el diésel, medidos por laboratorio sobre la muestra tomada en la línea de succión entre el tanque de servicio y los filtros primarios, posterior al prefiltro cuando este se encuentra instalado, y la frecuencia de cambio de filtros como indicador temprano de la carga de contaminantes, las dos primeras se controlan mediante cartas de Shewhart contra los límites de cada

fabricante, y la tercera mediante un gráfico I-MR. El control de las variables de proceso, por su parte, asegura que cada etapa del proceso opere correctamente: la configuración y el mantenimiento del purificador, la presión diferencial y la correcta selección del filtro primario, la presión diferencial del filtro secundario y la operación del prefiltro hidro ciclónico, cada uno con su meta, sus límites y su plan de contingencia. El plan de control cierra la brecha de detección identificada en el AMFE.

2.5.2 Estandarización: procedimientos y estándares operacionales

La estandarización formaliza las acciones de mejora en estándares operacionales que institucionalizan la solución y previenen el retroceso. El proyecto consolida cuatro estándares:

- El de configuración del purificador, que fija la selección del disco de gravedad en función de la densidad del combustible
- El plan estandarizado de mantenimiento del purificador, cargado en la plataforma de gestión del mantenimiento con sus frecuencias por modelo o marca
- El instructivo de muestreo del diésel, que define el punto y el procedimiento de toma de muestra
- El estándar de selección de filtros, basado en eficiencias mínimas con certificado del fabricante.

Estos estándares transforman las correcciones puntuales del proyecto en una práctica permanente y documentada, independiente de las tripulaciones individuales y resistente a la pérdida de conocimiento que provoca la rotación del personal.

2.5.3 Plan de réplica a la flota

El plan de réplica define la forma en que la solución validada se extiende desde el remolcador piloto al resto de la flota. Una vez confirmada su efectividad en el piloto,

los estándares se despliegan por operación, priorizando los mercados con menor calidad de combustible y mayor exposición a la contaminación. El plan de mantenimiento y configuración del purificador se carga de manera transversal en la plataforma de gestión, junto al criterio de selección de filtros unificado con el área de procurement, el instructivo de muestreo se extiende como práctica regular y la incorporación del prefiltro hidro ciclónico se evalúa para las unidades con mayor carga de contaminantes.

2.5.4 Cierre y reconocimiento

El cierre formaliza la conclusión del proyecto, consolida sus resultados y su documentación, y reconoce a quienes participaron. Comprende la documentación de los resultados y del nuevo estándar, un expediente técnico que respalda una eventual certificación formal ante la casa clasificadora, la transferencia del monitoreo y los estándares al área de mantenimiento e ingeniería para su operación sostenida, y el reconocimiento de las tripulaciones y los equipos involucrados. Con ello se asegura que la propiedad de la mejora quede transferida y que los resultados se sostengan más allá de los límites temporales del proyecto.

La fase Controlar asegura que la mejora persista en el tiempo, sino que se sostenga en el tiempo y se extienda a la flota. El plan de control instaura el monitoreo sistemático de los resultados de salida y de las variables de proceso, cerrando de manera directa la brecha de detección que la fase Analizar había identificado como el principal multiplicador del riesgo. La estandarización formaliza las correcciones del proyecto en estándares operacionales permanentes para la configuración, mantenimiento, muestreo y selección de filtros, reduciendo la pérdida de conocimiento por rotación de personal en la empresa. El plan de réplica establece el mecanismo para generalizar la solución validada desde el piloto al conjunto de la flota, y el cierre transfiere la propiedad de la mejora al área de ingeniería y consolida el expediente técnico que respalda su eventual certificación.

Con ello concluye la aplicación de la metodología DMAIC. Las cinco fases recorren la trayectoria completa del proyecto, desde la formalización del problema hasta la definición de un estándar de control sostenible. La verificación empírica de este diseño se desarrolla en el Capítulo 3.

3. MONTAJE EXPERIMENTAL Y RESULTADOS

El presente capítulo desarrolla la verificación empírica del diseño metodológico establecido en el Capítulo 2, trasladando las cinco fases de la metodología DMAIC desde su formulación a su ejecución sobre la flota de remolcadores. Su estructura replica la lógica de los cuatro objetivos específicos del trabajo:

- La sección 3.1 presenta el diagnóstico del estado actual de los sistemas de purificación, levantando la configuración, la presencia de equipos. Para los equipos de filtrado se analiza su presencia en la flota y se define un criterio de priorización para comprender el estado de los filtros de la flota.
- La sección 3.2 traduce los hallazgos de ese diagnóstico en estándares de operación, configuración y mantenimiento preventivo para los purificadores, construidos sobre la documentación de los fabricantes y el contexto operacional levantado. Para los filtros se establece el estándar de filtro primario requerido en la flota para cumplir con el diseño escalonado de filtrado requerido por lo fabricantes.
- La sección 3.3 describe la implementación del plan piloto sobre una unidad relevante para el estudio, el remolcador Tarqui, detallando su selección y caracterización, la definición de los puntos de muestreo, el protocolo e instrumentación empleados y las intervenciones aplicadas.
- La sección 3.4 presenta la validación técnica de los resultados, contrastando la calidad del combustible antes y después de la intervención contra los límites de especificación del fabricante, proyectando el impacto sobre la frecuencia de cambio de filtros y el consumo de repuestos, y definiendo las cartas de control para caracterizar el comportamiento del sistema de purificado y filtrado de cada remolcador.

El capítulo materializa, además, la caracterización de la línea base cuyo marco analítico quedó definido en el plan de medición de la fase Medir: las herramientas estadísticas allí establecidas se aplican aquí sobre los datos obtenidos en la campaña de muestreo y en los registros operacionales, de modo que el estado del sistema previo a la

intervención queda cuantificado y la comparación posterior resulta metodológicamente válida. La selección del remolcador Tarqui como unidad piloto responde a los criterios definidos en el plan de implementación de la fase Mejorar y posee un valor adicional para la validación: al tratarse de una de las unidades afectadas por los eventos catastróficos documentados durante el período 2024–2025, los resultados obtenidos sobre ella permiten contrastar la solución propuesta directamente contra el escenario de falla que incentivo el proyecto.

3.1 Diagnóstico del estado actual de los sistemas de purificación y filtrado de diésel

El diagnóstico del estado actual se construyó mediante un levantamiento de información aplicado sobre la totalidad de la flota de remolcadores, compuesta por 201 unidades distribuidas en doce países: Brasil, Canadá, Chile, Colombia, Costa Rica, Ecuador, El Salvador, Guatemala, México, Panamá, Perú y Uruguay. El instrumento principal fue un formulario dirigido a los jefes de máquinas de cada unidad, orientado a:

- Capturar la presencia y el modelo del purificador.
- La existencia y ejecución del plan de mantenimiento en la plataforma de gestión del mantenimiento
- Las prácticas de mantenimiento efectivamente realizadas
- La configuración del tren de filtrado y los períodos de reemplazo de los filtros de las máquinas principales y de los generadores.

Se obtuvieron 178 respuestas, equivalentes a un 88,6 % de la flota. Las unidades sin respuesta se concentran en Chile cuyo suministro de combustible fue corroborado posteriormente como libre de problemas de calidad, por lo que profundizar el levantamiento toma un papel secundario para los fines del diagnóstico, la presencia de equipos en dichas unidades se estableció a partir de los registros internos del área de ingeniería.

El primer hallazgo corresponde a la presencia de equipos. Del total de la flota, 160 unidades (79,6 %) cuentan con purificador centrífugo en operación, 17 unidades (8,5 %) poseen el equipo instalado, pero no lo utilizan y 23 unidades (11,4 %) no disponen de purificador. Las razones para la no utilización se dividen en dos categorías: equipos fuera de servicio por falla o deterioro, que representan el 41 % de los casos y constituyen en sí mismos un hallazgo de mantenimiento, y la decisión operacional de no utilizarlo por la calidad del diésel del país, que concentra el 59 % restante y se localiza completamente en la operación de Canadá, donde ninguna unidad opera su purificador. Sin embargo, Canada opera con un diésel de alta calidad con baja cantidad de contaminantes, mediante registros y análisis realizados en el país se demostró que un equipo como el purificado no es necesario. Esta distribución es coherente, demostrando que la exposición al riesgo de contaminación se concentra en los mercados donde la calidad del suministro es heterogénea y la barrera de tratamiento a bordo resulta indispensable, mientras que en las operaciones con suministro de calidad corroborada, como las de Norteamérica y el cono sur del Pacífico, el purificador cumple un rol preventivo de menor criticidad.

3.1.1 Levantamiento de información – Purificadores diésel

El formulario confirma una base instalada concentrada y homogénea en su principio de funcionamiento. De las 149 unidades de purificación identificadas por marca y modelo, GEA Westfalia representa el 51,7 % y Alfa Laval el 47,0 %, con una participación marginal de otros fabricantes (1,3 %). Cuatro modelos concentran la práctica totalidad del parque: el GEA Westfalia OTC 2-02-137 con 60 unidades, el Alfa Laval MAB 103B-24 con 56, el GEA Westfalia OTC 3-02-137 con 17 y el Alfa Laval MAB 104B-14/24 con 12, completando el inventario un número reducido de equipos de otros fabricantes. Dos remolcadores poseen un modelos minoritarios de Alfa Laval, debido a ello, se excluyeron del conteo por marca y del análisis posterior, por poseer un régimen de mantenimiento distinto del estándar de los dos modelos predominantes de la marca, lo que impide tratarlos bajo los mismos criterios de configuración y mantenimiento. Un hallazgo transversal es que la totalidad de los equipos

representativos corresponden a tecnología convencional de ajuste manual, basada en disco de gravedad en los equipos Alfa Laval y en anillo regulador en los GEA Westfalia, conforme a la arquitectura descrita en la sección 1.4 [27] [28] [29] [30], ninguna unidad de la flota incorpora sistemas de descarga y ajuste automático. Esto implica que la correcta separación del agua depende, en toda la flota, de una selección manual del disco o anillo en función de la densidad del combustible y de las condiciones de temperatura y caudal de diseño, exactamente las variables que la fase Analizar identificó como causas raíz del bajo desempeño del purificado.

En materia de gestión del mantenimiento, 132 unidades declaran contar con un plan de mantenimiento del purificador cargado en la plataforma de gestión del mantenimiento, tres unidades manifiestan disponer de un plan que no se encuentra reflejado en la plataforma y seis unidades no poseen plan alguno; de estas últimas, cinco realizan mantenimientos por iniciativa propia de la tripulación y una no ejecuta ninguna intervención sobre el equipo. Respecto al periodo de descarga de lodos se encuentra una alta variación en los tiempos, donde algunos equipos lo realizan de manera periódica cada 7 días, otro lo realizan mensual o cada 1 año en algunos casos. Que un mismo parque de equipos, dominado por cuatro modelos, exhiba intervalos de mantención que difieren en dos órdenes de magnitud revela que los planes cargados en la plataforma no responden a un estándar único construido desde la documentación del fabricante, sino a definiciones locales heredadas en cada operación. El alto cumplimiento declarado indica que el problema no es la disciplina de ejecución de las tripulaciones, sino la ausencia de un contenido estandarizado de ejecución.

3.1.2 Levantamiento de información – Filtros diésel

El levantamiento del tren de filtrado muestra una configuración predominante de filtros primarios en serie, donde cada filtro alimenta su motor, y elementos filtrantes que incluye, entre otros, unidades Racor, Separ, Fleetguard, Donaldson, Parker y elementos del fabricante del motor, con grados de filtración declarados entre 2, 10 y 30 micrones. Algunos remolcadores poseen un sistema de filtro de mallas con bajos niveles de

filtrado, remolcadores como el Tarqui poseen un filtro lavable de 340 micrómetros, valor que choca directamente con el estándar utilizado por Caterpillar y MTU, Esto refuerza la necesidad de un estándar de filtrado que brinda transparencia sobre el estado actual de los motores y sus sistemas auxiliares.

Además, como se aprecia en la Tabla 26 se encontraron diversos micrajes para un mismo tipo, el filtro racor 2020 posee 9 opciones distintas en la flota, brindando un alta varianza al comparar el rendimiento del equipo en la flota, algunos países poseían 3 tamaños de filtrado diferentes 2, 10 y 30 micrones para el equipo, siendo un hallazgo de alta relevancia, reforzando la necesidad de un estándar de filtrado que se rija por los estándares mínimos requerido.

El análisis de los períodos de reemplazo de filtros de cada unidad contra los intervalos de referencia del fabricante permite categorizar el comportamiento de cada línea de tratamiento. Se realizaron 4 categorías distintas correspondiente a un criterio de priorización para realizar una mejora al sistema de purificado y filtrado:

- Correcto: Corresponde a los periodos de cambio dentro del intervalo recomendado por el proveedor, admitiendo una variación del más o menos 25%
- Adecuado: Periodos de cambio de filtro que se encuentren con una diferencia del 25 al 35% del periodo de cambio de filtro considerando el 25%.
- Necesario: Periodos que se encuentren entre el 35% y el 60% considerando el 35%.
- Critico: Todo periodo de cambio con una variación mayor al 60% de lo ideal indicado por el fabricante.

La adopción de una banda de tolerancia en torno a la recomendación responde a tres consideraciones. Primero, la logística de operación y mantenimiento de un remolcador fuerza un periodo de cambio ligeramente flexible, admitiendo una variación por atrasos, periodo conocido en la industria como tiempo de gracia o ligeros adelantos por la calidad del combustible abordado. Segundo, los períodos provienen de la declaración de las tripulaciones donde comúnmente entregan un valor estimado en base a su experiencia, por lo que una banda estrecha clasificaría como anomalía el ruido propio

del registro y no el comportamiento del sistema. Tercero, los intervalos del fabricante se definen para condiciones normales de operación e incorporan márgenes de diseño del elemento filtrante, admitiendo el propio fabricante ajustes según la severidad del servicio, por lo que desviaciones moderadas no comprometen la función protectora ni evidencian por sí solas una condición anómala.

Sobre esta base se definió la escala de cuatro categorías de severidad creciente, cuyos umbrales se establecieron mediante criterio experto en conjunto con el área de ingeniería de flota. Se obtienen los siguientes gráficos de periodo de cambio en la flota:

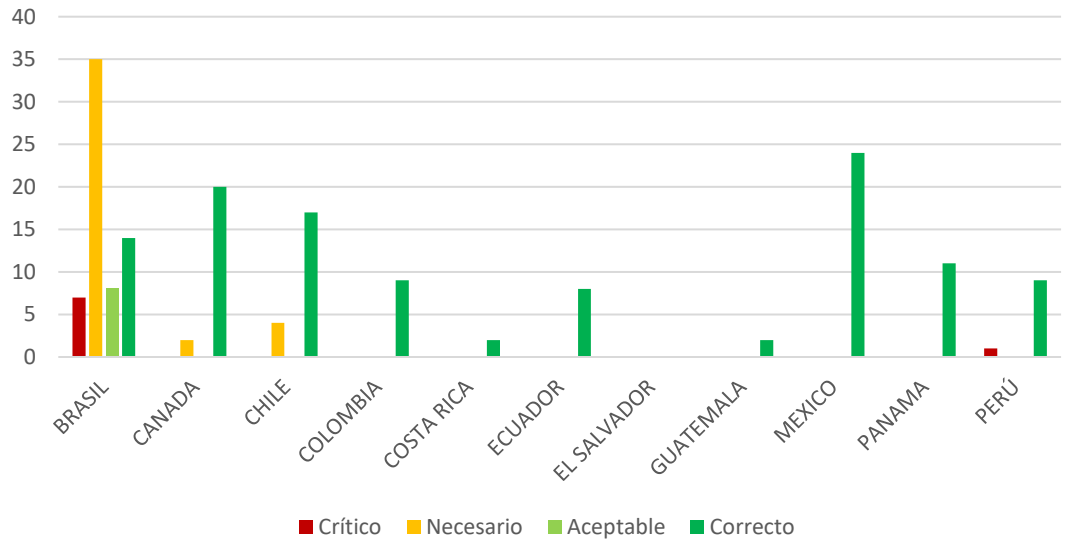


Ilustración 8: Grafico de categoría de priorización por periodo de cambio de filtro primario en motor principal. Fuente: Victor Frederico, creado con información levantada de la empresa afiliada a la memoria.

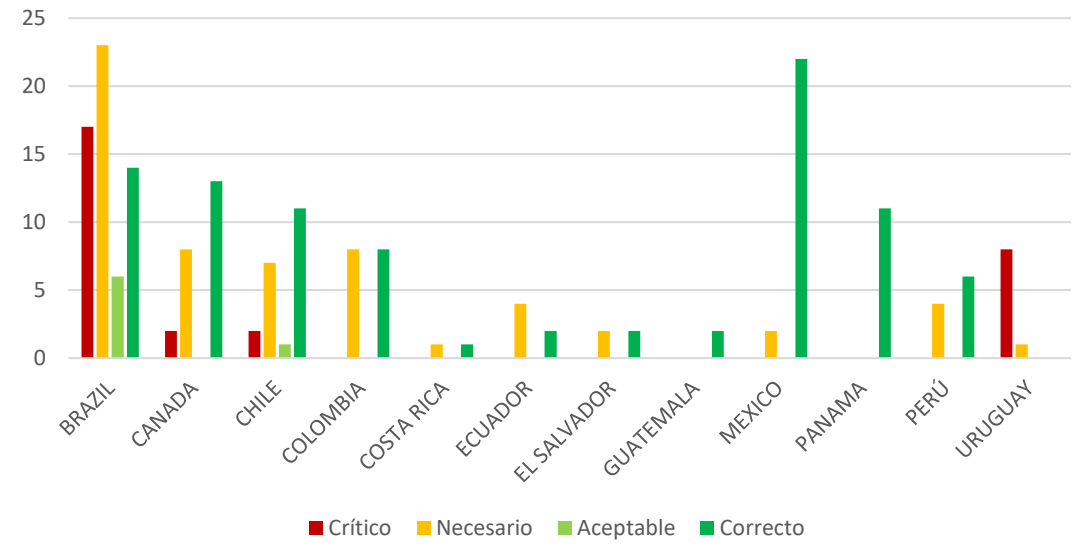


Ilustración 9: Grafico de categoría de priorización por periodo de cambio de filtro secundario en motor principal. Fuente: Victor Frederico, creado con información levantada de la empresa afiliada a la memoria.

Para los filtros primarios de las máquinas principales, 121 unidades presentan un comportamiento correcto, 8 aceptable, 50 requieren intervención y 8 se encuentran en condición crítica, de modo que el 32 % de las líneas evaluadas opera fuera del comportamiento de referencia. Para los filtros internos del motor principal 92 se encuentran dentro del rango correcto, 7 dentro de lo aceptable, 60 en necesario y 29 en crítico. Indicando que un 48% se encuentra fuera de los parámetros de lo esperado por el fabricante. Se realizo el mismo ejercicio para los generadores obteniendo los siguientes resultados:

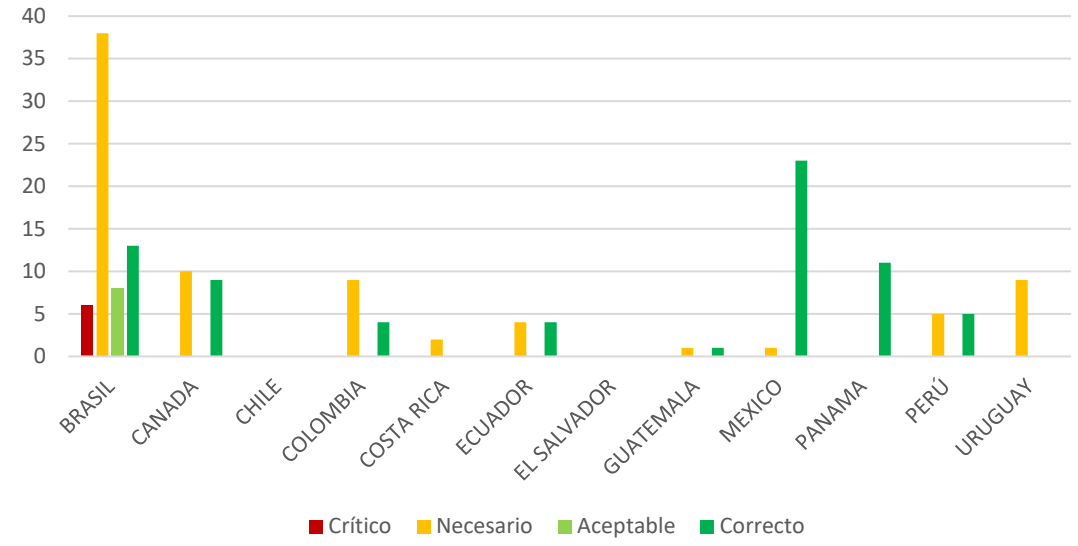


Ilustración 10: Grafico de categoría de priorización por periodo de cambio de filtro primario en generador. Fuente: Victor Frederico, creado con información levantada de la empresa afiliada a la memoria.

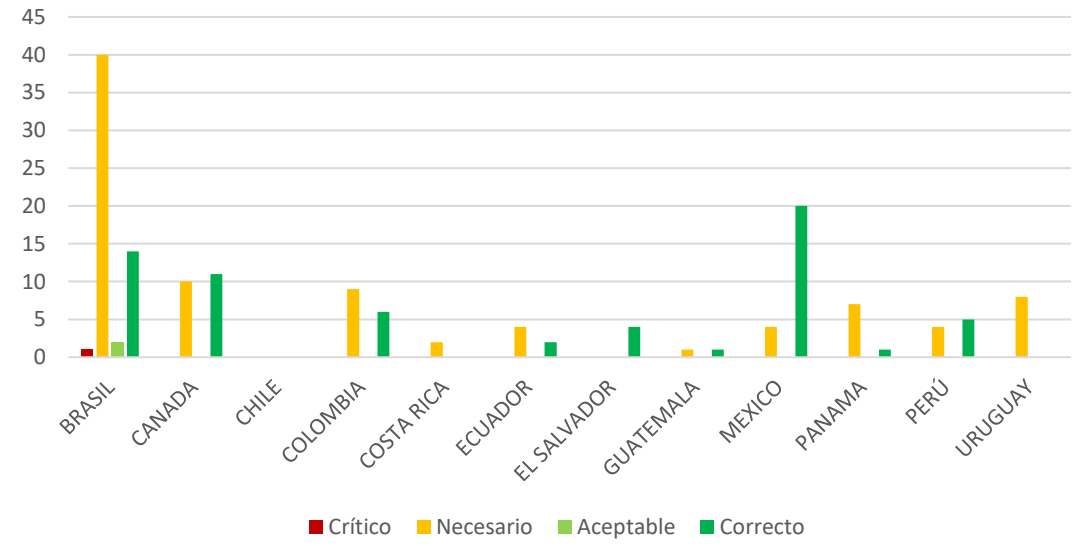


Ilustración 11: Grafico de categoría de priorización por periodo de cambio de filtro secundario en generador. Fuente: Victor Frederico, creado con información levantada de la empresa afiliada a la memoria.

Se aprecia una alta correlación entre el periodo de cambio de los filtros del motor principal con el de los generadores. Las observaciones registradas durante el análisis

identifican como síntomas dominantes la alta frecuencia de cambio del filtro interno del motor, indicativa de que la carga de contaminantes está alcanzando la etapa de filtración final que debiera operar como barrera de pulido y no de remoción gruesa, la restricción de flujo en filtros primarios y la programación de reemplazos por horas de operación rígida. A ello se suma la práctica operacional de registrar el cambio de filtro en una bitácora de jefe de máquinas física, haciendo la trazabilidad digital de información extremadamente compleja.

El diagnóstico del estado actual entrega, la línea base empírica de las variables de entrada definidas en el árbol de métricas de la fase Medir. La flota dispone mayoritariamente del equipamiento de purificación, pero éste corresponde íntegramente a tecnología de ajuste manual cuya eficacia depende de una configuración y de condiciones de operación que el levantamiento muestra no estandarizadas; los planes de mantenimiento existen y se ejecutan, pero su contenido difiere entre operaciones hasta en dos órdenes de magnitud para equipos equivalentes, y el tren de filtrado presenta heterogeneidad de elementos, vacíos de trazabilidad y síntomas de sobrecarga de contaminantes en más de la mitad de las líneas evaluadas. Estos hallazgos confirman las causas raíz validadas en la fase Analizar.

3.2 Operación, mantenimiento y configuración de equipos

La segunda etapa del montaje experimental profundizó el diagnóstico sobre la gestión del mantenimiento de los purificadores y entrega los primeros estándares que materializan el segundo objetivo específico del trabajo. Para ello se auditaron, directamente en la plataforma de gestión del mantenimiento, los trabajos estándar asociados a los purificadores de los cuatro modelos predominantes en todas las unidades registradas, contrastando su contenido, denominación e intervalos contra las recomendaciones de mantenimiento de los fabricantes consolidadas desde los manuales actualizados de cada equipo [27] [28] [29] [30].

3.2.1 Planes de mantenimiento encontrados en la empresa

Se realiza un levantamiento de información de los planes de mantenimiento encontrados en la plataforma de gestión de mantenimientos. El resultado confirma una alta dispersión de intervalos detectado en la plataforma. Para las 164 unidades analizadas bajo los cuatro modelos predominantes, la plataforma contenía 90 trabajos estándar distintos, combinados en 41 configuraciones de plan diferentes: el MAB 103B-24 registraba 30 trabajos distintos articulados en 22 planes diferentes entre sus 70 unidades, el OTC 2-02-137 presentaba 44 trabajos en 14 planes entre 62 unidades, el OTC 3-02-137 sumaba 11 trabajos en 4 planes y el MAB 104B-14/24 otros 5 trabajos en 3 planes. Esta alta heterogeneidad no se explica por las diferencias de contexto entre países: dentro de una misma operación coexistían planes distintos para el mismo modelo de equipo, con casos extremos de cinco planes diferentes para el MAB 103B-24 en México, cuatro en Ecuador para ese mismo modelo y cuatro para el OTC 2-02-137 en Perú. Los trabajos se encontraban redactados en tres idiomas según la operación de origen, con denominaciones no estandarizadas. Esta evidencia apoyada con el hallazgo de la sección anterior refuerza la idea de que los planes existen y se ejecutan con disciplina, pero fueron creados localmente en cada operación y heredados en el tiempo, sin un estándar único construido desde la documentación del fabricante, lo que valida la causa raíz organizacional identificada en la fase Analizar.

3.2.2 Planes de mantenimiento actualizados para purificadores

Para el nuevo plan de mantenimiento se consideran las recomendaciones de mantenimiento de ambos fabricantes. Para los equipos Alfa Laval, el fabricante estructura el mantenimiento en una revisión diaria del equipo, un cambio de aceite del conjunto de engranajes cada 1.500 horas de operación o una vez al año, un servicio intermedio cada 2.000 horas o tres meses consistente en el overhaul del bol separador y un servicio mayor cada 8.000 horas o doce meses que comprende el overhaul completo del equipo, agregando el MAB 104B-14/24 un servicio adicional cada tres años donde la marca revisa el equipo. Para los equipos GEA Westfalia, la estructura

considera la revisión diaria, un servicio intermedio que se ejecuta por primera vez a los seis meses o 4.000 horas y luego con frecuencia anual o cada 8.000 horas, y un servicio mayor que se realiza por primera vez al año u 8.000 horas y posteriormente cada dos años o 16.000 horas, con alcances que se alternan anualmente, recomendando además la revisión integral periódica del equipo por un ingeniero de servicio del fabricante al igual que Alfa Laval.

Sobre esa referencia se construyó el plan de mantenimiento corregido y unificado por marca. La metodología de corrección consistió en identificar, para cada rutina recomendada por el fabricante, el trabajo estándar existente en la plataforma cuyo contenido más se aproximaba a lo deseado, utilizándolo como base para homologar denominación, intervalo, procedimiento y repuestos, lo que facilita la transición operacional al reutilizar prácticas ya conocidas por las tripulaciones en lugar de imponer rutinas enteramente nuevas. El plan corregido para los equipos Alfa Laval se presenta en la Tabla 20 y quedó estructurado en cuatro trabajos estándar: inspección diaria, limpieza del bol separador, cambio de aceite y mantenimiento mayor. El plan para los equipos GEA Westfalia se presenta en la Tabla 21 y comprende cinco trabajos: inspección diaria, limpieza del bol separador, mantenimiento cada doce meses u 8.000 horas y dos mantenimientos mayores cada veinticuatro meses o 16.000 horas cuyos alcances se alternan según el año par o impar contado desde la antigüedad del equipo, implementando así el esquema de alcance alternado del fabricante. Para los equipos minoritarios de otras marcas se definió un plan genérico de tres trabajos (inspección diaria, limpieza del bol separador y mantenimiento anual u 8.000 horas) que asegura una cobertura mínima donde los jefes de máquinas deberán establecer los procedimientos de mantenimiento adecuados. La totalidad de los trabajos se emitió en versión bilingüe español-inglés para su aplicación transversal en la flota multinacional, incorporando énfasis en medidas de seguridad estandarizadas, que formaliza la detención y señalización del equipo, el uso de elementos de protección personal y la disposición de residuos.

3.2.3 Estandarización de operación para el purificador

El estándar corregido aborda igualmente la dimensión de operación. Se incorporaron 2 estándares de uso del equipo adjunto en la Tabla 22 y en la Tabla 23, el primero es conocido como uso estándar el cual incorpora un tiempo mínimo de purificado semanal de 48 horas semanales, prohíbe la purificación en maniobras y cuando el jefe de máquinas se encuentra fuera de servicio. El segundo estándar corresponde a uso pesado, destinado a los remolcadores que poseen un equipo 24/7 a bordo, en él se debe purificar constantemente a excepción de mantenimientos en el equipo y maniobras. Los estándares de uso dictan las frecuencias de mantenimiento con relación al tiempo de operación del equipo o por calendario, lo que llegue antes. Además, para los equipos Alfa Laval se poseen 2 sub-configuraciones en base al tipo de aceite que utiliza el equipo, para los equipo con aceite sintético es posible extender los periodos de cambio de aceite. Mientras que para los equipos con aceite mineral se realiza un mantenimiento proactivo con la finalidad de realizar el cambio de aceite a la vez que se realiza el mantenimiento mayor. Se realizó un levantamiento sobre el aceite que utiliza cada país con finalidad de configurar cada equipo correctamente en la plataforma de gestión de mantenimientos.

3.2.4 Estandarización de la configuración del purificador

Para el correcto funcionamiento del equipo se debe poseer el equipo correctamente configurado, esto se realiza con la finalidad de mantener la máxima eficiencia del equipo. Para la correcta configuración del equipo se deben considerar 2 componentes de él. El primero es el disco de gravedad, también conocido como anillo regulador. Para escoger el diámetro interno correcto de disco es necesario conocer la densidad del fluido a purificar como se aprecia en la Tabla 24, adicional a ello para el equipo MAB 103B-24 de Alfa Laval se debe conocer el caudal de salida del equipo como se aprecia en la Tabla 25. Un disco muy pequeño afectará la eficiencia del fluido, y un disco muy grande afectará el sello de agua haciendo que este se rompa [27] [28] [29] [30]. Adicional al disco de gravedad se debe asegurar que los discos cónicos separadores

sean los adecuados, su estado, número y correcta instalación de manera intercalada entre los dos tipos de discos existentes como se indica en la Ilustración 12.

Se agrega una tarea a la plataforma de gestión de mantenimientos para corroborar: la configuración del disco de gravedad y estado de discos cónicos junto al análisis diésel periódico.

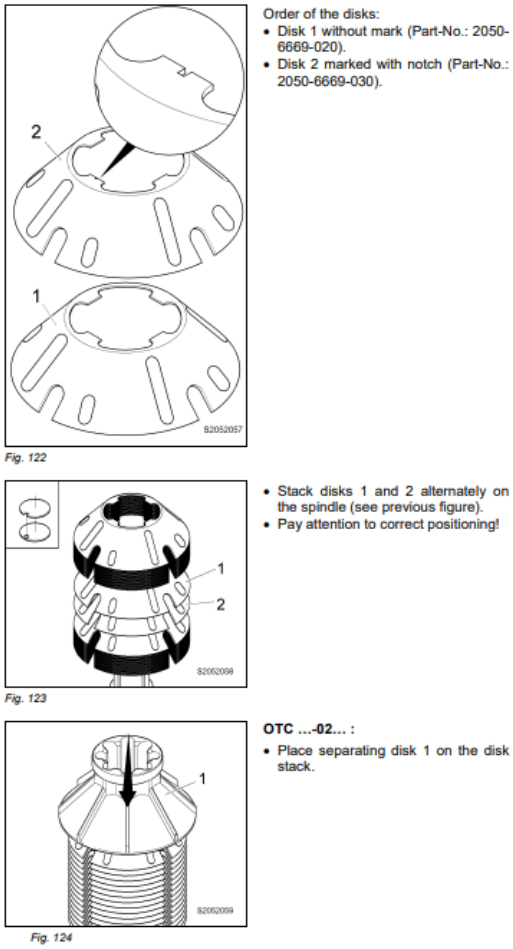


Ilustración 12: Instrucciones de correcta instalación de discos separadores en equipos GEA Westfalia OTC 2-02-137. Extraído de GEA Westfalia.

3.2.5 Selección de filtros primarios

De acuerdo con lo expuesto en la sección anterior, la flota de remolcadores presenta una elevada variabilidad en sus configuraciones de filtrado, dentro de la cual se identifican elementos cuyo grado de filtración resulta incompatible con los requisitos de los dos fabricantes de motores más representativos. Caterpillar establece para la filtración primaria del combustible mínimo de 20 micrones absoluto o más fino [8]. MTU, por su parte, fija una arquitectura de filtrado escalonada que distingue explícitamente el filtro primario del filtro del motor [19]. Tomando el grado de 20 micrones absolutos como referente de la etapa previa al filtro final, es debido a esto que se adopta para el filtro primario de la flota un grado de filtración mínimo de 20 micrones absoluto para el filtro primario en los remolcadores de altas revoluciones de la flota.

En la Tabla 26 también se aprecian filtro de 4 micrones, su incorporación como elemento primario resulta igualmente inadecuada, por dos motivos. El primero responde a la lógica de filtración escalonada: el equipo de purificación centrífuga retiene de manera eficaz los contaminantes de mayor tamaño, pero permite el paso de las fracciones media y fina del particulado [8]. Si el elemento más fino del sistema se dispone como primera barrera, debe captar esa fracción completa en una sola etapa, lo que precipita el aumento de la presión diferencial y la saturación prematura del medio, reduce su vida útil y, a medida que la presión diferencial crece, habilita dos modos de falla: el arrastre o reincorporación de partículas previamente retenidas y, en el extremo, el desgarro del medio filtrante, fenómenos que liberan contaminante hacia el sistema de inyección. El segundo motivo es la redundancia respecto del filtro propio del motor, que ya opera a 4 micrones absolutos [8]: un filtro primario de idéntica finura no aporta la protección escalonada que justifica su existencia y, al carecer él mismo de una etapa previa, se satura al mismo ritmo que el filtro final sin prolongar su vida; ante la rotura del filtro primario, el filtro del motor queda expuesto a la misma carga no acondicionada que aquel debía retener. Al revisar las recomendaciones de los

fabricantes y del grupo CIMAC se establece un estándar mínimo de filtrado por tecnología de inyección y marca, presente en la Tabla 27.

La sección permite concluir que la causa de la heterogeneidad de mantenimiento no residía en la indisciplina de ejecución sino en la proliferación histórica de planes locales no referenciados al fabricante: donde cuatro modelos de equipo requerían cuatro planes, la plataforma contenía 41 configuraciones distintas construidas sobre 90 trabajos diferentes. La corrección implementada reduce esa multiplicidad a un plan por marca, anclados en los intervalos y alcances de la documentación técnica de los fabricantes, bilingües y cargados de manera transversal, estableciendo por primera vez una base de mantenimiento única y auditable para el sistema de purificación de toda la flota. Además, se regularizo el uso del equipo y su configuración, con tal de brindar el mantenimiento correcto para el periodo de uso adecuado. Respecto a los filtros se establecieron las características que debe cumplir la etapa, reduciendo y estandarizando los requisitos que debe poseer un filtro primario para cumplir con la lógica del sistema y correcta operación. La sección siguiente desarrolla la implementación del piloto, donde la configuración corregida y el plan unificado se aplican sobre una unidad representativa y su efecto se mide en la calidad del combustible entregado al motor.

3.3 Implementación del piloto

3.3.1 Selección y caracterización del remolcador para implementar sistemas de mejora

Para la implementación piloto se seleccionó el remolcador Tarqui, una de las unidades afectadas por las fallas catastróficas del sistema de inyección documentadas en el Capítulo 1. La elección responde a tres criterios: su historial de fallas dentro de la flota, una debilidad estructural en su línea de tratamiento, consistente en la ausencia de un filtro primario de bajo micraje y la historia del país al ser conocido por poseer una pobre calidad de diésel.

El remolcador Tarqui posee un filtro lavable Boll & Kirch modelo 2.04.5 DN32 de 340 µm, dispuesto en dos unidades por motor principal y una por generador. Su umbral de retención resulta órdenes de magnitud más grueso que el requerido para proteger los componentes de inyección, de modo que, entre el purificador y el filtro propio del motor, los cuales no son modificables, no disponen de una etapa intermedia capaz de retener el particulado fino ni el agua residual, los cuales recaen completamente sobre dicho filtro final. El elevado micraje de este filtro se explica por el origen del remolcador. El Tarqui fue construido en Turquía en 2016 y adquirido a una empresa que lo operaba en ese mercado, donde el diésel a dicha fecha respondía a la norma europea EN 590, con un contenido de azufre máximo de 10 ppm y especificaciones estrictas de densidad, agua y contaminación. En un entorno de combustible limpio y consistente, una filtración primaria gruesa resulta suficiente, pues la separación fina queda a cargo del purificador y del filtro propio del motor. La situación cambia de manera drastica en el mercado ecuatoriano, donde el diésel está clasificado por la norma NTE INEN 1489 en grados de 500 ppm de azufre para diésel marítimo, y proviene de un proceso de refinación menos exigente, su mayor contenido de azufre es indicador de una calidad general inferior, habitualmente acompañada de mayores niveles y mayor variabilidad de agua y particulado.

El Tarqui, en servicio en Ecuador y construido en 2016, desarrolla 4.828 bhp y 70 t de tiro a punto fijo, con 25,3 m de eslora y 12 m de manga, y se encuentra clasificado por Lloyd's Register, el detalle de sus especificaciones se consigna en la Tabla 28. Su planta se compone de dos motores principales Wärtsilä 9L20 y dos generadores Perkins 1104C4.4TA, y su tratamiento de combustible se articula en torno a un purificador centrífugo GEA Westfalia OTC 2-02-137. Esta configuración motriz introduce una particularidad relevante para el piloto: los motores Wärtsilä de la serie 20 imponen exigencias de limpieza marcadamente menos restrictivas que los equipos Caterpillar y MTU dominantes en el resto de la flota. Mientras estos últimos fijan una concentración de partículas máxima según ISO 4406 de ISO 18/16/13 para Caterpillar [8] e ISO 18/17/14 para MTU, la serie 20 no establece un código de distribución de partículas y

admite hasta 1.000 mg/l de sólidos totales, frente a los 10 y 24 mg/l de aquellos, así como hasta 3.000 ppm de agua, frente a los 200 ppm de ambos fabricantes.

La tolerancia ampliada de la serie 20 explica que la unidad operase con un único filtro grueso, pero no anula la vulnerabilidad evidenciada por su historial de fallas ni la necesidad de garantizar una separación efectiva de agua y sólidos. además, el punto de referencia frente al cual se evaluará el desempeño del sistema durante el piloto, distinto del aplicable a las unidades Caterpillar y MTU. Sobre esta base, la intervención comprende tres frentes desarrollados en las secciones siguientes: la optimización del purificador existente, en su plan de mantenimiento y su configuración, la incorporación de un equipo de separación complementario en la línea de alimentación, y la definición de un protocolo de muestreo que permita caracterizar el comportamiento del sistema.

Para cerrar la caracterización del remolcador piloto y habilitar la evaluación objetiva de las unidades de la flota, se definen los criterios de aceptación de la limpieza del diésel con las cuales se determinará, la necesidad de intervención de cada unidad. La Tabla 32 establece los criterios de aceptación adoptados según fabricante y tecnología de inyección, donde para motores de mediana velocidad se posee un criterio menos exigente al compararse con su contraparte de alta velocidad. Además, se establece un criterio de respaldo para los países que no poseen la capacidad técnica de realizar un análisis de conteo de partículas ISO 4406, en ese caso se realiza una evaluación mediante contaminación por partículas ASTM D6217. Bajo este marco, una unidad cuyo combustible cumple los criterios aplicables se considera sin necesidad de intervención por calidad de combustible, mientras que el incumplimiento de uno o más criterios activa una evaluación de intervención que se desarrolla en la discusión del presente trabajo.

3.3.2 Definición de los puntos de muestreo en el sistema

Para comprender el comportamiento del sistema de purificado y filtrado de un remolcador es necesario establecer la línea base de operación y, posteriormente, validar el efecto de las intervenciones. El combustible diésel marino se rige por tres niveles

jerárquicos de especificación: primero la norma internacional ISO 8217, que fija los requisitos mínimos de calidad en el punto de entrega al buque, segundo los requisitos del fabricante del motor, vinculantes para la garantía y por lo general más restrictivos que la norma ISO y tercero las especificaciones nacionales o regionales aplicables en cada mercado de abastecimiento. El combustible debe satisfacer la norma ISO 8217 a la entrega del combustible al remolcador, las exigencias del fabricante en el punto de referencia adoptado por el proyecto, que corresponde a la entrada del filtro primario o salida del tanque de servicio, corroborado por los manuales de Caterpillar y MTU. Cualquier brecha de calidad entre la entrega y dicho punto debe ser cubierta por el sistema de tratamiento a bordo.

Dado que los motores principales del Tarqui pertenecen a la serie 20 de Wärtsilä, son sus exigencias las que constituyen la referencia para el piloto, y estas resultan marcadamente menos restrictivas que las de los equipos Caterpillar y MTU dominantes en el resto de la flota. La serie 20 no establece un código de distribución de partículas, admite hasta 1.000 mg/l de sólidos totales, frente a los 10 y 24 mg/l de aquellos, y hasta 3.000 ppm de agua, frente a los 200 ppm de ambos [25]. El conjunto de límites aplicables a la salida del tanque de servicio, con sus métodos de ensayo, se resume en la Tabla 29.

El plan de muestreo reconoce un mínimo de tres puntos, con un cuarto de carácter opcional, cada uno orientado a caracterizar un aspecto distinto del sistema: el esquema general con la ubicación de los puntos se presenta en la Ilustración 13. El primero, en el tanque general, caracteriza el estado del diésel almacenado a bordo, y su valor distintivo es caracterizar el diésel que ingresa al sistema.

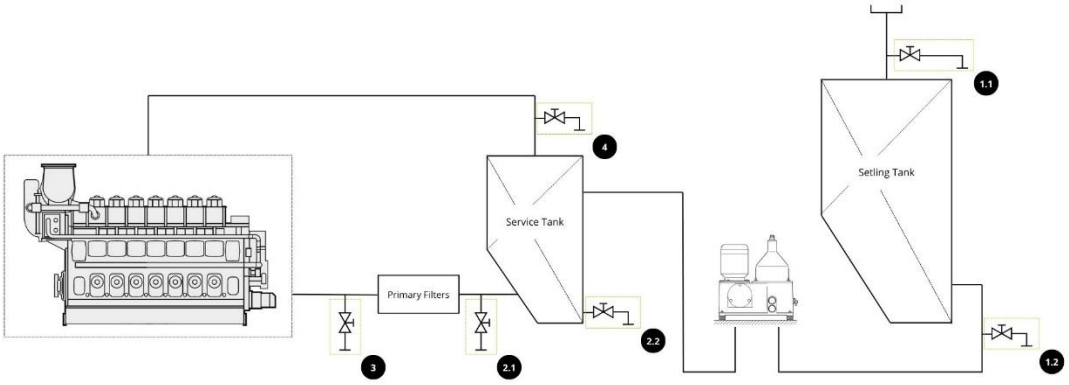


Ilustración 13: Esquema de puntos de muestreo en línea de purificado y filtrado diésel. Autor: Victor Frederico.

El segundo punto, en el tanque de servicio, evalúa el rendimiento del purificador y la eventual presencia de contaminación microbiana. Su ubicación óptima es la línea de presión, previa al filtro primario; en ausencia de esa toma puede recurrirse a la llave de purga como última opción, este muestreo correspondería al peor caso posible, no representativo del combustible efectivamente enviado al motor, pero particularmente útil para detectar agua libre acumulada y colonias microbianas, que se desarrollan en la interfase combustible-agua del fondo. El tercer punto, en la línea de alimentación posterior al filtro primario, evalúa de manera específica el rendimiento e integridad del equipo, puesto que el filtro interno integrado del motor no admite modificación, el filtro primario constituye uno de los pocos elementos sobre los que el proyecto puede intervenir, lo que confiere a este punto una relevancia particular para el diagnóstico. El cuarto punto, opcional, en la línea de retorno, caracteriza el combustible que efectivamente recibe el motor y, en conjunto con el muestreo del tanque de servicio, permite evaluar el desempeño de los filtros instalados en la línea de alimentación, no obstante, numerosos remolcadores carecen de una toma habilitada en línea presurizada, por lo que su incorporación exige evaluar previamente la factibilidad técnica de utilizar dicho punto.

Sobre las muestras se ejecuta el conjunto de análisis correspondiente a los parámetros especificados: concentración de partículas, contenido de agua y densidad. En cuanto al procedimiento, la extracción se realiza preferentemente mediante una llave de muestreo

dedicada en cada punto. Cuando esta no existe en el tanque de sedimentación, se admite extraer la muestra con la bomba manual de trasvase asociada al sistema, dejando registro explícito del punto físico desde el cual se tomó. En el caso de la llave de purga, se debe purgar primero el volumen muerto de la línea de drenaje y recolectar la muestra una vez que el flujo se observe uniforme, sin estratificación ni frente de agua, interpretando siempre el resultado como representativo del fondo del tanque y no del combustible enviado al consumo. En todos los casos, la muestra debe protegerse de contaminación durante su manipulación y traslado al laboratorio, condición indispensable para la validez de la determinación de partículas.

3.3.3 Intervenciones al equipo purificador del remolcador piloto

Las intervenciones descritas en esta sección recaen sobre el equipamiento ya instalado en el remolcador. Su propósito es corregir los mantenimientos y configuraciones del purificador OTC 2-02-137 con la finalidad de mejorar su eficiencia, buscando corregir: un plan de mantenimiento desvinculado del uso real del equipo y una configuración inadecuada del equipo.

El plan de mantenimiento bajo el cual operaba el purificador en la plataforma de gestión del mantenimiento se estructuraba en tres inspecciones de periodicidad calendario a los 6, 12 y 24 meses, sus tareas se presentan en la Tabla 30, cada una con un conjunto definido de tareas de verificación y reemplazo. El plan original abarcaba una periodicidad que no encajaba con el uso del equipo, donde además se apreciaban tareas repetidas. Por esta razón, el plan original se reemplazó por el recomendado en el manual actualizado del equipo [29], reorganizado en función a la operación del equipo y del ciclo de vida del purificador. El nuevo plan se organiza en cinco tareas:

- El primero, de inspección diaria, verifica los parámetros operativos del equipo.
- El segundo corresponde a la limpieza del bol separador, cuyo periodo no se fija de forma arbitraria, sino que se determina de manera empírica dependiendo de la cantidad de lodos que separe el equipo en el tiempo, como se aprecia en la Tabla 31.

- El tercer nivel corresponde a un mantenimiento anual.
- El cuarto comprende mantenimiento bienal, de año impar en relación con la vida del equipo
- El quito corresponder a un mantenimiento bienal, de año par en relación con la vida del equipo.

Todas las tareas del nuevo plan de mantenimiento se pueden apreciar en la Tabla 31, con la periodicidad de acuerdo al modo de uso del equipo estándar, de acuerdo con lo especificado en la Tabla 23. De manera complementaria a la actualización del plan, la intervención corrige la configuración del equipo, condición necesaria para una separación efectiva. El primer ajuste recae sobre el anillo de regulación, denominado disco de gravedad en la nomenclatura de Alfa Laval, cuyo diámetro interno debe seleccionarse en función de la densidad del diésel como se presenta en la Tabla 24, verificando además que el componente posea las geometría adecuada y no este desgastado. Se verifica, además, el número adecuado de discos separadores, el estado de los componentes y la correcta formación del sello de agua. Para el armado del paquete de discos se alternan discos de tipo 1 y tipo 2 diferenciados por una pequeña indentación en su cara interna, cuidando que el disco superior final sea de tipo 1, según se ilustra en la Ilustración 12.

3.3.4 Corrección del filtro primario de los motores principales

Con el levantamiento de información del piloto se encuentra este posee filtros primarios de combustible del tipo lavable Boll & Kirch modelo 2.04.5 DN32, de 340 µm, dispuestos en dos unidades por motor principal y una por generador. Este umbral de retención es diez veces más grueso que el grado de filtración absoluta de 34 µm recomendado por Wärtsilä para la etapa. Es debido a eso que se debe realizar una actualización del elemento filtrante del remolcador, a un filtro de 30 µm con eficiencia mínima de 98% de retención de partículas correspondientes a las unidades disponibles para filtrado primario para la carcasa Boll & Kirch modelo 2.04.5 DN32.

3.3.5 Instalación del equipo de prefiltro con su programa de mantenimiento

De acuerdo a lo determinado en la metodología se procede con la instalación de un prefiltro AK1000P correspondiente del tipo estático de separación por efecto ciclónico, sin partes móviles, equipado con alarma de nivel de agua. En el remolcador Tarqui, el equipo se instala posterior al tanque diario y previo al filtro Boll & Kirch. Esta posición responde a la lógica de filtración escalonada, que ordena las etapas de la más gruesa a la más fina. La instalación comprende además la verificación de estanqueidad de la línea de succión, la purga de aire del sistema y la comprobación del funcionamiento de la alarma de agua. Los resultados del piloto se esperan para el tercer trimestre de 2026.

El equipo incorpora dos rutinas de mantenimiento, que se cargan como tareas en la plataforma de gestión de activos, presentes en la Tabla 33 anexado.

La implementación del piloto materializa así el tercer objetivo específico del trabajo, trasladando los estándares construidos en las secciones anteriores a una unidad representativa del problema. La selección del remolcador Tarqui se debe a su historial de fallas, la debilidad estructural de su línea de tratamiento y la calidad deficiente del combustible de su mercado, de modo que la unidad concentra las condiciones que el proyecto busca resolver. Sobre ella, la intervención recorrió la línea completa de tratamiento: la regularización del purificador en su plan de mantenimiento y su configuración, la corrección del filtro primario hacia el micraje y la eficiencia requeridos por el fabricante, y la incorporación del prefiltro hidrociclónico como etapa complementaria de separación, en torno a un protocolo de muestreo que caracteriza el aporte de cada etapa y convierte la eficiencia asumida del sistema en un parámetro medido y propio de la unidad. El piloto queda estructurado como una validación por medición, con su línea base definida, sus puntos de comparación establecidos y sus resultados de laboratorio esperados para el tercer trimestre de 2026. Con el sistema intervenido y el mecanismo de verificación instalado, la sección siguiente consolida el trabajo en un nuevo estándar de control, que proyecta el impacto operacional de la

intervención y define las herramientas con las cuales la flota completa medirá, controlará y sostendrá la calidad de su combustible en el tiempo.

3.4 Nuevo estándar de control para el sistema de purificado y filtrado diésel

La presente sección consolida los resultados del trabajo en un estándar de control permanente para el sistema de purificado y filtrado de la flota, materializando la fase Controlar de la metodología sobre la infraestructura levantada en las secciones anteriores. Dado que los resultados de laboratorio del piloto se esperan para el tercer trimestre de 2026, fuera del periodo del presente trabajo, la validación se formula una predicción del impacto operacional esperado, anclada a la línea base cuantificada en la fase Medir y al criterio de éxito definido para el piloto, y la definición del sistema de control que permitirá convertir dicha predicción en resultado medido, compuesto por las cartas de control, el estándar de muestreo periódico con la verificación de equipos y el criterio de evaluación para la incorporación del prefiltro en los otros remolcadores como solución.

3.4.1 Predicción de impacto operacional

El resultado esperado del piloto se define como la reducción del código de limpieza ISO 4406 y del contenido de agua en el punto posterior al prefiltro respecto de la línea base, acompañada de la extensión del periodo de cambio de los filtros del motor. El mecanismo que sustenta esta expectativa es la restitución del diseño escalonado de la línea de tratamiento. La corrección de la configuración del purificador devuelve al equipo su eficiencia de separación de diseño, al operar con el anillo regulador seleccionado según la densidad medida del combustible y con el paquete de discos completo y correctamente armado. El prefiltro hidrociclónico retira el agua libre y los sólidos gruesos antes del filtro primario, y la estandarización de este último, con un elemento de 30 µm y una eficiencia mínima de retención del 98 %, restablece la etapa

intermedia ausente en la unidad piloto. En conjunto, la carga de contaminantes que alcanza los filtros del motor se reduce a un nivel controlable, de modo que el combustible entregado se espera dentro de los límites del fabricante aplicables a la unidad, con la tolerancia ampliada de la serie Wärtsilä 20 como referencia local del piloto y los criterios de aceptación por fabricante establecidos en la sección 3.3 como referencia para el resto de la flota, y con la densidad dentro de la banda de 820 a 860 kg/m³ del estándar de muestreo.

Sobre la frecuencia de cambio de filtros, la línea base cuantificada en la fase Medir registra frecuencias de cinco a siete veces la esperada para el filtro primario y de cuatro veces para el filtro interno en las unidades afectadas por contaminación severa, con cambios cada 160 horas de operación frente a la duración nominal de 500 horas que el fabricante de la serie de filtros más común de la flota define para condiciones ideales. La reducción de la carga de contaminantes desplaza el periodo de cambio hacia el intervalo del fabricante, y cada intervención evitada reduce no solo el costo directo del consumible, sino también la carga sobre la tripulación, la probabilidad de error de instalación y el riesgo de ingreso de aire a la línea de succión asociado a la apertura del sistema. Se entrega la siguiente tabla definiendo el cambio en las métricas claves definidas en la fase controlar de la metodología:

Tabla 2: Cambios esperados en base a las métricas establecido en la fase controlar de la metodología DMAIC. Autor: Victor Frederico. Elaborado con información levantada de la empresa afiliada a la memoria.

Métrica	Cambio esperado	Resultado buscado
Conteo de partículas	Reducción del número de partículas de los 3 tamaños establecidos por la norma ISO 4406 medido en punto de muestreo periódico.	Alcanzar mínimo el estándar ISO 18/16/13.
Cantidad de agua	Reducción del total de agua en el combustible	Alcanzar meta establecida de máximo 200 ppm de agua en la mezcla.

	medido en punto de muestreo periódico.	
Perido de cambio de filtros primarios	Aumentar el periodo de cambio de filtro primario al valor recomendado por el fabricante.	Aumentar el periodo de cambio al implementar cambio de proceso o mejora en la línea de tratamiento.

La proyección económica se construye sobre los desperdicios cuantificados en la fase Medir, que totalizan 2.102.000 USD anuales, equivalentes a unos 10.500 USD por remolcador al año. El sobreconsumo de filtros primarios e internos, valorizado en 112.000 y 200.000 USD anuales respectivamente, junto con la desviación del presupuesto correctivo de 50.000 USD, corresponde a un impacto directo, pues responden de manera inmediata a la reducción de la carga de contaminantes y a la corrección de la configuración de los equipos. El capital inmovilizado en repuestos de emergencia, de 240.000 USD, se libera en la medida en que la trazabilidad del sistema devuelve confianza en los intervalos del fabricante. Los componentes de mayor magnitud, los eventos catastróficos con overhaul de motor y la indisponibilidad por falla, valorizados en 700.000 y 600.000 USD anuales, son de naturaleza probabilística: el estándar no elimina el evento individual, sino que reduce su frecuencia esperada al cerrar la brecha de detección identificada en el análisis de modos de falla, por lo que su captura se proyecta en el mediano plazo y se verificará mediante el conteo anual de eventos y de días de indisponibilidad definidos en el plan de medición. Esta predicción se convierte en resultado medido cuando el muestreo del tercer trimestre de 2026 y el registro acumulado de cambios de filtro alimenten las cartas de control definidas a continuación.

3.4.2 Cartas de control para contaminantes y filtros

El monitoreo de los resultados del sistema se agrupa en tres familias de cartas de control, definidas en el plan de control de la fase Controlar. Las dos primeras corresponden a cartas de Shewhart para el conteo de partículas y el contenido de agua del diésel, construidas por remolcador sobre los resultados del muestreo periódico y contrastadas contra los límites de especificación del fabricante de cada unidad, con los códigos ISO 18/16/13 para el conteo de partículas y el máximo de 200ppm de agua como límites superiores en las unidades de alta velocidad. En una primera etapa las cartas operan contra estos límites de especificación y a medida que cada unidad acumule historial, la caracterización estadística permitirá establecer además los límites naturales del proceso de cada remolcador, distinguiendo la variación propia del suministro local de las señales de deterioro del sistema de tratamiento. Una medición fuera de límite activa el plan de contingencia correspondiente: la verificación de la configuración y estado del purificador y filtro, del prefiltro cuando corresponda, y la revisión del suministro.

La tercera familia corresponde al gráfico I-MR del periodo de cambio de los filtros, como indicador temprano de la carga de contaminantes. Su insumo es el registro obligatorio que el estándar incorpora a la orden de trabajo de cada cambio de filtro primario en la plataforma de gestión del mantenimiento: la fecha de la intervención, el horómetro del motor, las horas de servicio del elemento retirado, la lectura del vacuómetro inmediatamente antes del cambio y la marca, el modelo y el micraje del elemento instalado, en reemplazo del sistema actual que no exige reportar ninguno de los elementos anteriormente mencionados. El concepto central de esta carta es que cada remolcador constituye su propia línea base: dado que la duración del filtro depende directamente de la calidad del combustible local, dos unidades idénticas operando en países distintos presentarán periodos de cambio distintos, y la carta detecta los periodos que se salen del comportamiento normal de la propia unidad, permitiendo investigar su causa y, con historial suficiente, anticipar los cambios. Un acortamiento brusco del periodo activa como contingencia la ejecución de un muestreo y la revisión de la línea.

Finalmente, las variables de entrada del sistema, el porcentaje de purificadores correctamente configurados y el porcentaje de equipos con el plan de mantenimiento correctamente cargado en la plataforma, se controlan mediante gráficos P con meta de cumplimiento total, cerrando el lazo entre el estado de los equipos y la calidad del combustible que producen.

3.4.3 Nuevo estándar de muestreo periódico y verificación de equipos

El estándar de muestreo periódico extiende a toda la flota el mecanismo de caracterización validado en el diseño del piloto, en él se establece un único punto de muestreo. Este último punto corresponde a la purga del filtro primario, previo al ingreso del combustible al elemento filtrante, por corresponder a la referencia sobre la cual los fabricantes más representativos de la flota definen sus límites de calidad y por representar la condición real del diésel que recibe el motor tras el tanque de servicio y el tratamiento a bordo, para los remolcadores que posean un prefiltro instalado el punto se mantiene, de modo que los resultados permanecen comparables entre unidades y en el tiempo. La periodicidad se define trimestral, cargada como tarea estándar en la plataforma de gestión del mantenimiento, con lo que cada remolcador construye su historial de calidad de combustible y cada filial consolida una línea base propia que dimensiona la calidad del diésel de su mercado. El procedimiento de toma se formaliza en seis pasos, presentados en la Tabla 34 en el anexo, cuyo elemento central es la purga sacrificial y el barrido de combustible previos a la toma, que aseguran que la muestra represente la línea y no el sedimento acumulado en el vaso del filtro. El combustible de purga se descarta en el circuito de residuos oleosos y no retorna al tanque de servicio. El punto de muestreo previo al filtro primario en la purga del equipo responde a la necesidad de implementar un muestreo aplicable estándar a toda la flota, donde para los equipos que poseen una llave de muestreo posterior al tanque diario y previo al filtro primario se recomienda utilizarla, mientras que para los remolcadores que no la

posean deberán utilizar la purga, con proyección de instalar una llave dedicada al muestreo y migrar el punto de obtención del combustible.

Los resultados se evalúan contra límites de aceptación explícitos por ensayo:

- Un contenido de agua máximo de 200 ppm según ISO 12937 o ASTM D6304.
- Un conteo de partículas conforme al código ISO 4406 exigido por el fabricante de la unidad.
- Una densidad a 15 °C entre 820 y 860 kg/m³ según ISO 3675, ISO 12185 o ASTM D4052

Aceptándose normas equivalentes, y, únicamente para las filiales que no dispongan de la capacidad técnica de realizar un conteo de partículas, una cantidad de sólidos máxima de 10 mg/l según ASTM D6217 como criterio de respaldo, asumiendo su menor capacidad de caracterización, según los criterios de aceptación por fabricante y tecnología de inyección establecidos en la sección 3.3.

La verificación de equipos complementa el muestreo controlando las variables de proceso que producen esos resultados. Para el purificador, se verifica periódicamente y ante todo cambio brusco de suministro que el anillo regulador corresponda a la densidad del combustible a bordo y que el paquete de discos se encuentre completo y correctamente armado, junto con el cumplimiento del plan de mantenimiento cargado en la plataforma y la trazabilidad de las descargas de lodos en bitácora. Para el filtro primario, la lectura de referencia del vacuómetro con elemento nuevo debe ser inferior a 1 psi, y el criterio de cambio se fija en 4 psi, equivalentes a 8 inHg o 275 mbar, de modo que una lectura inicial elevada o que no evoluciona con las horas de operación se interpreta como señal de un problema de instalación. Para el prefiltro, cuando se encuentre instalado, la verificación comprende el cumplimiento de sus dos rutinas de mantenimiento, la purga cada 30 días o cuando la alarma de agua lo indique y el mantenimiento profundo cada 180 días, reducido a 60 en caso de contaminación excesiva. El control del cumplimiento del estándar completo queda transferido al equipo de confiabilidad y digitalización del corporativo, con horizonte de despliegue en el cuarto trimestre de 2026.

3.4.4 Criterio de evaluación para la instalación del prefiltro en la flota

La incorporación del prefiltro no constituye una instalación transversal a la flota, sino el último escalón de una secuencia de acciones las cual determinaron previamente que el sistema actual correctamente configurado, mantenido y operado no es suficiente para lidiar con los contaminantes que ingresan junto al combustible. La lógica responde al diseño mismo del proyecto: el diagnóstico demostró que una parte sustancial de la brecha de calidad obedece a equipos mal configurados, planes de mantenimiento heterogéneos y filtros incorrectamente seleccionados, condiciones cuya corrección no requiere inversión en equipamiento adicional, por lo que instalar un prefiltro sobre un sistema no regularizado nubla la causa raíz y desplaza el costo de la solución sin garantizar su efecto. En consecuencia, un remolcador solo califica para evaluar la instalación del equipo cuando, habiendo verificado la configuración y operación de su purificador, regularizado su plan de mantenimiento, estandarizado sus filtros y ejecutado la limpieza del tanque diario, sus resultados de muestreo persisten fuera del estándar definido en la subsección anterior.

Esta secuencia se formaliza en el árbol de decisiones presentado en la Ilustración 14, que se alimenta de los resultados del muestreo periódico. Cuando la unidad cumple el estándar de conteo de partículas y contenido de agua, no se requieren acciones correctivas. Ante un incumplimiento, la evaluación recorre en orden las causas corregibles del sistema existente:

- la presencia del purificador a bordo, cuya ausencia en un mercado que lo requiere genera directamente el requerimiento de instalar uno
- Correcta configuración y operación de purificador, cuya desviación se resuelve configurando el equipo y capacitando al personal
- Limpieza del tanque diario dentro del último año, cuya omisión se resuelve ejecutando la limpieza y regularizando el plan en la plataforma de gestión del mantenimiento condición que además constituye un prerrequisito del árbol,

pues sin ella los sólidos resuspendidos del tanque contaminan la línea e invalidan la atribución de causas.

La efectividad de cada acción correctiva se corrobora contrastando el siguiente resultado contra el muestreo previo. Si el sistema se encuentra regularizado y el incumplimiento no se repite en un segundo muestreo, el evento se trata como aislado, repitiendo la medición en el periodo siguiente y verificando la calidad de la toma de muestra. Solo la persistencia del incumplimiento con el sistema regularizado activa un análisis a una causa externa: cuando más remolcadores de la misma filial presentan el problema, la evaluación se dirige al suministro, verificando con el proveedor la calidad del diésel entregado y resolviendo mediante un análisis tecnoeconómico entre la compra de combustible de mayor calidad, cuando el mercado lo permite, y la instalación de una mejora en la línea; cuando el problema es exclusivo de la unidad, la comparación de su purificador contra remolcadores del mismo suministro permite identificar e implementar puntos de mejora del proceso, y solo su ausencia conduce al análisis tecnoeconómico de instalación de la mejora. Para dicho análisis, el piloto entrega las referencias de costo: 8.800 USD por el equipo y su instalación y entre 200 y 450 USD por muestra de verificación, magnitudes que se contrastan contra los 10.500 USD anuales de desperdicio promedio por remolcador cuantificados en la línea base. El árbol convierte así la instalación del prefiltro en una decisión trazable y basada en métricas, coherente con el principio del proyecto de intervenir sobre causas medidas y no sobre síntomas.

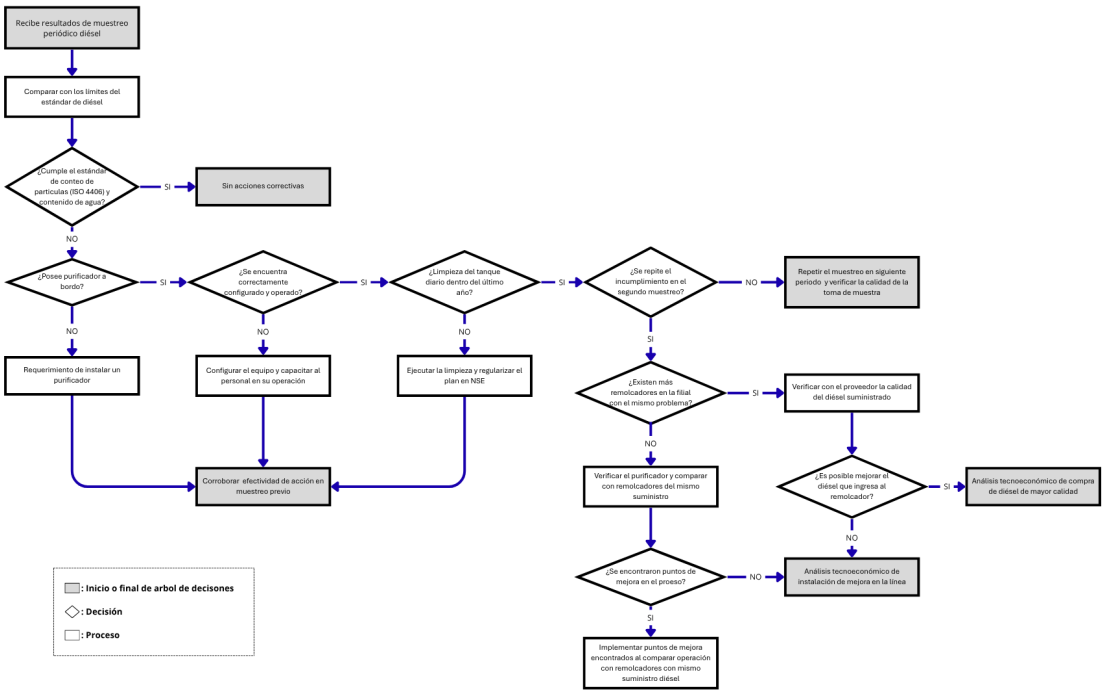


Ilustración 14: Árbol de decisiones para la instalación de una mejora en la línea de purificado y filtrado diésel de un remolcador. Autor: Victor Frederico. Versión ampliada adjunta en anexo. Elaborado con información levantada de la empresa afiliada a la memoria.

El nuevo estándar de control cierra el montaje experimental tomando los resultados del trabajo en una práctica permanente y transferible. La predicción de impacto operacional toma la expectativa del proyecto a la línea base cuantificada en la fase Medir, la agrupa y deja formulado el mecanismo por el cual esa predicción se convertirá en resultado medido. Las cartas de control instauran el monitoreo sistemático de las variables de salida y de proceso, con cada remolcador como su propia línea base, cerrando la brecha de detección que el análisis de modos de falla identificó como multiplicador del riesgo. El estándar de muestreo periódico y la verificación de equipos establecen la fuente de datos que alimenta ese monitoreo, con un punto de toma en relación a la referencia del fabricante, límites de aceptación explícitos y criterios objetivos de condición para cada etapa de la línea. Finalmente, el criterio de evaluación del prefiltro justifica la inversión de una nueva tecnología en la línea, convirtiendo la decisión en un proceso trazable y basado en métricas. Con ello, el capítulo completa la verificación del diseño metodológico del Capítulo 2 y entrega los elementos sobre los cuales el capítulo

siguiente discute los hallazgos, la validez de los resultados y sus implicancias operacionales para la flota.

4. DISCUSIÓN

El presente capítulo interpreta los resultados del montaje experimental desarrollado en el Capítulo 3. Mientras el capítulo anterior documenta qué se encontró y qué se implementó, la discusión aborda el porqué de los hallazgos, en qué medida las intervenciones realizadas responden a las causas raíz, qué tan representativos y generalizables son las medidas recomendadas y cuáles son sus implicancias y limitaciones para la flota. La sección 4.1 discute el diagnóstico del estado original de los equipos y la estandarización que se construyó en respuesta, correspondientes a las secciones 3.1 y 3.2, examinando los hallazgos del levantamiento y el impacto de las modificaciones aplicadas los purificadores. La sección 4.2 discute la implementación del piloto y el nuevo estándar de control, correspondientes a las secciones 3.3 y 3.4, evaluando la validez de los resultados frente a las causas raíz, la representatividad del muestreo como herramienta de diagnóstico de la cadena de tratamiento, las implicancias operacionales de extender la solución a la flota y los alcances y limitaciones de los hallazgos. Finalmente, la sección 4.3 aborda el seguimiento en el tiempo, discutiendo las condiciones bajo las cuales la mejora se sostiene más allá del horizonte del proyecto.

La discusión se desarrolla bajo una consideración relevante: los resultados de laboratorio del piloto se esperan para el tercer trimestre de 2026, fuera del periodo del presente trabajo, por lo que el análisis distingue en todo momento entre lo verificado empíricamente durante el proyecto, como el estado de configuración y mantenimiento de los equipos de la flota, y lo que queda formulado como predicción fundamentada con pendiente confirmación por medición.

4.1 Diagnóstico original de los equipos, hallazgos y estandarización de operación, configuración y mantenimiento.

La primera parte de la discusión examina el diagnóstico y respuesta correspondiente a la primera mitad del montaje experimental y los resultados. Revisando el estado en que se encontró la gestión de los equipos de tratamiento de la flota, desarrollado en las secciones 3.1 y 3.2, y la estandarización construida para corregirlo. La finalidad de la discusión no es repetir lo entregado en el capítulo 3, sino más bien interpretar su origen, pues de esa interpretación depende que la solución adoptada ataque la causa raíz.

4.1.1 Hallazgos originales.

El hallazgo central del diagnóstico es la alta dispersión sobre como se gestiona la línea para un mismo problema técnico. Para las 164 unidades analizadas bajo cuatro modelos predominantes de purificador, la plataforma de gestión del mantenimiento contenía 41 trabajos estándar diferentes para un mismo modelo de purificador, redactados en tres idiomas y con denominaciones no estandarizadas, coexistiendo incluso planes distintos para el mismo modelo dentro de una misma operación, con contenidos que difieren en periodos de acción y tareas. A ello se suma que ninguna operación comprobaba la configuración del equipo, de modo que el componente que determina la eficiencia de separación, el disco de gravedad seleccionado y el estado de los discos separadores, operaba sin verificación en toda la flota. El diagnóstico del tren de filtrado completa el cuadro: el 32 % de los filtros primarios y el 48 % de los filtros internos de las máquinas principales opera fuera del comportamiento de referencia del fabricante, con una alta correlación entre el comportamiento de los motores principales y el de los generadores, y con el registro de los cambios en bitácoras físicas que impiden la trazabilidad digital. La dispersión observada no responde a indisciplina de ejecución, los planes existen, se ejecutan y las tripulaciones los cumplen. En cambio responde a la creación local e histórica de planes sin referencia a la documentación del fabricante, de manera que cada operación resolvió el mismo problema con el conocimiento disponible en su

momento y ese conocimiento nunca se consolidó ni se contrastó contra la fuente técnica correcta. El problema es de gestión del conocimiento y no de conducta: las filiales ejecutaban con disciplina planes que no correspondían, sin referencia a la limpieza periódica del equipo, sobreprocesando algunos y subprocesando otros, y la rotación del personal erosionaba progresivamente el criterio original con que cada plan fue creado. Esta lectura es determinante para la solución, porque un problema de conducta se corrige con supervisión, mientras que un problema de conocimiento se corrige con una fuente única de referencia, trazable, enseñable y un mecanismo que la mantenga vigente, que es precisamente la forma que adoptó la estandarización.

El segundo elemento interpretativo es la asimetría del diagnóstico de filtrado. Que los filtros internos estén en mayor cantidad fuera del periodo de cambio recomendado que los primarios indica que la carga de contaminantes está atravesando las etapas previas y alcanzando la barrera final, que por diseño debiera operar como etapa de pulido y no de remoción gruesa. El síntoma es coherente con la quinta causa raíz validada en la fase Analizar, el excedente de contaminantes que alcanza el filtrado, y su detección mediante un levantamiento de periodos de cambio confirma a su vez la tercera causa: la ausencia de monitoreo del diésel a bordo hacía que la única evidencia disponible del problema fuera indirecta, a través del consumo de filtros. Una alta frecuencia de cambio de filtros no necesariamente tiene relación al diésel que consume el motor, pero si al nivel de contaminantes que se encuentra atravesando el sistema, esta evidencia vuelve impredecible el sistema sin un muestreo periódico, debido que no se conoce la eficiencia real del filtro, el cual debido a los altos niveles de contaminantes presentan una pérdida de eficiencia demostrada empíricamente en ensayos. En este sentido, el hallazgo más significativo del diagnóstico es la confirmación empírica de lo que el análisis de modos de falla anticipó: los cuatro modos de mayor riesgo comparten una detectabilidad mínima, de modo que la ausencia de línea base de calidad del combustible no era solo una carencia de información, sino una parte constitutiva del problema, pues volvía las fallas invisibles hasta su manifestación catastrófica.

4.1.2 Modificaciones realizadas en los purificadores e impacto.

La estandarización desarrollada anterior responde a los hallazgos previos. Para los purificadores, frente a las 41 configuraciones de plan se establece un plan único por marca construido desde los manuales actualizados de cada fabricante, que para los equipos GEA Westfalia se traduce en cinco trabajos estándar y para los modelos minoritarios en un plan genérico de cobertura mínima, todo emitido en versión bilingüe y cargado de manera transversal en la plataforma de gestión del mantenimiento. Dentro de los hallazgos se apreció una desconexión entre el plan y el uso real del equipo. Debido a eso se definen los dos regímenes de operación : el uso estándar con un mínimo de purificado semanal, el uso pesado para las unidades con tripulación permanente. Esto vuelven predecible la operación y permiten programar el mantenimiento por tiempo de funcionamiento o calendario, lo que llegue antes de acuerdo con el régimen. Se incorpora un método empírico para determinar la limpieza del bol separador, respondiendo al problema de sobre procesamiento o subprocesamiento que posee el equipo. Frente a los problemas de configuración del equipo se incorpora la verificación periódica del disco de gravedad y del paquete de discos como trabajo estándar acoplado al muestreo de diésel, de modo que todo cambio en la densidad del combustible suministrado gatilla la revisión de la vigencia de la configuración instalada.

El valor del estándar planteado se encuentra en primer nivel, a la distinción que establece entre lo que debe ser uniforme y lo que debe ser local. La referencia técnica, el contenido de las tareas y la estructura del plan se uniforman con lo recomendado y actualizado por el fabricante, porque en esa dimensión la variabilidad encontrada era ruido sin justificación técnica. En cambio, el régimen de uso asignado a cada unidad, la subconfiguración por tipo de aceite en los equipos Alfa Laval y, de manera más notable, el periodo de limpieza del bol separador, que no se fija de forma arbitraria, sino que se determina empíricamente según la cantidad de lodos que el equipo separa en cada filial, permanecen como parámetros locales. El estándar no niega la variabilidad real de los mercados de combustible, sino que la reconoce y la acota a los

parámetros donde es legítima, corrigiendo el defecto inverso del estado original, donde la variabilidad estaba precisamente en la dimensión que debía ser uniforme.

Para el tren de filtrado, la intervención responde a lo encontrado en el diagnóstico: qué filtro se instala y cuándo se cambia. Sobre la primera, el estándar de tecnología de filtro primario define una lista oficial por marca y modelo de motor, construida desde los requerimientos de los fabricantes, las recomendaciones de CIMAC y el criterio ingenieril según la tecnología de inyección, expresando el requisito como micraje más eficiencia mínima de retención y excluyendo los elementos sin eficiencia asegurada. La relevancia de formular el requisito de ese modo se debe a que el error diagnosticado operaba en ambas direcciones: unidades con elementos de una finura injustificada para una primera barrera, los cuales al utilizar una malla con estas características habilitan la saturación prematura, el arrastre de partículas retenidas y el riesgo de desgarro del medio, junto con resultar redundantes frente al filtro fino propio del motor. Unidades con elementos de ordenes de magnitud más gruesas a la recomendada, como el propio remolcador piloto, habilitan la saturación prematura del filtro secundario y entregan la ilusión de que la línea está funcionando, reduciendo la frecuencia de cambio del filtro primario, pero no solucionando los problemas, solamente agravándolos para el filtro secundario, el cual como se mencionó anteriormente debería poseer un rol de pulido fino, no grueso. Además, la lista única finaliza la práctica de comprar por criterio local repuestos "iguales al OEM" sin equivalencia de rating, cerrando la cuarta causa raíz validada. La separación del cambio de filtro primario y secundario en dos tareas independientes reconoce que ambos elementos operan en regímenes de presión distintos, separados por la bomba de combustible, por lo que el criterio de uno no puede gobernar al otro: el primario, que carecía de todo indicador de condición, lo adquiere mediante el vacuómetro instalado de forma permanente en la tubería de succión, con una lectura de referencia cercana a 1 psi con elemento nuevo, una zona de planificación del cambio y un criterio de reemplazo en 4 psi en que convergen los fabricantes más representativos de la flota, mientras que el secundario conserva su criterio existente de diferencial de presión del motor. Con ello, el cambio del filtro se desacopla uno del otro, deja de responder al calendario o a la experiencia y pasa a responder a la condición

real del elemento con un indicador propio de cada filtro, que es la única variable coherente en un contexto donde el nivel de contaminación del combustible difiere entre mercados. Finalmente, el registro obligatorio de cada intervención en la orden de trabajo convierte lo que antes era una bitácora física sin trazabilidad en el dato digital que alimenta las cartas de control por remolcador.

El impacto de la estandarización cierra las dos acciones priorizadas por la matriz de impacto y esfuerzo de la fase Medir, el mantenimiento desconocido de los purificadores sin plan en la plataforma y los purificadores mal configurados, que combinan impactos de 3,5 y 3,75 con los menores esfuerzos de intervención del conjunto, y ataca directamente los dos desperdicios definidos como logros tempranos, las altas frecuencias de cambio de filtros primarios y secundarios, validando la lógica de priorización de la metodología: el punto de entrada de mayor retorno del proyecto resultó ser una intervención en la gestión de los activos, sin inversión en equipamiento. Respecto a las causas raíz, este frente cierra tres de las cinco validadas: la configuración incorrecta del purificador, la ausencia de un plan estandarizado de mantenimiento y la selección inadecuada de filtros. El impacto estructural más profundo, sin embargo, es la resistencia a la rotación de personal: al formalizar el conocimiento en la plataforma y en la documentación del fabricante en lugar de las personas, el estándar corrige el mecanismo por el cual la dispersión original se generó, y no solo su estado acumulado. Con ello, la probabilidad de que la flota regrese a la condición diagnosticada deja de depender de la memoria de los individuos y pasa a depender del control de cumplimiento, transferido con responsable y horizonte definidos hacia el cuarto trimestre de 2026.

El levantamiento demostró que la degradación del sistema de tratamiento no se originaba en los equipos ni en las tripulaciones, sino en la ausencia de una referencia técnica única, que permitió la proliferación histórica de planes locales, configuraciones no verificadas y filtros seleccionados sin criterio, y que la carencia de monitoreo del combustible volvía todo ello invisible hasta su manifestación en el consumo de filtros

y en las fallas. La estandarización, en respuesta, no introdujo tecnologías nuevas, sino que restituyó esa referencia, acotando la variabilidad del purificador y dotando a la etapa de filtrado de un criterio de selección y un indicador de condición propios. Con ello quedan cerradas tres de las cinco causas raíz validadas y las dos acciones de mayor retorno de la priorización, mediante intervenciones de gestión de bajo esfuerzo y sin inversión en equipamiento, lo que constituye en sí mismo un hallazgo del trabajo: una fracción sustancial del problema de confiabilidad del purificado y filtrado de la flota era recuperable con la información que los fabricantes ya proveían. Es relevante especificar que la estandarización devuelve las condiciones para que los equipos alcancen su eficiencia de diseño, pero no mide por sí misma la calidad del combustible que producen ni el efecto sobre las causas restantes, el excedente de contaminantes y la ausencia de verificación del diésel. Esa medición corresponde al muestreo, al piloto y al estándar de control, cuya discusión se desarrolla en la sección siguiente.

4.2 Discusión de la implementación y su sistema de validación

La segunda parte de la discusión examina la mitad la implementación sobre el remolcador piloto y el nuevo estándar de control, desarrollados en las secciones 3.3 y 3.4. La discusión responde a: si las intervenciones realizadas responden efectivamente a las causas raíz validadas, qué tan representativo es el muestreo como herramienta de diagnóstico de la cadena de tratamiento y qué implica extender la solución al resto de la flota.

4.2.1 Validación de los resultados y causas raíz

El primer criterio para validar la implementación es corresponderlo al análisis realizado en la metodología, en la implementación se busca que cada intervención del piloto ataque una causa raíz específica de las validadas en la fase Analizar. La regularización del purificador en su plan de mantenimiento y la corrección de su configuración

responden a las dos primeras causas: la configuración incorrecta y la ausencia de plan estandarizado, el reemplazo del filtro primario de 340 µm por el elemento del micraje y la eficiencia requeridos por el fabricante responde a la cuarta: la selección inadecuada de filtros, la incorporación del prefiltro hidrociclónico responde a la quinta: el excedente de contaminantes que alcanza el filtrado y el protocolo de muestreo, junto con el estándar de control que lo perpetúa, responde a la tercera: la ausencia de monitoreo del diésel a bordo.

El segundo criterio es la validez del diseño de verificación, debido a que los resultados de laboratorio se esperan fuera del periodo del trabajo, es importante recalcarlo como un pendiente esencial para comprender el impacto del proyecto. Lo pendiente es la magnitud del efecto, no la existencia de las deficiencias corregidas, que el filtro instalado era un orden de magnitud más grueso que la recomendación, que la configuración del purificador no se verificaba y que la unidad carecía de etapa intermedia de filtración son hechos constatados durante la implementación, y su corrección se sustenta en la documentación técnica de los fabricantes y entidades globales expertas, no en el resultado futuro del laboratorio. Lo que la medición pendiente cuantificará es la magnitud de impacto en reducir los contaminantes que ingresa al motor. Para esa cuantificación, el proyecto plantea la comprobación por 3 medios complementarios: la comparación antes y después se realiza sobre los mismos puntos de la línea y en el mismo laboratorio: lo que garantiza la comparabilidad de los pares de datos, el criterio se conoce y se encuentra definido en el presente proyecto: lo que asegura que no se ajuste el estándar a posterior y los ensayos se ejecutan bajo normas reconocidas, con el conteo de partículas y el contenido de agua como variables de salida definidas desde el plan de medición.

Cabe destacar que si bien no se poseen los resultados del piloto, esto no impide las posteriores medidas del plan de control y validación de requerimiento de mejora sea aplicable. Si el muestreo posterior confirma la reducción del código ISO 4406 y del contenido de agua, la predicción de impacto de la sección 3.4 se convierte en resultado

medido y habilita la extensión ordenada de la solución. Si no la confirma, el propio sistema construido interpreta el hallazgo, el árbol de decisiones y los planes de contingencia dirigen la investigación hacia la calidad del suministro, la ejecución de la toma o el estado de los equipos, de modo que un resultado adverso no invalida el trabajo sino que habilita una siguiente iteración. Esta propiedad es consecuencia directa de haber implementado la solución como un sistema de control y no como una intervención puntual, y constituye la diferencia entre validar un resultado y construir la capacidad permanente de validarlo.

4.2.2 Representatividad del muestreo y diagnóstico de la cadena de tratamiento

Uno de los aspectos para que el muestreo sea representativo es en la selección del punto para realizar el procedimiento. La purga del filtro primario, previa al ingreso al motor, corresponde al punto sobre el cual los fabricantes más representativos de la flota definen sus límites de limpieza, de modo que los resultados se comparan contra la especificación en el mismo lugar donde se define la línea base, medir en la recepción del combustible o en puntos anteriores de la línea respondería otra pregunta, la calidad del suministro o del almacenamiento, pero no la que el problema exige, que es la calidad del diésel que ingresa al último tanque, el punto menos predecible. La cadena de puntos del piloto extiende esta lógica hacia el diagnóstico: al muestrear antes y después de las etapas de tratamiento, la acción caracteriza el aporte individual de cada una, convirtiendo la eficiencia asumida de purificador y prefiltro en un parámetro medido y propio de la unidad. El valor de implementar un muestreo en toda la línea al igual que lo realizado con el piloto residen en su naturaleza de diagnóstico completo del tren: ante un resultado fuera de estándar, la cadena permite localizar la etapa que no está aportando su remoción esperada, en lugar de tratar la línea completa como una caja negra.

La discusión debe reconocer, sin embargo, los límites de representatividad del esquema. Una muestra trimestral es una fotografía puntual de un proceso cuya entrada

varía por lote de suministro, de modo que el resultado individual confunde el estado del sistema con la calidad del combustible recibido en los días previos; el estándar amortigua esta limitación por acumulación, cada unidad construye su historial y cada filial su línea base, y por diseño del árbol de decisiones, que exige la persistencia del incumplimiento en un segundo muestreo antes de escalar la investigación, tratando el resultado aislado como potencialmente circunstancial. En segundo lugar, la calidad del dato depende de la ejecución de la toma, la purga sacrificial y el barrido previos existen porque una muestra tomada sobre el sedimento del vaso del filtro reporta la historia acumulada del elemento y no la condición de la línea, generando falsos incumplimientos, es por eso que el propio árbol contempla la verificación de la calidad de la toma como primera explicación de un resultado fuera del estándar requerido.

Frente a las limitaciones anteriormente mencionadas se agrega un indicador más: el registro de periodo de cambio de filtro. Entre muestras trimestrales, la duración del elemento filtrante opera como una señal continua de la carga de contaminantes, registrada sin costo adicional en cada orden de trabajo junto con la lectura del vacuómetro. La combinación de ambas fuentes es lo que constituye el diagnóstico de la cadena: el muestreo entrega la caracterización precisa pero discreta de la calidad, y el consumo de filtros la señal permanente pero menos precisa que el muestreo, de modo que la anomalía en cualquiera de las dos activa la verificación de la otra. Con ello, el sistema no depende de la representatividad perfecta de ninguna medición individual, sino de la coherencia entre mediciones independientes, que es un criterio de diagnóstico más robusto que cualquiera de sus componentes por separado.

4.2.3 Implicancias operacionales para la flota

La primera implicancia de extender la solución es de arquitectura: lo que se transfiere a la flota no es la configuración del piloto, sino el marco que lo construyo. Una flota heterogénea en marcas de motor, tecnologías de inyección, equipos de tratamiento y mercados de combustible no admite una solución única de equipamiento, y el trabajo

lo reconoce al estructurar la extensión en tres niveles de aplicación universal y un cuarto condicional:

- Los estándares de gestión, la configuración y el plan de mantenimiento del purificador junto con la selección del filtro por motor, aplican a toda unidad desde su carga en la plataforma de gestión del mantenimiento
- El muestreo periódico y el registro de cambios de filtro aplican a toda unidad como sistema de medición
- Las cartas de control aplican a toda unidad bajo el principio de que cada remolcador es su propia línea base
- Solo la incorporación del prefiltro queda condicionada al árbol de decisiones, como inversión que se justifica unidad por unidad cuando el sistema corregido resulta insuficiente.

El grueso del despliegue es trabajo de gestión sobre la plataforma y capacitación de tripulaciones, no instalación de equipos, por lo que su costo marginal por unidad es bajo y su ritmo se rige por la capacidad de las filiales de absorber los nuevos estándares, no el presupuesto de inversión.

La segunda implicancia es la priorización del despliegue. El muestreo periódico convierte la calidad del combustible de cada mercado en un dato comparable, y ese dato ordena naturalmente la extensión, para las operaciones cuyos mercados presentan la peor calidad de suministro, son las de mayor retorno esperado para la verificación temprana de configuración, la instalación de vacuómetros y la eventual evaluación de prefiltros, mientras que las operaciones de mercados con combustible dentro de especificación pueden desplegarse al ritmo del ciclo normal de mantenimiento. El mismo dato tiene un alto valor fuera del simple mantenimiento del equipo, para una filial que documenta sistemáticamente combustible fuera de especificación en la recepción adquiere evidencia contable para la gestión con sus proveedores, rama que el propio árbol de decisiones contempla al dirigir hacia el suministro la investigación de los incumplimientos colectivos, y que desplaza parte de la solución desde el tratamiento a bordo hacia la compra, donde el costo de corregir es menor.

La tercera implicancia exige aclarar qué representa el piloto y qué no. La brecha del Tarqui responde a la línea de tratamiento y no a la exigencia de su motor: la serie Wärtsilä 20, de media velocidad, admite un filtrado primario relativamente grueso y presenta una mayor holgura para tolerar contaminantes, de modo que la unidad fallaba aún con un motor de ese estilo porque su línea estaba severamente desvirtuada, con el filtro un orden de magnitud más grueso que la recomendación y el purificador sin verificación. La extensión hacia las unidades de alta velocidad con inyección de alta presión, Caterpillar y MTU, modifica las exigencias: sus líneas de tratamiento presentan una mayor capacidad para retener partículas finas, pero sus motores exigen códigos de limpieza ISO 18/16/13, márgenes sustancialmente más estrictos. Una desviación moderada del sistema de tratamiento para un motor de alta velocidad moderno tiene mayores consecuencias en el correcto funcionamiento y la vida útil del activo. La implicancia es que el estándar no pierde relevancia en las unidades modernas de la flota, sino que la aumenta: a mayor exigencia de inyección, menor es la desviación de tratamiento admisible, y mayor el valor de la verificación.

La cuarta implicancia es económica y de logística de repuestos. Las referencias de costo del piloto, 8.800 USD por el equipo prefiltro instalado y entre 200 y 450 USD por muestra, dimensionan un despliegue cuyo costo es marginal frente a los 10.500 USD anuales de desperdicio promedio por remolcador: el muestreo trimestral de una unidad cuesta al año una fracción menor de ese desperdicio, y el prefiltro se justifica en solo un año, incluso capturando solo parcialmente el sobreconsumo de la unidad donde se instale, sin considerar su efecto sobre el riesgo catastrófico. El cambio por condición, a su vez, modifica la lógica de abastecimiento, reemplaza el calendario rígido por un criterio de condición y crea un historial propio en cada unidad, la demanda de elementos filtrantes deja de ser un supuesto uniforme y pasa a ser un dato por remolcador, lo que permite dimensionar los stocks locales sobre consumo real, presionando a la baja el capital inmovilizado en repuestos de emergencia que la línea base valorizó, y la lista única de filtros por motor habilita la negociación consolidada de compras que la alta dispersión anterior impedía.

La discusión de esta segunda parte permite afirmar la validez técnica del trabajo con sus términos precisos. Cada intervención responde a una causa raíz específica del análisis y dirige el curso de acción a acciones futuras entregando claridad y control sobre la línea de tratamiento. El muestreo es representativo por diseño, al medir donde la especificación del fabricante aplica y al sostener su diagnóstico en múltiples mediciones, entrega una visión precisa del estado del sistema, a esto se le suma una señal continua del consumo de filtros indicando el comportamiento del sistema fuera de los periodos de muestreo. La extensión a la flota es viable por arquitectura, porque lo transferible son estándares de gestión y un sistema de medición de bajo costo marginal, con la inversión en equipamiento acotada al escalón final de un árbol de decisiones que la justifica caso a caso, con retornos que la propia línea base de desperdicios dimensiona.

4.3 Seguimiento en el tiempo

La discusión final aborda el valor del trabajo después de su cierre. A diferencia de una intervención puntual, cuyo beneficio es acotado a la ejecución e impacto del suceso, lo construido es un sistema de control cuyo producto, la trazabilidad, las líneas base y la capacidad de decisión, solo existe si el sistema opera de manera sostenida, generando trazabilidad e historia. Por ello el cierre del proyecto no transfiere únicamente documentos, sino una gobernanza con roles definidos: la documentación, la instalación de equipos, la toma y análisis de muestras quedan bajo el equipo de confiabilidad y digitalización del corporativo, la creación de tareas y su control bajo el área de planes de mantenimiento del equipo de ingeniería, y la capacitación del personal bajo cada filial, con horizonte de despliegue a finales de 2026. El hito crítico de esa transición es la ejecución del primer ciclo trimestral de muestreo en toda la flota, porque es el evento que convierte el estándar en dato: sin ese primer ciclo las cartas de control carecen de puntos, las líneas base por filial no existen y el árbol de decisiones no tiene entrada sobre la cual operar.

El segundo eje del seguimiento es la maduración del propio sistema de control con la acumulación de historial. En su primera etapa las cartas operan contra los límites de especificación de los fabricantes, que es lo único disponible sin datos propios, al acumular ciclos de muestreo, cada unidad adquiere sus límites naturales de proceso y las cartas ganan la capacidad de distinguir la variabilidad normal del suministro local, mientras el registro de cambios de filtro construye el periodo característico de cada remolcador y habilita la anticipación de las intervenciones. El seguimiento debe administrar, además, una limitación logística del proceso de muestreo, el ensayo de laboratorio no es instantáneo, por lo que la retroalimentación llega con desfase, en ese intervalo, la señal continua del consumo de filtros y la lectura del vacuómetro son las variables que sostienen la vigilancia, lo que refuerza la disciplina de su registro como condición de operación del sistema completo.

El tercer eje son los desarrollos que el cierre dejó formulados y que el seguimiento debe resolver. El primero es el estándar de limpieza del tanque diario, prerrequisito declarado del árbol de decisiones, cuya implementación enfrenta una barrera logística real: la limpieza convencional exige la unidad detenida cerca de dos días, condición que la operación rara vez admite y que explica que la práctica se haya abandonado en gran parte de la flota. La modificación de la línea de retorno aplicada en una de las operaciones, que habilita la limpieza de un tanque mientras la unidad opera alimentada por el otro, quedó identificada como la solución candidata a evaluar, y su adopción removería la causa operacional del incumplimiento en lugar de exigir disciplina contra la logística, en coherencia con el criterio de diseño de todo el trabajo. El segundo es la consolidación de las líneas base por filial, que además de ordenar el despliegue interno habilita la rama externa del árbol, la gestión con proveedores sobre evidencia contable, donde parte del problema puede resolverse a menor costo que a bordo. El tercero es la ejecución de los análisis tecno económicos de mejora en la línea que el árbol genere a medida que la trazabilidad identifique las unidades que califican a una mejora, comenzando por la lectura de los resultados del propio piloto.

El riesgo de largo plazo del trabajo no es técnico sino de gestión. Lo obtenido en la sección 3.1 no se originó en una decisión errada sino en la erosión gradual de la referencia técnica por rotación y creación local de conocimiento, y ese mecanismo no desaparece con la estandarización, tales condiciones se mantienen latentes en el personal que opera y existe el riesgo de reaparecer si el control de cumplimiento se relaja, con la diferencia de que ahora los gráficos P de las variables de entrada lo harían visible antes de que se manifieste en los resultados. Cada ciclo trimestral agrega poder de discriminación a las cartas, precisión a las líneas base y fundamento a las decisiones del árbol, de modo que el sistema es más valioso mientras más tiempo opera, inverso a lo presente en la flota, donde el paso del tiempo degradaba el conocimiento.

El seguimiento en el tiempo cierra la discusión, entregando los argumentos de un sistema cuyo valor aumenta después de su entrega. La transferencia quedó estructurada con roles, responsables y un hito crítico identificado, el primer ciclo trimestral de muestreo, que convierte los estándares en datos. La maduración del sistema quedó trazada desde los límites de especificación del fabricante hacia los límites naturales de cada unidad, con la evidencia de la literatura respaldando que los intervalos ideales deben ajustarse con datos operacionales propios, y los desarrollos pendientes quedaron formulados con responsables identificados, de modo que el seguimiento no hereda problemas abiertos sino decisiones preparadas. La discusión del capítulo describe tres escalones que juntos abordan los diversos pasos para afrontar el problema inicial: la sección 4.1 mostró cómo el trabajo restituyó la referencia técnica que la flota había perdido, la sección 4.2 cómo construyó la capacidad de medir y decidir sobre esa referencia, y la presente sección cómo esa capacidad se sostiene y se aprecia con el tiempo.

CONCLUSIÓN Y RECOMENDACIONES

El presente capítulo cierra el trabajo de título respondiendo sus objetivos y entrega recomendaciones. La sección 5.1 presenta las conclusiones generales que responden el objetivo general del trabajo, la sección 5.2 agrupa las conclusiones específicas asociadas a cada objetivo específico, desarrolladas a lo largo del documento, y la sección 5.3 formula las recomendaciones sobre los aspectos que exceden el alcance del presente trabajo y las acciones futuras que se sugieren a partir de sus resultados.

Conclusiones generales

El objetivo general del trabajo fue proponer mejoras que aumenten la confiabilidad del sistema de purificado y filtrado diésel hacia los motores de remolcadores marítimos, integrando estrategias de mantenimiento, operación y una nueva tecnología, con el fin de entregar un diésel que cumpla las condiciones de pureza que requiere el motor. El proyecto logro el objetivo y entregó un sistema de control completo para la línea de tratamiento de combustible, compuesto por estándares de operación, configuración y mantenimiento anclados a la documentación de los fabricantes, un piloto implementado sobre una unidad representativa que incorpora una nueva tecnología de prefiltrado, y un estándar de control permanente que instala la capacidad de medir, decidir y sostener la calidad del combustible en el tiempo.

Se concluye que el problema de confiabilidad del sistema no obedecía a una causa única ni a una deficiencia de los equipos, sino un desgaste gradual de las referencias técnicas en la flota: la rotación del personal, criterios heredados al adquirir una filial y la creación local de conocimiento produjeron una dispersión que dejó a los purificadores operando con configuraciones no verificadas durante años, a los filtros seleccionados sin criterios de equivalencia y a la calidad del combustible entregado al motor como una variable no medida. La aplicación de la metodología DMAIC permitió transformar ese problema difuso, visible únicamente a través de sus consecuencias

catastróficas, en cinco causas raíz validadas por la convergencia de herramientas independientes, y dirigir cada intervención hacia una causa medida.

Cuantitativamente el trabajo se origina en los eventos catastróficos del período 2024–2025, con pérdidas documentadas superiores a 810.000 USD, y construyó sobre ellos una línea base que cuantifica los desperdicios asociados al problema en 2.102.000 USD anuales, equivalentes a unos 10.500 USD por remolcador al año. Frente a esa magnitud, la inversión del piloto resultó acotada, con 8.800 USD para el prefiltro hidrociclónico y costos de muestreo entre 200 y 450 USD por muestra, lo que sitúa el retorno esperado en un valor favorable, incluso bajo capturas parciales de los desperdicios mencionados por el proyecto.

A diferencia de una intervención puntual, cuyo beneficio se agota en su ejecución, el sistema construido aumenta su valor con el tiempo, cada ciclo de muestreo agrega poder de discriminación a las cartas de control, precisión a las líneas base y fundamento a las decisiones del árbol, invirtiendo la dinámica que originó el problema, donde el paso del tiempo degradaba el conocimiento.

Conclusiones específicas

Las conclusiones específicas responden los cuatro objetivos específicos del trabajo, donde cada una de ellas fue desarrollada a lo largo del documento.

Respecto del primer objetivo específico, el diagnóstico del estado actual de los sistemas de purificación y filtrado desarrollado en la sección 3.1 concluye que la flota operaba sin una referencia técnica común. El levantamiento identificó hasta 41 configuraciones distintas de tareas de mantenimiento para un mismo modelo de purificador entre las filiales, equipos que conservaban la configuración de fábrica de hace diez o veinte años pese al cambio de las propiedades del diésel en ese período, la existencia de unidades sin plan de mantenimiento cargado en la plataforma de gestión del mantenimiento y, como hallazgo transversal, que ningún remolcador había verificado el disco de gravedad de su purificador, lo que implica una eficiencia de separación desconocida o

reducida respecto del valor nominal en toda la flota. Para los equipos de filtrado, el diagnóstico concluyó que la selección se realizaba sin criterios de equivalencia definidos, admitiendo repuestos declarados como equivalentes al original sin correspondencia verificada de micraje ni eficiencia. La discusión de la sección 4.1 permite concluir que esto se debió a una erosión gradual de la referencia técnica por la rotación del personal y la creación local de conocimiento, conclusión que define la naturaleza del problema como una falla de gestión del conocimiento técnico y no como una deficiencia de equipamiento.

Respecto del segundo objetivo específico, la estandarización desarrollada en la sección 3.2 concluye que es posible reconstruir la referencia técnica perdida desde la documentación de los fabricantes y el contexto operacional levantado. Se establecieron los estándares de operación, configuración y mantenimiento preventivo para los cuatro modelos de purificador dominantes en la flota, con la verificación del disco de gravedad según la densidad medida del combustible y del armado del paquete de discos como puntos críticos, y se definió el estándar de filtro primario requerido por marca y modelo de motor, restituyendo el diseño escalonado de filtrado exigido por los fabricantes. La discusión de la sección 4.1 concluye que el valor de esta estandarización no se encuentra solamente en el mantenimiento, permite la negociación consolidada de compras al utilizar un repuesto común por modelo de motor, y el cambio de filtros por condición reemplaza el calendario rígido por un criterio medible, convirtiendo la demanda de elementos filtrantes en un dato propio de cada remolcador sobre el cual dimensionar los stocks locales.

Respecto del tercer objetivo específico, la implementación del piloto desarrollado en la sección 3.3 concluye que la unidad seleccionada, el remolcador Tarqui, concentra las condiciones que el proyecto busca resolver, por su historial de fallas, la debilidad estructural de su línea de tratamiento y la calidad deficiente del combustible de su mercado, lo que valida su representatividad como banco de prueba. La intervención recorrió la línea completa de tratamiento, con la regularización del purificador en su mantenimiento y configuración, la corrección del filtro primario hacia el micraje y la

eficiencia requeridos, y la incorporación del prefiltro hidrociclónico como etapa complementaria de separación. La implementación de un protocolo de muestreo en cadena, que al medir antes y después de cada etapa convierte la eficiencia asumida del sistema en un parámetro medido y propio de la unidad. Los resultados de laboratorio del piloto se esperan para el tercer trimestre de 2026, fuera del período del presente trabajo. La discusión de la sección 4.2 concluye tener resultados del piloto pendientes no compromete la validez de lo construido, porque el sistema posee la capacidad ce interpretar cualquier resultado: una mejora confirmada convierte la predicción en resultado medido y habilita la extensión de la solución, mientras que un resultado adverso activa los planes de contingencia y dirige la investigación hacia la etapa responsable y habilita la validación de otra solución planteada, de modo que el piloto entrega la capacidad permanente de validar y no únicamente un resultado puntual, si no que genera un plan de medición y validación para otras soluciones que se pueden buscar implementar a futuro.

Respecto del cuarto objetivo específico, el nuevo estándar de control desarrollado en la sección 3.4 concluye la exigencia de un sistema de medición y decisión permanente, materializado en tres componentes. El primero son las cartas de control, con cartas de Shewhart para el conteo de partículas y el contenido de agua contrastadas contra los límites de especificación de cada fabricante, el gráfico I-MR del período de cambio de filtros como indicador temprano de la carga de contaminantes entre muestreos, y los gráficos P sobre las variables de entrada del proceso. El segundo es el estándar de muestreo periódico, cuya conclusión de diseño, discutida en la sección 4.2, es que el punto de toma debe ubicarse donde la especificación del fabricante aplica, en la purga del filtro primario previo al motor, porque medir en la recepción o en puntos anteriores respondería una pregunta distinta a la que el problema y los fabricantes exigen. El tercero es el árbol de decisiones para la instalación del prefiltro, que convierte la incorporación de nueva tecnología en una decisión trazable y basada en métricas, coherente con el principio del proyecto de intervenir sobre causas medidas y no sobre síntomas. Finalmente, las secciones 4.2 y 4.3 permiten concluir que la extensión de la solución a la flota es viable, porque lo transferible son estándares de gestión y un

sistema de medición de bajo costo marginal, con la inversión en equipamiento acotada al escalón final del árbol, y que la transferencia quedó estructurada con roles y responsables definidos, con el primer ciclo trimestral de muestreo como hito crítico que convierte el estándar en dato.

Recomendaciones

Las recomendaciones se ordenan desde el cierre inmediato del trabajo hacia su proyección. En el corto plazo, se recomienda incorporar los resultados de laboratorio del piloto, esperados para el tercer trimestre de 2026, cerrando la comparación contra la línea base, y ejecutar el primer ciclo trimestral de muestreo en toda la flota, hito que convierte el estándar en dato y sin el cual las cartas de control carecen de puntos de operación. Consolidado ese primer ciclo, se recomienda construir las líneas base por filial, junto con ejecutar los análisis tecno económicos de las unidades que el árbol de decisiones identifique como candidatas a mejora. Antes de escalar el prefiltro más allá del piloto, se recomienda tramitar la aprobación ante Lloyd's Register utilizando el expediente técnico generado, gestión reconocida como fuera del alcance del presente trabajo. Se recomienda sostener el control de cumplimiento de los estándares mediante los gráficos P definidos, dado que el mecanismo de erosión que originó el problema permanece latente en la operación, y madurar las cartas de control desde los límites de especificación del fabricante hacia los límites naturales de cada unidad a medida que se acumule historial. Finalmente, se reconoce como limitación la plataforma actual de gestión de mantenimiento, por lo que se recomienda la evaluación de una plataforma que comunique gestión de activos con compras, esto con el objetivo de facilitar la trazabilidad de los consumibles utilizados por los remolcadores, junto a su periodo de instalación en la línea.MDO

BIBLIOGRAFIA

[1] SAAM S.A., «Memoria integrada 2025,» SAAM S.A., Santiago, Chile, 2025.

[2] L. Pardo Pinzón, «La República,» 21 Septiembre 2024. [En línea]. Available: https://www.larepublica.co/globoeconomia/ecuador-esta-en-medio-de-la-peor-crisis-hidrica-en-mas-de-seis-decadas-3958010.

[3] Mongabay Latam, «Balance ambiental de Ecuador: sequías y la amenaza de la minería ilegal marcaron el 2024,» 11 Diciembre 2024. [En línea]. Available: https://es.mongabay.com/2024/12/balance-ambiental-ecuador-sequias-amenaza-mineria-ilegal-marcaron-2024/.

[4] Agencia EFE, «Los generadores eléctricos escasean y se agotan en Ecuador para hacer frente a apagones,» 17 DIciembre 2024. [En línea]. Available: https://www.infobae.com/espana/agencias/2024/11/08/los-generadores-electricos-escasean-y-se-agotan-en-ecuador-para-hacer-frente-a-apagones/.

[5] G. Muñoz Peña, «INFORME DAÑOS SISTEMA INYECCION COMB CONTAMINADO ECUADOR,» SERVICIOS GM (Documento interno SAAM Towage), Santiago, Chile, 2025.

[6] Wärtsilä Corporation, «Common rail fuel injection rules the waves,» 25 Abril 2017. [En línea]. Available: https://www.wartsila.com/insights/article/common-rail-fuel-injection-rules-the-waves.

[7] J. Kech, M. Willmann y P. Gorse, «Common rail fuel injection: Key technology for clean and economical combustion,» MTU Friedrichshafen / Tognum Group, Friedrichshafen, Alemania, 2011.

[8] Caterpillar Inc., «Caterpillar machine fluids recommendations (SEBU6251-32),» Caterpillar Inc., Texas, Estados Unidos, 2025.

[9] Caterpillar Inc., «Diesel fuel and your engine,» Caterpillar Inc., Texas, Estados Unidos, 2011.

[10] J. Dujmovi´c, D. Gluji´, P. Kralj y V. Peli´, «Impact of Operational Configuration Onboard a Drillship on Main Generator Engine Subcomponents Interval and Maintenance Strategies,» Journal of Marine Science and Engineering, Basel, Switzerland, 2024.

[11] WinGD, «WinGD fuel guideline (Document ID: DTAA001522),» Winterthur Gas & Diesel, Winterthur, Suiza, 2024.

[12] C.-w. C. Hsieh y C. Felby, «Biofuels for the marine shipping sector,» IEA Bioenergy, Rotorua, Nueva Zelanda, 2017.

[13] Chevron Marine Products, «Everything you need to know about marine fuels,» Chevron Marine Products, Ghent, Belgium, 2026.

[14] International Maritime Organization (IMO), «Review of 2020 marine fuels quality,» International Maritime Organization (IMO), Londres, Reino Unido, 2021.

[15] R. Yadav, «Comparative Study of Marine Biofuels: MGO, HVO, and FAME,» SPECTRA FUELS, 2 Septiembre 2024. [En línea]. Available: https://www.spectrafuels.com/comparative-study-of-marine-biofuels-mgo-hvo-and-fame/.

[16] J. J. Stilwell, «Britannica,» Britannica Editors, 18 Marzo 2026. [En línea]. Available: https://www.britannica.com/technology/ship/Diesel.

[17] MTU Solutions, «MTU SERIES 4000,» MTU-Solutions, [En línea]. Available: https://www.mtu-solutions.com/seai/en/applications/yacht/system-solutions/engines/mtu-series-4000.html. [Último acceso: 23 Abril 2026].

[18] N. Blenkey, «Twenty years on, MTU Series 4000 is still a leader,» Marinelog, 26 Agosto 2016. [En línea]. Available: https://www.marinelog.com/news/twenty-years-on-mtu-series-4000-is-still-a-leader/.

[19] MTU Solutions, «Fluids and Lubricants Specifications A001061/45E,» MTU Solutions, Friedrichshafen, Alemania, 2024.

[20] Cummins, «Componentes del sistema de combustible para fabricantes de motores y equipos,» Cummins, [En línea]. Available: https://www.cummins.com/es-la/components/fuel-systems. [Último acceso: 23 Abril 2026].

[21] V. D. V. Ramos, «ESTUDIO, ANÁLISIS Y COMPARATIVA DE LOS MOTORES DIÉSEL MARINOS DE DOS TIEMPOS CON COMMON RAIL E INYECCIÓN ELECTRÓNICA,» Universidad Politécnica de Catalunya, Barcelona, España, 2016.

[22] Wartsila Corporation, «Common-rail injection system,» Wartsila Corporation, [En línea]. Available: https://www.wartsila.com/encyclopedia/term/common-rail-injection-system. [Último acceso: 23 Abril 2026].

[23] Caterpillar Inc., «Cat® Common Rail,» Caterpillar Inc., Texas, Estados Unidos, 2011.

[24] B. Mohan, W. Yang y S. k. Chou, «Fuel injection strategies for performance improvement and emissions reduction in compression ignition engines—A review,» Elsevier, Cuidad de Singapur, Singapur, 2013.

[25] WÄRTSILÄ, «WÄRTSILÄ 20 PRODUCT GUIDE,» Wärtsilä Marine Solutions, Helsinki, Finlandia, 2015.

[26] CIMAC International Council, «Design and operation of fuel cleaning systems for diesel engines,» CIMAC International Council, Frankfurt, Alemania, 2024.

[27] Alfa Laval Tumba AB, «Separator manual High speed separator MAB 103B-24,» Alfa Laval Tumba AB, Tumba, Sweden, 2019.

[28] Alfa Laval Tumba AB, «Instruction book High speed separator MAB 104B-14/24,» Alfa Laval Tumba AB, Tumba, Sweden, 2018.

[29] GEA Westfalia Separator Group GmbH, «Instruction manual OTC 2-02-107/ OTC 2-02-137,» GEA Westfalia Separator Group GmbH, Oelde, Germany.

[30] GEA Westfalia Separator Group GmbH, «Instruction manual OTC 3-02-137/OTC 3-03-137,» GEA Westfalia Separator Group GmbH, Oelde, Germany.

[31] The Council for Six Sigma Certification, «Six Sigma A Complete Step-by-Step Guide,» The Council for Six Sigma Certification, Washington, Estados Unidos, 2018.

[32] G. R. a. D. J. Z. Roderick A. Munro, «The Certified Six Sigma Green Belt Handbook Second Edition,» ASQ Quality Press, Milwaukee, Wisconsin, 2015.

[33] Lloyd's Register, «LR-RU-001 Rules and Regulations for the Classification of Ships, Part 5,» Regs4ships, Carmen, Mexico, 2025.

ANEXOS

Tabla 3: Definición del problema - 5W2H. Fuente: Victor Frederico, creado con información levantada de la empresa afiliada a la memoria, Planilla DMAIC facilitada por profesor Nelson Álvarez Campillay.

DEFINICIÓN DEL PROBLEMA - 5W2H - Contaminantes pesados		**Fecha:**	
Qué	¿Qué ocurrió?	Se han presentado una alta indisponibilidad, desviación del presupuesto planificado y altos costo en mantenimientos correctivos por fallas debido a combustible contaminado	
Quién	¿A quién le sucede el problema? ¿Quién Participa en el problema?	A los motores del remolcador, la línea de purificado y filtrado no entrega combustible en condiciones adecuadas	
Cómo	¿Cómo ocurre? ¿Tiene un patrón de ocurrencia?	El alto contenido de contaminantes causa desgaste en la bomba de alta presión e inyectores del sistema common rail. Es un desgaste progresivo constante.	
Dónde	¿En qué lugar ocurrió el problema?	En el motor principal y los motores generadores, más específico en la bomba de baja presión y en los inyectores de él.	
Cuándo	¿En qué momento ocurre el problema?	Constantemente progresivo	
Cuánto	¿Cuántos problemas? ¿Cuánto se está perdiendo?	Existen grandes eventos con causa raíz el combustible contaminado, hay 5 casos importantes documentados en los últimos 5 años. Se ha perdido cerca de 2 millones de dólares anuales.	
Por qué	¿Por qué es importante resolver el problema?	No se posee certeza del combustible que está alcanzando el motor, la línea de suministro no alcanza los parámetros actuales que solicita el motor. Es necesario un sistema actualizado a las necesidades modernas, que sea predecible y eficiente.	
Definir el problema:			
El ingreso de combustible contaminado a los motores ha afectado la disponibilidad de la flota, desviando el presupuesto de mantenimiento planificado para los remolcadores y generando un elevado gasto por mantenimiento correctivo en los equipos. La línea de purificado y filtrado de diésel no logra acondicionar el combustible según los estándares requeridos por estos motores, lo que causa un desgaste prematuro en las bombas de alta presión y los inyectores. Esta situación afecta a todos los motores de cada remolcador, provocando un desgaste progresivo que, en el peor de los casos, podría derivar en una falla catastrófica. Se han registrado 6 eventos críticos en los últimos dos años: en 2024 se alcanzaron desviaciones superiores al 200% en relación al mantenimiento planificado por remolcador, además de altos índices de indisponibilidad y pérdidas que superan los 2 millones de dólares anuales para la empresa. Actualmente, no se posee certeza sobre la calidad del combustible que está ingresando a los motores, los parámetros técnicos exigidos, ni las condiciones bajo las cuales se están realizando los mantenimientos.			

Tabla 4: Project Charter del trabajo de título. Fuente: Victor Frederico, creado con información levantada de la empresa afiliada a la memoria, Planilla DMAIC facilitada por profesor Nelson Álvarez Campillay.

<table>
<tr><td colspan="3">PROJECT CHARTER</td><td>Fecha:</td><td></td></tr>
<tr><td>PROYECTO:</td><td colspan="4">Purificado y Filtrado de Diésel</td></tr>
<tr><td colspan="3"><u>1. ENUNCIADO DE LA OPORTUNIDAD.</u></td><td colspan="2"><u>2. CASO DE NEGOCIO</u></td></tr>
<tr><td colspan="3">El ingreso de combustible contaminado a los motores ha afectado la disponibilidad de la flota, desviando el presupuesto de mantenimiento planificado para los remolcadores y generando un elevado gasto por mantenimiento correctivo en los equipos. La línea de purificado y filtrado de diésel no logra acondicionar el combustible según los estándares requeridos por estos motores, lo que causa un desgaste prematuro en las bombas de alta presión y los inyectores.

Esta situación afecta a todos los motores de cada remolcador, provocando un desgaste progresivo que, en el peor de los casos, podría derivar en una falla catastrófica. Se han registrado 6 eventos críticos en los últimos dos años: en 2024 se alcanzaron desviaciones superiores al 200% en relación al mantenimiento planificado por remolcador, además de altos índices de indisponibilidad y perdidas que superan los 2 millones de dólares anuales para la empresa. Actualmente, no se posee certeza sobre la calidad del combustible que está ingresando a los motores, los parámetros técnicos exigidos, ni las condiciones bajo las cuales se están realizando los mantenimientos.</td><td colspan="2">El ingreso de combustible contaminado al sistema de inyección de los motores principales y auxiliares de la flota de SAAM Towage ha generado, durante el período 2024-2025, eventos catastróficos recurrentes que comprometen tres dimensiones simultáneas del activo: la disponibilidad operacional de la flota, la ejecución del presupuesto de mantenimiento preventivo y el costo total del ciclo de vida de los motores afectados
.
La causa estructural del problema se encuentra en la línea de purificado y filtrado de diésel a bordo, que no acondiciona el combustible recibido en puerto a los estándares exigidos por las tecnologías de inyección common rail modernas.

El estado actual de información sobre el sistema impide gestionarlo con criterios técnicos. No existe línea base consolidada sobre la calidad del combustible que efectivamente ingresa a los motores, sobre las brechas entre las configuraciones del tren de tratamiento instaladas y las exigencias de los fabricantes de motor, ni sobre la disciplina operacional con que se ejecutan los mantenimientos del sistema. Esta opacidad convierte cada evento en un accidente aislado de difícil prevención y bloquea cualquier estrategia de mejora estructural a nivel de flota.</td></tr>
<tr><td colspan="3"><u>4. ALCANCE DEL PROYECTO</u></td><td colspan="2"><u>3. ENUNCIADO DE OBJETIVOS</u></td></tr>
<tr><td>Inicio del proceso:</td><td colspan="2">Lunes, 09 de marzo de 2026</td><td rowspan="3">Y1:</td><td rowspan="3">Proponer mejoras que busquen aumentar la confiabilidad del sistema de purificado y filtrado diésel hacia los motores dentro del remolcador marítimo, integrando estrategias de mantenimiento, operación y una nueva tecnología al sistema, con el fin de entregar un diésel que cumpla las condiciones de pureza que requiere el motor.</td></tr>
<tr><td>Final del proceso:</td><td colspan="2">Lunes, 03 de agosto de 2026</td></tr>
<tr><td colspan="2">Dentro</td><td>Fuera</td></tr>
<tr><td colspan="2" rowspan="2">El sistema de combustible diésel a bordo de los remolcadores, desde que entra al remolcador hasta que accede a los inyectores, esto incluye el tanque de sedimentación, purificador</td><td rowspan="2">Otros sistemas de fluidos del remolcador (lubricación, refrigeración, alimentación de aire). Tampoco se evaluarán los procesos de refinación,</td><td colspan="2">Especificos:</td></tr>
<tr><td>X1:</td><td>Diagnosticar el estado actual de los sistemas de purificación y filtrado de combustible.</td></tr>
</table>

centrífugo, Tanque de servicio, filtración primaria y secundaria. El alcance geográfico cubre los doce países de operación de SAAM Towage.	distribución y almacenamiento del combustible antes del punto de abastecimiento, que se asumen como condiciones de entorno no controlables.	X2:	Elaborar estrategias de operación estandarizada, correcta configuración y planes de mantenimiento preventivo para los purificadores.
		X3:	Implementar un plan piloto de las mejoras propuestas en una unidad representativa, aplicando el estándar operacional, correcto mantenimiento, configuración del purificador, y una nueva tecnología en el tren de filtrado.
		X4:	Generar el nuevo estándar de control para el sistema de purificado y filtrado diésel, mediante la validación del piloto propuesto, con la finalidad de aumentar la confiabilidad del sistema.

5. EQUIPO DE TRABAJO		**6. PLAN DEL PROYECTO**		Inicio:
Sponsor:	Marcelo Eduardo Verdugo Ubilla	Definir:	Se definn los 5W-2H, Proyect Charter, SIPOC, VOC, Analisis de interesados	Marzo 2026
Líder del Proyecto:	Victor Frederico Contreras	Medir:	Se identifican los desperdicios, Matriz de impacto, Arbol de Metricas, Plan de Medición, Formulación de metas	Marzo - Abril 2026
Equipo:	Victor Frederico Contreras	Analizar:	Se define el Ishikawa, 5 Porques, Matriz Causa y Efecto, AMFE, Listado de causas raiz validadas y Anova.	Abril - Mayo 2026
		Mejorar:	Descripción de acciones de Mejora, Matriz de pugh y Plan de Implementación.	Mayo - Junio 2026
Historiador:	Victor Frederico Contreras	Controlar:	Plan de Control, Estándares, Plan de Réplicas, Cierre y Reconocimiento	Junio - Julio 2026

Tabla 5: SIPOC del proyecto. Fuente: Victor Frederico, creado con información levantada de la empresa afiliada a la memoria, Planilla DMAIC facilitada por profesor Nelson Álvarez Campillay.

DIAGRAMA SIPOC							Fecha:	
Supplier (Proveedor)	**Inputs (entradas)**		**Process (Proceso)**	**Outputs (Salidas)**		**Customers (Clientes)**		
Proveedor	¿Cuáles son las Entradas?	¿Cuál es el requisito de especificación de la Entrada?		¿Cuáles son las Salidas?	¿Cuál es el requisito de especificación de la Salida?	Quién recibe el producto o servicio? Quién es mi Cliente.		
STIs	Mantenimiento equipos	Que se realice el mantenimiento de manera indicada	Inicio del Proceso	Calidad del combustible que ingresa al motor	Requisito especificado por OEM Cantidad de partículas: Caterpillar 18/16/13 MTU 18/17/14 Cantidad de Agua: 200 ppm o 0,02% v/v	Motor principal y generador		
Fuel Suppliers	MDO o MGO	Diésel bajo un mínimo de especificaciones por compra o ley		Frecuencia de eventos catastróficos	Minimizar, esperado 0 eventos por combustible contaminado	Filiales de la empresa y Equipo de ingeniería		
			Almacenado en Tanque General	Desviación del presupuesto de mantenimiento	Desviación menor a 20% del presupuestado	Filiales de la empresa		
				Disponibilidad operacional	Minimizar, meta a 2030 de 1% en todos los frentes	Filiales de la empresa y Equipo de ingeniería		
			Purificado					
			Almacenado en Tanque de Servicio					

			Filtrado Primario			
			Filtrado Secundario			
			Fin del Proceso			

Tabla 6: Voz del cliente. Fuente: Victor Frederico, creado con información levantada de la empresa afiliada a la memoria, Planilla DMAIC facilitada por profesor Nelson Álvarez Campillay.

VOZ DEL CLIENTE				Fecha:	
N°	**Cliente**	**Voz del Cliente (VOC)**	**Problemas del Cliente**	**Requerimiento Crítico del Cliente (CCR)**	**Ideas de Mejora**
1	Motores	Diésel en condiciones	Diésel no llega en condiciones	Especificaciones del diésel	Mejorar la capacidad del sistema mantenimiento más estrictos Cartas de control de parámetros de entrada
2	Purificador o filtro	Correctamente operado, mantenido y configurado	No existen procedimientos revisados y estandarizados para ellos. No se revisa que el equipo este correctamente configurado	Correcta operación del equipo Correcto mantenimiento para la operación adecuada Correcta configuración con comprobación periódica	Estándar de operación Estándar de Mantenimiento Corroboración periódica de la configuración del equipo

Tabla 7: Análisis de interesados del proyecto. Fuente: Victor Frederico, creado con información levantada de la empresa afiliada a la memoria, Planilla DMAIC facilitada por profesor Nelson Álvarez Campillay.

ANÁLISIS DE INTERESADOS		Fecha:	

N°	Rol del Interesado	Nombre	Firmemente en Contra	Moderadamente en Contra	Neutral	Apoya Moderadamente	Apoya Firmemente
			-2	-1	0	+1	+2
1	Gerente de Flota & Supply Chain	Alentue Pompei Frisari					XO
2	Subgerente de Ingeniería	Mauricio Gonzalo Pereyra Paiva					XO
3	Ingeniero Señor de Planes de Mantenimiento	Marcelo Eduardo Verdugo Ubilla					XO
4	Gerente de Mantenimiento Caribe	Victor Ramon Hurtado Hernández				X	O
5	Gerente Técnico Uruguay	Hernan Figueroa Sarraute			X		O
6	Gerente Mantenimiento Chile-Peru	Patricio Cabezon			XO		
7	Gerente de Flota Brasil	Ricardo Amaral			X	O	
8	Director de Mantenimiento Brasil	Yuri Sperka			X		O
9	Supervisor de Flota Brasil	Leonardo Tatagiba			X	O	
10	Director Técnico Canadá	Stuart Jones		X	O		
11	Super Intendente Ecuador	Jorge Monserrate				XO	
12	Jefe de Mantenimiento	Juan Carlos Tinoco Tinoco			X	O	
13	Inspector de Calidad Mexico	Jair Aquino Orta			X	O	
14	Gerente de Mantenimiento Mexico	Victor Raul Parra Marin			XO		

Tabla 8: Listado de desperdicios del proyecto. Fuente: Victor Frederico, creado con información levantada de la empresa afiliada a la memoria, Planilla DMAIC facilitada por profesor Nelson Álvarez Campillay.

LISTADO DE DESPERDICIOS				Fecha:	
N°	**Situación de desperdicio / Problema**	**Tipo de Desperdicio**	**Cuantificación del Desperdicio**	**Impacto Colateral**	**Costo anual del Desperdicio [$/año]**
1	Cambio de filtros primarios cada 160 horas de operación en unidades afectadas por contaminación severa	Sobre procesamiento + defectos	Frecuencia 5 a 7 veces la esperada	Carga adicional sobre tripulación Mayor probabilidad de error de instalación Riesgo de ingreso de aire al sistema Riesgo de peor rendimiento del filtro en su vida útil final	$112.000
2	Cambio de filtros internos cada 160 horas de operación en unidades afectadas por contaminación severa	Sobre procesamiento + defectos	Frecuencia 4 veces la esperada	Carga adicional sobre tripulación Mayor probabilidad de error de instalación Riesgo de ingreso de aire al sistema Riesgo de peor rendimiento del filtro en su vida útil final	$200.000
3	Eventos catastróficos con overhaul de motor	Defectos	1 a 2 eventos al año	Capacidad técnica externa contratada Deterioro de la curva de desgaste planificada Indisponibilidad del remolcador	$700.000
4	Indisponibilidad por Falla	Esperas	15 a 90 días por falla	Subcontratación de remolcadores de la competencia Exposición de marca al servicio de un tercero Deterioro de relación contractual con cliente	$600.000
5	Desviación del costo de mantenimientos correctivo	Defectos + Sobre procesamiento	1,5 veces mayor a lo planeado	Reprogramación forzada de mantenimientos en otras unidades Pérdida de credibilidad financiera del programa Decisiones de inversión postergadas	$50.000
6	Stock de repuestos de emergencia	Inventario	Juego completo extra de inyectores en el cada filial por tipo de motor	Capital inmovilizado Riesgo daños por almacenamiento Ocupación de espacio del remolcador	$240.000
7	Mantenimiento desconocido a los purificadores de la flota sin plan en la plataforma	Talento no utilizado + defectos	9 de 203 remolcadores	Imposibilita correlacionar el estado del purificador con eventos de contaminación posteriores Desconocimiento del estado del equipo	-

	de gestión del mantenimiento			Perdida de conocimiento al rotar personal	
8	Purificadores mal configurados	Defecto + Sobre procesamiento	Ningún remolcador ha verificado el disco de gravedad	Eficiencia de separación reducida frente al nominal del equipo. Saturación prematura de filtros primarios y secundarios. Mayor consumo de paquetes de discos y repuestos del purificador. Riesgo de ruptura del sello de agua.	$200.000
					$2.102.000

Tabla 9: Tabla de Impacto – Esfuerzo Fuente: Victor Frederico, creado con información levantada de la empresa afiliada a la memoria, Planilla DMAIC facilitada por profesor Nelson Álvarez Campillay.

MATRIZ DE IMPACTO	Fecha:	

ID	Desperdicios ("Dolores" o Problemas)	IMPACTO				PONDERACIÓN IMPACTO
		Seguridad	Cliente	Negocio	Otras Áreas	
D1	Alta frecuencia de cambio de filtro primario	1	4	2	3	2,5
D2	Alta frecuencia de cambio de filtro interno	1	5	3	3	3,0
D3	Eventos catastróficos con overhaul de motor	4	5	5	4	4,5
D4	Indisponibilidad por Falla	3	5	5	4	4,3
D5	Desviación del costo de mantenimientos correctivo	1	4	1	1	1,8
D6	Stock de repuestos de emergencia	1	2	1	2	1,5
D7	Mantenimiento desconocido a los purificadores de la flota sin plan en la plataforma de gestión del mantenimiento	4	5	3	2	3,5
D8	Purificadores mal configurados	3	5	3	4	3,8

ID	Desperdicios ("Dolores" o Problemas)	ESFUERZO				PONDERACIÓN ESFUERZO
		Tiempo implementación	Resistencia al cambio	Costo implementación	Costo Operación	
D1	Alta frecuencia de cambio de filtro primario	2	3	3	2	2,5
D2	Alta frecuencia de cambio de filtro interno	2	3	3	2	2,5
D3	Eventos catastróficos con overhaul de motor	4	3	4	3	3,5

D4	Indisponibilidad por Falla	4	3	4	3	3,5
D5	Desviación del costo de mantenimientos correctivo	4	3	2	2	2,8
D6	Stock de repuestos de emergencia	2	5	4	2	3,3
D7	Mantenimiento desconocido a los purificadores de la flota sin plan en la plataforma de gestión del mantenimiento	2	4	1	1	2,0
D8	Purificadores mal configurados	2	3	1	1	1,8

Tabla 10: Plan de medición del proyecto. Fuente: Victor Frederico, creado con información levantada de la empresa afiliada a la memoria, Planilla DMAIC facilitada por profesor Nelson Álvarez Campillay.

PLAN DE MEDICIÓN								Fecha:	
N°	**Métrica**	**X o Y**	**Definición Operativa**	**Tipo**	**Fuente**	**Tamaño de muestra**	**Responsable**	**Cómo se mostrarán los datos**	**MSA o Gage R&R**
1	Conteo de partículas en el diésel	Y	Indicador de cantidad de partículas no solubles en el diésel organizada por tamaño, se obtiene por muestreo el cual es enviado al laboratorio local. El muestreo se realiza en la línea de succión entre el tanque de servicio y los filtros primarios de los remolcadores piloto, se realiza antes de implementarse la mejora y después de implementarse, en el mismo laboratorio de la muestra anterior. Se realiza bajo el estándar ISO 4406 o ASTM D7619.	Continuo	Análisis de laboratorio	Todos los remolcadores	Clúster	Gráfico de control de Shewhart con límites de especificación de cada OEM	MSA Calibración
2	Cantidad de Agua requerida por el motor	Y	Indica la cantidad de agua en el diésel, se obtiene por muestreo el cual es enviado al laboratorio local. El muestreo se realiza en la línea de succión entre el tanque de servicio y los filtros primarios de los remolcadores piloto, se realiza antes de implementarse la mejora y después de implementarse, en el mismo laboratorio de la muestra anterior. Se realiza bajo el estándar ISO 12937 o D6304	Continuo	Análisis de laboratorio	Todos los remolcadores	Clúster	Gráfico de control de Shewhart con límites de especificación de cada OEM	MSA Calibración
3	Frecuencia de cambio de F.P.	Y	Es el indicador de frecuencia de cambio del filtro primario de los motores primarios del remolcador, el cambio de filtro se realiza cuando la diferencia de presión del filtro alcanza cierto umbral definido por operación. La frecuencia lo entrega el jefe de máquinas y se registra.	Discreto de conteo	Registros de bitácora llenada por jefes de Máquinas	Todos los remolcadores	Super Intendentes	Gráfico de control I-MR	MSA de Atributos

4	Frecuencia de cambio de F.I.	Y	Es el indicador de frecuencia de cambio del filtro interno de los motores primarios del remolcador, el cambio de filtro se realiza cuando la diferencia de presión del filtro alcanza cierto umbral definido por operación. La frecuencia lo entrega el jefe de máquinas y se registra.	Discreto de conteo	Registros de bitácora llenada por jefes de Máquinas	Todos los remolcadores	Super Intendentes	Gráfico de control I-MR	MSA de Atributos
5	Numero de eventos catastróficos por diésel contaminado	Y	Conteo total de incidentes clasificados como evento catastrófico por contaminación del combustible, donde evento catastrófico se define como cualquier intervención que requiera reacondicionamiento integral de bombas inyectoras, reemplazo del juego completo de inyectores u overhaul de motor, agregado por año calendario sobre los remolcadores.	Discreto de conteo	Información obtenida por el MOC (Maintenance and Operational Center)	Todos los remolcadores	MOC	Diagrama de Pareto	MSA de Atributos
6	Días de indisponibilidad por diésel contaminado	Y	Conteo total de días por accidente con diésel contaminado, donde evento catastrófico se define como cualquier intervención que requiera reacondicionamiento integral de bombas inyectoras, reemplazo del juego completo de inyectores u overhaul de motor, agregado por año calendario sobre los remolcadores. Esto entrega un indicador de la complejidad del accidente.	Discreto de conteo	Información obtenida por el MOC (Maintenance and Operational Center)	Todos los remolcadores	MOC	Run Chart	MSA de Atributos
7	Equipos bien configurados	X	Porcentaje de purificadores bíen configurados en la flota. Se confirma la cantidad correcta de discos separadores y la correcta selección del disco de gravedad para la correcta operación y eficiencia del equipo.	Continuo	Plataforma la plataforma de gestión del mantenimiento tarea completada	Todos los remolcadores	Jefe de Maquinas de Pilotos	Grafico de control P-Chart	MSA de Atributos
8	Mantenimientos correctamente realizados en equipos	X	Porcentaje de purificadores con correcto plan de mantenimiento, contabiliza el porcentaje de equipos con la tarea cargada en la plataforma de gestión del mantenimiento y con periodo correcto, sea configurado por	Continuo	Plataforma la plataforma de gestión del mantenimiento tarea completada	Todos los remolcadores	Equipo de Ingeniería	P-Chart porcentual	MSA de Atributos

			calendario o por horas de operación.						

Tabla 11: Formulación de metas SMART. Fuente: Victor Frederico, creado con información levantada de la empresa afiliada a la memoria, Planilla DMAIC facilitada por profesor Nelson Álvarez Campillay.

FORMULACIÓN METAS "SMART"	Fecha:	

N°	Criterio		Pregunta	Respuesta
1	***S***	**ESPECÍFICO**	¿Qué busca el proyecto?:	Entregar combustible con en las especificaciones adecuadas con la finalidad de minimizar indisponibilidad del remolcador, numero de mantenimientos correctivos y preventivos debido a fallas por combustible contaminado.
2	***M***	**MEDIBLE**	¿Cómo se medirá el Resultado?:	Con muestreo de diésel, estimaciones de periodo de cambio de filtro y purificadores correctamente mantenidos y configurados.
3	***A***	**ALCANZABLE**	¿Cuál es el resultado esperado?:	Que las medidas tomadas logren mejorar las especificaciones de diésel entregado.
4	***R***	**RELEVANTE**	¿A qué aspecto del Cliente/Negocio afecta?:	Indisponibilidad del remolcador, mantenimientos correctivos, gastos excesivos en consumibles.
5	***T***	**A TIEMPO**	¿En qué plazo?:	Mejora inmediata al aplicar mejoras, análisis a largo plago de efectividad en varios años.
6	Formulación: El Proyecto busca entregar combustible dentro de las especificaciones requeridas por el fabricante OEM. Esto se verifica midiendo los resultados con muestreo de diésel, verificando el periodo de cambio de filtros, mantenimientos y configuraciones correctamente realizadas. El proyecto mejorará las especificaciones de diésel entregado al motor, teniendo un impacto reduciendo la indisponibilidad del remolcador, mantenimientos correctivos y gastos de consumibles como filtros e inyectores. La mejora será inmediata, pero se deberá corroborar la efectividad con un análisis en los primeros años.			

Tabla 12: Los 5 Porqué del proyecto. Fuente: Victor Frederico, creado con información levantada de la empresa afiliada a la memoria, Planilla DMAIC facilitada por profesor Nelson Álvarez Campillay.

5 PORQUÉ	Fecha:	

X: Se comprobó que no es una causa
O: Causa comprobada

Problema o Causa Directa	1° ¿Porqué?	x/o	2° ¿Porqué?	x/o	3° ¿Porqué?	x/o	4° ¿Porqué?
Indisponibilidad del remolcador	Mantenimientos incorrectos	o	No existe un procedimiento estandarizado, el mismo equipo puede poseer 41 tareas distintas en la flota	o	No se actualiza el procedimiento y se cargo un plan de mantenimiento a la hora de instalar el equipo hace décadas en algunos casos	o	Se heredaron procedimientos de otra gestiones
	Filtros de repuesto con micraje incorrecto	o	Desconocimiento del equipo de compras, se fija en compatibilidad del filtro antes que, en parámetros como eficiencia, micraje o métodos de validación de rendimiento	o	No existe un estándar de control o filtros aceptables por tipo de motor a comprar e instalar.	o	
	Equipo mal configurado	o	El disco de gravedad no es el adecuado para el diésel de hoy	o	No se posee un procedimiento de verificación de la configuración del equipo	o	
	Ausencia de muestreo de diésel	o	Falta de conocimiento de estándar requerido por el OEM	o	No existe una tarea de muestreo periódico de diésel, imposibilitando hacer un diagnóstico del sistema	o	
	Excedente de contaminantes alcanzan las etapas	o	El equipo anterior no posee la capacidad adecuada de remover los contaminantes excedentes	o	La cantidad de contaminantes excede el diseño del equipo	o	Eventos de fuerza mayor fuerzan la utilización de combustible con alto nivel de contaminantes

Tabla 13: Matriz de causa y efecto para el proyecto. Fuente: Victor Frederico, creado con información levantada de la empresa afiliada a la memoria, Planilla DMAIC facilitada por profesor Nelson Álvarez Campillay.

MATRIZ DE CAUSA Y EFECTO			Fecha:	

			Salidas del Proceso ->	Calidad del combustible que ingresa al motor	Frecuencia de eventos catastróficos	Desviación del presupuesto de mantenimiento	Disponibilidad operacional	
			Importancia de la Salida ->	9	10	7	9	
N°	**Paso del Proceso**	**Variables del Paso de Proceso**		**Correlación**				**Total**
1	Almacenamiento tanque sedimentación	Largo periodo de almacenamiento de diésel		3	3	1	1	73
2	Purificación	Mantenimientos incorrectos		8	7	4	7	233
3	Purificación	Equipo mal configurado		9	8	2	8	247
4	Almacenamiento tanque de servicio	Excedente de contaminantes alcanzan las etapas		5	3	1	4	118
5	Filtrado primario	Equipos con filtraje incorrecto		8	6	4	5	205
6	Filtrado primario	Excedente de contaminantes alcanzan las etapas		9	9	5	9	287
7	Filtrado primario	Sin registro de cambio de filtros		1	1	9	1	91
8	Filtrado secundario	Sin registro de cambio de filtros		1	1	10	1	98

Tabla 14: Análisis AMFE del proyecto. Fuente: Victor Frederico, creado con información levantada de la empresa afiliada a la memoria, Planilla DMAIC facilitada por profesor Nelson Álvarez Campillay.

ANÁLISIS DE LOS MODOS DE FALLA Y SUS EFECTOS (AMFE)	Fecha:	

N°	Paso del Proceso	Función	Modo Potencial de Falla	Efecto Potencial de la Falla	SEVERIDAD	Causas Potenciales	OCURRENCIA	Controles actuales	DETECCIÓN	NPR
	¿Cuál es el paso del Proceso o la variable de entrada?	¿Cuál es la Función de este paso del Proceso?	¿De qué manera puede fallar?	¿Cuál es el efecto que provocaría esta falla?		¿Qué causas pueden provocar la falla?		¿Qué controles existen hoy para detectar la causa?		
1	Almacenamiento en tanque general	Se recarga de combustible el remolcador	No se conecte la manguera correctamente	Caiga combustible al océano o a la cubierta	6	Se conecte mal la manguera	1	Inspección visual	1	6
2	Purificado	Equipo se encarga de purificar el combustible	No este correctamente configurado el equipo	No se realiza la correcta separación de contaminantes, perdiendo eficiencia	7	No se revise periódicamente la configuración del equipo	9	No existe procedimiento	9	567
3	Purificado	Equipo se encarga de purificar el combustible	Desgaste de componentes	No se realiza la correcta separación de contaminantes, perdiendo eficiencia	7	No se revisa el estado de los componentes en inspección	6	Existe procedimiento para algunos componentes	6	252
4	Almacenamiento en tanque de servicio	Almacenar diésel purificado y sedimentar por gravedad	No se purgue el tanque	Excedente de contaminantes en el tanque	5	No se realice el procedimiento de purga	5	Depende del criterio del jefe de máquinas	8	200
5	Primer filtrado en filtro primario	Realizar el primer filtrado medio del fluido y separa agua	Se use un filtro con el micraje incorrecto o eficiencia baja	Se reduce la eficiencia del filtro entregando contaminantes pesados y agua a la bomba	8	Se compre el filtro incorrecto	7	No existe una lista oficial, depende del criterio de la filial	9	504
6	Primer filtrado en filtro primario	Realizar el primer filtrado medio del fluido y separa agua	Excedente de contaminantes afecte su eficiencia de filtrado	Se reduce la eficiencia del filtro entregando contaminantes pesados y agua a la bomba	8	Excedente de contaminantes ingrese al filtro	8	No existe un sistema de control de calidad de diésel ni periodo de cambio de filtro	9	576
7	Movimiento de diésel con bomba de baja presión	Recoger combustible de la línea y aumentar la presión de ella	Excedente de agua y contaminantes pesados la dañan afectando funcionamiento	Se pierde la capacidad de enviar combustible al motor	9	Excedente de contaminantes ingrese al equipo	7	Alarmas integradas al sistema, algunos motores poseen sistemas predictivos	2	126

8	Segundo filtrado en filtro secundario	Realizar el segundo filtrado fino del fluido	Excedente de contaminantes afecte su eficiencia de filtrado	Se reduce la eficiencia del filtro entregando contaminantes pesados y agua a la bomba de alta presión	9	Excedente de contaminantes ingresan al filtro	7	No existe un sistema de control de calidad de diésel ni periodo de cambio de filtro	9	567
9	bomba de alta presión	Aumentar la presión del combustible a altos valores	Excedente de agua y contaminantes pesados la dañan afectando funcionamiento	Se pierde la capacidad de enviar combustible a los inyectores	9	Excedente de contaminantes ingrese al equipo	5	Alarmas integradas al sistema, algunos motores poseen sistemas predictivos	2	90
10	Inyección del combustible	Inyectores atomizan el combustible	Atomice mal el combustible por erosión de los componentes	Se atomiza incorrectamente aumentando el consumo y llegando a fallas catastróficas	9	Excedente de contaminantes ingrese al componente	5	Alarmas integradas al sistema, algunos motores poseen sistemas predictivos	2	90

Tabla 15: Causas raíz validadas del proyecto. Fuente: Victor Frederico, creado con información levantada de la empresa afiliada a la memoria, Planilla DMAIC facilitada por profesor Nelson Álvarez Campillay.

CAUSAS RAÍZ VALIDADAS			Fecha:	
N°	**CAUSA RAÍZ**	**IMPACTO**	**METODO DE VALIDACIÓN**	**IDEAS DE MEJORA**
1	Configuración incorrecta del purificador.	Eficiencia de separación reducida frente a lo esperado para el equipo. Agua y solidos pasan al tanque de servicio, generando una saturación en el sistema. Riesgo de rotura del sello de agua.	Presencia en Ishikawa y los 5 porqués. MCE alto de 247, el segundo más alto. NPR de 567, segundo más alto. Verificación con super intendentes de la empresa.	Estandarizar la selección del disco de gravedad según la densidad del combustible, agregando una tarea periódica para verificar la configuración y estado de los componentes.
2	Ausencia de un plan estandarizado de mantenimiento y monitoreo.	Pérdida de eficiencia por acumulación de lodos y degradación de componentes. Imposibilidad de correlacionar el estado del equipo con los eventos. Pérdida de conocimiento por rotación de personal.	Presencia en Ishikawa. MCE de 233, el tercero más alto. Verificación en levantamiento de información y reuniones con super intendentes.	Estandarizar la operación, mantenimiento y periodo de limpieza del equipo purificador dependiendo de la marca y contexto de cada filial
3	Ausencia de monitoreo y verificación del diésel a bordo.	Desconocimiento de la calidad del diésel que alcanza el motor. Imposibilita el poder tomar acciones predictivas frente a diésel excesivamente contaminado. Sesga la toma de decisiones al no tener evidencia contable.	Presencia en Ishikawa y los 5 porqués. Confirmada necesidad en árbol de métricas, donde el conteo de partículas y la cantidad de agua no existen como dato actualmente.	Análisis periódico de diésel en remolcadores

4	Selección inadecuada de filtros debido a falta de criterios definidos.	Filtros de micraje incorrectos, generando o una ausencia de filtrado esperado o riesgo de fractura del filtro. Filtros "Iguales al OEM" sin una equivalencia de rating estandarizada dejando pasar partículas al sistema.	Presencia en Ishikawa. MCE de 205, alto. AMFE de 504, alto. No se posee un criterio definido para la compra, cada filial compra lo que estima correcto.	Definir un criterio único de selección de componentes unificado a las distintas operaciones y a procurement.
5	Excedente de contaminantes alcanza al filtro primario.	Perdida de eficiencia de filtrado, generando micro roturas en el filtro. Perdida de eficiencia de separación de agua. Daño a los componentes posteriores.	Presencia en Ishikawa y los 5 porqués. MCE alto de 287, el más alto. AMFE de 576, el más alto.	Integración de un sistema de prefiltro, encargado de reducir la carga en el filtro primario, entregando una cantidad de contaminantes controlable para el filtro.

Tabla 16: Acciones de Mejora del Proyecto. Fuente: Victor Frederico, creado con información levantada de la empresa afiliada a la memoria, Planilla DMAIC facilitada por profesor Nelson Álvarez Campillay.

<table>
<tr><td>Nombre de la Iniciativa:</td><td colspan="4">Propuesta de mejora en la confiabilidad del purificado y filtrado de diésel en remolcadores marítimos mediante integración tecnológica y mantenimiento.</td><td>N°</td><td>1</td></tr>
<tr><td>Descripción/esquema de la solución:</td><td colspan="6">La solución se plantea en 2 horizontes complementarios. La primera se encarga de la correcta configuración del sistema, para esto se incorpora la corroboración de tener los equipos correctamente configurados y seleccionados. Para los casos de extrema cantidad de contaminantes se plantea implementar un sistema de prefiltro, donde se verificará su eficiencia en un piloto.
El segundo horizonte se ubica en el área de control, este es esencial para asegurar el funcionamiento del sistema y corroborar las posibles fallas o cambios bruscos que se pueda recibir debido a eventos externos a la empresa.</td></tr>
<tr><td rowspan="6">Tareas para la Implementación:</td><td>1</td><td colspan="5">Configuración incorrecta del purificador (disco de gravedad y cantidad de discos separadores)</td></tr>
<tr><td>2</td><td colspan="5">Plan estandarizado de mantenimiento y monitoreo del purificador</td></tr>
<tr><td>3</td><td colspan="5">Monitoreo y verificación del diésel a bordo</td></tr>
<tr><td>4</td><td colspan="5">Selección inadecuada de filtros</td></tr>
<tr><td>5</td><td colspan="5">Sistema de prefiltro para excedente de contaminantes</td></tr>
<tr><td>6</td><td colspan="5"></td></tr>
<tr><td>Costo estimado:</td><td>12.000 USD</td><td>Beneficios esperados: (cualitativos)</td><td colspan="4">Lograr un sistema de purificado y filtrado que logre entregar un diésel dentro de los requerimientos por el fabricante. Generar un nuevo estándar de control para los remolcadores.</td></tr>
<tr><td rowspan="2">Causas:</td><td rowspan="2">Combustible contaminado y falta de estándar de análisis en la flota.</td><td>Fecha Inicio:</td><td>01-06-2026</td><td>Fecha de Control:</td><td>24-07-2026</td></tr>
<tr><td>Fecha de Término:</td><td>03-08-2026</td><td>Responsable:</td><td>Victor Frederico</td></tr>
<tr><td>Comentarios: (Riesgos-Consideraciones de Gestión del Cambio)</td><td colspan="6">Riesgo con el tiempo, se debe poder implementar y analizar dentro del periodo de Memoria del Alumno.</td></tr>
</table>

Tabla 17: Matriz de decisión del proyecto. Fuente: Victor Frederico, creado con información levantada de la empresa afiliada a la memoria, Planilla DMAIC facilitada por profesor Nelson Álvarez Campillay.

MATRIZ DE DECISIÓN		Fecha:			
Criterios	**Peso (1-10)**	**Prefiltro purificador hidro ciclónico**	**Prefiltro Sistema de pulido**	**Filtro primario de mayor capacidad**	**Purificador más eficaz**
Eficiencia de remoción de contaminantes	10	8	9	2	9
Compatibilidad con caudal requerido	3	6	9	8	9
Costo de inversión	8	7	5	7	3
Complejidad de instalación	7	8	4	9	2
Mantenibilidad y disponibilidad de repuestos	9	9	7	6	5
Resultado ponderado		291	248	217	200

Tabla 18: Plan de implementación del proyecto. Fuente: Victor Frederico, creado con información levantada de la empresa afiliada a la memoria, Planilla DMAIC facilitada por profesor Nelson Álvarez Campillay.

PLAN DE IMPLEMENTACIÓN							Fecha:	
N°	**QUÉ (What) ¿Cuál es la tarea?**	**POR QUÉ (Why) ¿Cuál es el objetivo de la tarea?**	**CÓMO (How) ¿Cómo se ejecutará la tarea?**	**DÓNDE (Where) ¿En que lugar o equipo se hará la tarea?**	**QUIÉN (Who) ¿Quién ejecutará la tarea?**	**CUÁNDO (When) ¿Cuándo se ejecutará la tarea?**	**CUÁNTO (How many) ¿Cuánto costará la tarea?**	**ESTADO (Cuál es el estado de ejecución)**
1	Seleccionar y diagnosticar un remolcador piloto	Establecer una linea base del sistema	Se escogen los parámetros de importancia para un piloto, se revisa la configuración actual y se realiza la toma de muestras iniciales en los puntos de interés	Remolcador Piloto	Alumno en conjunto con tutor y jefe de máquinas	Inicios de junio 2026	Valor esperado por muestra 200-450USD 3 Muestras en total	En proceso
2	Verificar y corregir la configuración del purificador	Restablecer la eficiencia del remolcador a su diseño	Selección del disco de gravedad según la densidad obtenida en el análisis. Corroborar la correcta cantidad de discos cónicos	Purificador del remolcador piloto	Jefe de máquinas en apoyo al Alumno de Trabajo de titulo	Mediados de junio 2026	Sin costo asociado	En espera
3	Estandarización de filtros y plan de mantenimiento	Eliminar posibilidades de selección inadecuada y formalizar el equipo a bordo	Definir correctos a utilizar que cumplan con el estándar OEM indicado por el fabricante	Filtro primario y secundario del remolcador piloto	Jefe de máquinas en apoyo al Alumno de Trabajo de titulo	Mediados de junio 2026	Sin costo asociado	En espera
4	Instalación de prefiltro hidro ciclónico	Reducir la carga de contaminantes en el filtro primario	Montaje en la toma de succión del tanque de servicio antes del tanque diario	Línea de succión del tanque de servicio antes del filtro primario	Equipo técnico de la filial	Finales de junio 2026	8.800 USD	En espera

				del remolcador piloto				
5	Muestreo con piloto instalado	Generar un contraste del rendimiento del sistema con mejoras implementadas	Muestreo en 4 puntos, en tanque general, después del purificador, entre el prefiltro y después del filtro primario	Remolcador Piloto	Jefe de máquinas en apoyo al Alumno de Trabajo de titulo	Inicios de Julio 2026	Valor esperado por muestra 200-450USD 4 Muestras en total	En espera
6	Definir plan de control y seguimiento	Definir un plan de control para toda la flota	Se definirá un muestreo periódico. Se definirán los indicadores que deben obtenerse periódicamente para el control del sistema	Todos los remolcadores	Alumno de Trabajo de Titulo con la aprobación de la Subgerencia de Ingeniería	Finales de Julio 2026	Sin costo asociado, proyección de costo de las actividades en documento	En espera

Tabla 19: Plan de control del proyecto. Fuente: Victor Frederico, creado con información levantada de la empresa afiliada a la memoria, Planilla DMAIC facilitada por profesor Nelson Álvarez Campillay.

PLAN DE CONTROL					Fecha:	
N°	**Resultados (Y)**	**Detalle**	**Meta y límites**	**Plan de contingencia**	**Responsable**	**Observaciones**
1	Conteo de partículas en diésel	Conteo de partículas en línea de succión del tanque de servicio, en caso de poseer prefiltro después del él. Realizado por laboratorio.	Límites superiores por OEM, códigos exigidos por: Caterpillar 18/16/13 MTU 18/17/14	Verificar configuración y estado del purificador y del prefiltro Revisar el suministro	Jefe de máquinas, laboratorio de análisis y Equipo de ingeniería	Carta de Control
2	Contenido de agua en diésel	Medición de agua en ppm o %v/v en la línea de succión del tanque de servicio o después del prefiltro.	Límite superior por OEM: 200 ppm o 0,02% v/v estándar	Verificar funcionamiento del purificador y estado de componentes separadores	Jefe de máquinas, laboratorio de análisis y Equipo de ingeniería	Cartas de control
3	Frecuencia de cambio de filtros	Registro en bitácora y adelanto de orden de trabajo en plataforma de gestión de mantenimiento	Dentro del rango del programa, limite por marca e historia del remolcador	Ante un aumento brusco, realizar muestreo Revisar funcionamiento y limpieza del purificador y prefiltro	Jefe de máquinas	Gráfico I-MR
N°	**Etapa del proceso**	**Métrica clave**	**Detalle**	**Meta y límites**	**Plan de contingencia**	**Responsable**
1	Purificador	Configuración del equipo (Disco de Gravedad y Cantidad de discos)	Verificar que el disco de gravedad sea el correcto para el diésel a bordo y que el bol se encuentre con la cantidad correcta de discos con separación	Verificar en cambios brucos de suministro 100% de cumplimiento	Reconfigurar según especificaciones de fabricante	Jefe de máquinas

			adecuada por fabricante			
2	Purificador	Mantenimiento (Plan de la plataforma de gestión y ddescarga de lodos)	Cumplimiento del plan cargado en plataforma de gestión Trazabilidad de descargas en bitácora	100 % del plan ejecutado en período Frecuencia de descarga dentro del rango de operación	Ejecutar el mantenimiento pendiente Revisar el criterio de frecuencia	Jefe de máquinas Equipo de ingeniería
3	Filtro primario	Presión diferencial	Monitoreo de la presión diferencial para determinar la frecuencia del filtro	Bajo el máximo que define el fabricante	Cambiar el elemento En caso de saturación prematura, revisar correcto funcionamiento de etapas previas	Jefe de máquinas
4	Filtro primario	Uso del filtro correcto	Usar filtro de 10 micrones con eficiencia mínima del 98%	100% de los filtros en la flota sean de la lista de filtros adecuados	Retirar el filtro e instalar uno del listado correcto	Jefe de máquinas y procurement
5	Filtro Secundario	Presión diferencial	Monitoreo de la presión diferencial para determinar la frecuencia del filtro	Bajo el máximo que define el fabricante	Cambiar el elemento En caso de saturación prematura, revisar correcto funcionamiento de etapas previas	Jefe de máquinas
6	Prefiltro hidro ciclónico	Mantenimiento adecuado	Mantenimiento de acuerdo a lo especificado en la plataforma de gestión	100 % del plan ejecutado en período Frecuencia de purga dentro del rango de operación	En caso de necesidad de purga prematura revisar funcionamiento de los equipo posteriores	Jefe de máquinas

Tabla 20: Nuevo plan de mantenimiento para purificadores diésel marca Alfa Laval. Fuente: Victor Frederico, creado con información levantada de empresa de purificadores ALFA LAVAL.

Inspección Diaria/Daily Inspection	Cambio de aceite/Oil Change	Limpieza Bol Separador/Separator Bowl Cleaning	Mantenimiento Mayor/Major Maintenance
Purifier - Inspección Diaria: MARCA ALFA LAVAL FRECUENCIA DE LA TAREA ========== Uso Estándar: Diario Uso Pesado: Diario MEDIDAS DE SEGURIDAD ========== 1) Detener el equipo y señalizar "En mantención, no poner en servicio". 2) Desconectar baterías si es necesario. 3) No permitir personal no autorizado en las cercanías del equipo mientras se efectúa el mantenimiento. 4) Usar el equipamiento personal, acorde con los trabajos que se efectúen. 5) No usar vestimenta holgada, que puedan engancharse con piezas en movimiento. 6) No utilizar aire comprimido para la limpieza del cuerpo, ni del equipo de protección personal. 7) Descartar adecuadamente los residuos, evitando contaminar el medio ambiente. 8) Esperar que el motor se enfríe antes de iniciar cualquier mantenimiento. 9) Tomar las precauciones necesarias antes de destapar un cuerpo que se encuentre presurizado, tales como: Tapón de llenado, válvulas de presión, venteos y drenajes. 10) Para remover una cubierta, con presión en el otro lado, remover los tornillos hasta que dos permanezcan	Purifier - Cambio de aceite: MARCA ALFA LAVAL FRECUENCIA DE LA TAREA ========== Uso Estándar: Cada 6 meses para aceite MINERAL / 12 meses para aceite SINTETICO. Uso Pesado: Cada 1.500 horas para aceite MINERAL / 2.000 horas para aceite SINTETICO. MEDIDAS DE SEGURIDAD ========== 1) Detener el equipo y señalizar "En mantención, no poner en servicio". 2) Desconectar baterías si es necesario. 3) No permitir personal no autorizado en las cercanías del equipo mientras se efectúa el mantenimiento. 4) Usar el equipamiento personal, acorde con los trabajos que se efectúen. 5) No usar vestimenta holgada, que puedan engancharse con piezas en movimiento. 6) No utilizar aire comprimido para la limpieza del cuerpo, ni del equipo de protección personal. 7) Descartar adecuadamente los residuos, evitando contaminar el medio ambiente. 8) Esperar que el motor se enfríe antes de iniciar cualquier mantenimiento. 9) Tomar las precauciones necesarias antes de destapar un cuerpo que se encuentre presurizado, tales como: Tapón de llenado, válvulas de presión, venteos y drenajes. 10) Para remover una cubierta, con presión en el otro lado, remover los tornillos hasta que dos permanezcan colocados en diagonal, liberar la presión / resorte y luego retirar los dos tornillos faltantes. 11) No depositar fluidos de mantención en recipientes de vidrio, ya	Purifier - Limpieza bol separador: MARCA ALFA LAVAL FRECUENCIA DE LA TAREA ========== Uso Estándar: Determinar por remolcador Uso Pesado: Determinar por remolcador MEDIDAS DE SEGURIDAD ========== 1) Detener el equipo y señalizar "En mantención, no poner en servicio". 2) Desconectar baterías si es necesario. 3) No permitir personal no autorizado en las cercanías del equipo mientras se efectúa el mantenimiento. 4) Usar el equipamiento personal, acorde con los trabajos que se efectúen. 5) No usar vestimenta holgada, que puedan engancharse con piezas en movimiento. 6) No utilizar aire comprimido para la limpieza del cuerpo, ni del equipo de protección personal. 7) Descartar adecuadamente los residuos, evitando contaminar el medio ambiente. 8) Esperar que el motor se enfríe antes de iniciar cualquier mantenimiento. 9) Tomar las precauciones necesarias antes de destapar un cuerpo que se encuentre presurizado, tales como: Tapón de llenado, válvulas de presión, venteos y drenajes. 10) Para remover una cubierta, con presión en el otro lado, remover los tornillos hasta que dos permanezcan colocados en diagonal, liberar la presión / resorte y luego retirar los dos tornillos faltantes. 11) No depositar fluidos de mantención en recipientes de vidrio, ya que estos se pueden quebrar. 12) Tener precaución con el manejo de soluciones de limpieza. 13) Utilizar siempre una placa o papel duro para detectar las fugas de fluido, con tal de evitar quemaduras en el cuerpo. 14) Asegurarse que todas las líneas de presión se encuentren despresurizadas. ACCIONES DE MANTENIMIENTO ========== 1) Entradas y salidas del purificador: - Limpiar e inspeccionar, roscado de las conexiones de entrada y conexiones a la carcasa. 2) Bol separador: - Limpiar y verificar el anillo de bloqueo, el cabezal del bol, el disco superior, el disco de gravedad, los discos del bol, el distribuidor, el cuerpo del bol y el roscado del anillo sellante. - Revisa la presencia de corrosión, erosión, grietas, presión del conjunto de discos y agarrotamiento de las guías de los componentes. - Renovar las juntas tóricas y los sellos. 3) Motor eléctrico: - Lubricar los rodamientos del motor eléctrico	Purifier - Mantenimiento Mayor: MARCA ALFA LAVAL FRECUENCIA DE LA TAREA ========== Uso Estándar: Cada 12 meses para aceite MINERAL / Cada 12 meses para aceite SINTETICO Uso Pesado: Cada 7.500 horas para aceite MINERAL / Cada 8.000 horas para aceite SINTETICO MEDIDAS DE SEGURIDAD ========== 1) Detener el equipo y señalizar "En mantención, no poner en servicio". 2) Desconectar baterías si es necesario. 3) No permitir personal no autorizado en las cercanías del equipo mientras se efectúa el mantenimiento. 4) Usar el equipamiento personal, acorde con los trabajos que se efectúen. 5) No usar vestimenta holgada, que puedan engancharse con piezas en movimiento. 6) No utilizar aire comprimido para la limpieza del cuerpo, ni del equipo de protección personal. 7) Descartar adecuadamente los residuos, evitando contaminar el medio ambiente. 8) Esperar que el motor se enfríe antes de iniciar cualquier mantenimiento. 9) Tomar las precauciones necesarias antes de destapar un cuerpo que se encuentre presurizado, tales como: Tapón de llenado, válvulas de presión, venteos y drenajes. 10) Para remover una cubierta, con presión en el otro lado, remover los tornillos hasta que dos permanezcan colocados en diagonal, liberar la presión / resorte y luego retirar los dos tornillos faltantes. 11) No depositar fluidos de mantención en recipientes de vidrio, ya que estos se pueden quebrar. 12) Tener precaución con el manejo de soluciones de limpieza. 13) Utilizar siempre una placa o papel duro para detectar las fugas de fluido, con tal de evitar quemaduras en el cuerpo. 14) Asegurarse que todas las líneas de presión se encuentren despresurizadas. ACCIONES DE MANTENIMIENTO ========== 1) Entradas y salidas del purificador: - Limpiar e inspeccionar, roscado de las conexiones de entrada y conexiones a la carcasa. 2) Bol separador: - Limpiar y verificar el anillo de bloqueo, el cabezal del bol, el disco superior, el disco de gravedad, los

colocados en diagonal, liberar la presión / resorte y luego retirar los dos tornillos faltantes.
11) No depositar fluidos de mantención en recipientes de vidrio, ya que estos se pueden quebrar.
12) Tener precaución con el manejo de soluciones de limpieza.
13) Utilizar siempre una placa o papel duro para detectar las fugas de fluido, con tal de evitar quemaduras en el cuerpo.
14) Asegurarse que todas las líneas de presión se encuentren despresurizadas.

ACCIONES DE MANTENIMIENTO
==========

1) Entradas y salidas del purificador:
- Comprobar si hay fugas en las entradas y salidas de la cubierta de recolección y conexiones de la carcasa.

2) Bol Separador:
- Comprobar la vibración y el ruido.

3) Eje del engranaje sinfín y la caja de engranajes:
- Comprobar la vibración y el ruido.
- Comprobar el nivel de aceite en la caja de cambios.

4) Motor eléctrico:
- Comprobar la temperatura, la vibración y el ruido.

DOCUMENTOS DE REFERENCIA
==========
Nombre del manual: Separator Manual High Speed Separator MAB 103B-24.pdf
Book No. 9026690-02 Rev. 4
Nombre del manual: Separator Manual High Speed Separator MAB 104B-14/24.pdf
Book No. 9027982-02 Rev. 3

que estos se pueden quebrar.
12) Tener precaución con el manejo de soluciones de limpieza.
13) Utilizar siempre una placa o papel duro para detectar las fugas de fluido, con tal de evitar quemaduras en el cuerpo.
14) Asegurarse que todas las líneas de presión se encuentren despresurizadas.

ACCIONES DE MANTENIMIENTO
==========

1)Caja de engranajes
- Revisa el estado del conjunto sinfín corona, juego radial y axial de los componentes
- Renueva el aceite de la caja de engranajes.

VOLUMEN DE ACEITE RECOMENDADO
==========
MODELO MAB 103B-24: Volumen de aceite lubricante recomendado 0,7 litros.

MODELO MAB 104B-14/24: Volumen de aceite lubricante recomendado 0,8 litros.

OTROS MODELOS: Revisar en ficha técnica del manual para obtener cantidad recomendada.

DOCUMENTOS DE REFERENCIA
==========
Nombre del manual: Separator Manual High Speed Separator MAB 103B-24.pdf
Book No. 9026690-02 Rev. 4
Nombre del manual: Separator Manual High Speed Separator MAB 104B-14/24.pdf
Book No. 9027982-02 Rev. 3

en caso de poseer grasera.

4) Letreros y etiquetas del separador:
- Revisa y cambiar en caso de ser necesario las etiqueta adhesiva y señaléticas del purificador.

5) Equipo de monitoreo (Opción)
- Verificar funcionamiento en el equipo de monitoreo en caso de poseer.

OBTENCIÓN DE PERIODO DE LIMPIEZA
==========
Se obtiene el periodo de manera empírica, para ello se enciende el purificador por un tiempo determinado, una vez completado el tiempo de prueba se apaga el equipo y se mide la cantidad de sedimento formado en el bol. Con la cantidad de sedimento y el tiempo de prueba se obtiene el periodo de limpieza máximo del equipo, se recomienda hacerlo antes que ese tiempo.

$t_{max} = (t_v * V * 0{,}7)/(V_f)$

t_max: Tiempo máximo permitido para hacer limpieza de bol separador [hrs]
t_v: Tiempo de prueba empírica [hrs]
V: Volumen máximo de almacenamiento de solidos y agua(Sedimento)[L]
V_f: Volumen de solido (Sedimento) obtenido en prueba empírica [L]

VOLUMEN MAXIMO DE ALMACENAMIENTO DE SOLIDOS
==========
Modelo MAB 103B-24: Volumen maximo de almacenamiento de solidos y agua (Sedimento): 0,5 [L].

Modelo MAB 104B-14/24: Volumen máximo de almacenamiento de solidos y agua (Sedimento): 0,72 [L].

Otros modelos: Consultar en manual actualizado.

OBSERVACIONES
==========
El modelo MAB 104B-14/24 debe utilizar un kit de servicio intermedio de la marca.

DOCUMENTOS DE REFERENCIA
==========
Nombre del manual: Separator Manual High Speed Separator MAB 103B-24.pdf
Book No. 9026690-02 Rev. 4
Nombre del manual: Alfa Laval MAB 103 Solids-retaining Centrifugal Separator
Book No. 200009997-2-EN-GB

Nombre del manual: Separator Manual High Speed Separator MAB 104B-14/24.pdf
Book No. 9027982-02 Rev. 3
Nombre del manual: Alfa Laval MAB 104 Solids-retaining Centrifugal Separator
Book No. 200016476-1-EN-GB

discos del bol, el distribuidor, el cuerpo del bol y el roscado del anillo sellante.
- Revisa la presencia de corrosión, erosión, grietas, presión del conjunto de discos y agarrotamiento de las guías de los componentes.
- Renovar las juntas tóricas y los sellos.

3) Eje vertical:
-Revisar y limpiar: Eje de bol, juego y dientes del engranaje sinfín, amortiguadores de goma, indentaciones para los rodamientos de bola y juego radial del eje de bol.
-Renovar: Rodamientos de bola y muelles de cojinete superior.

5) Freno:
- Limpiar y revisar: Resorte y zapatilla.
- Renovar: Tapón de freno.

6) Bomba:
- Limpiar revisar: Bujes y sellos, acople fusible, eje del rodete.
- Renovar: Sello de labio (En caso de poseer).

7) Embrague centrífugo:
- Limpiar y revisar: Conjunto embrague centrífugo
- Renovar: las pastillas de fricción y el anillo de junta de labio.

8) Base de carcasa:
- Renovar: Almohadillas de goma.

9) Motor eléctrico:
- Limpiar y revisar: Posición y alineamiento del disco de acoplamiento.
- Lubricar los rodamientos del motor eléctrico en caso de poseer grasera.

10) Letreros y etiquetas del separador:
- Revisa y cambiar en caso de ser necesario las etiqueta adhesiva y señaléticas del purificador.

11) Equipo de monitoreo (Opción)
- Verificar funcionamiento en el equipo de monitoreo en caso de poseer.

OBSERVACIONES
==========
Se debe utilizar un kit de servicio intermedio de la marca.
Se debe utilizar un kit de servicio mayor de la marca.

DOCUMENTOS DE REFERENCIA
==========
Nombre del manual: Separator Manual High Speed Separator MAB 103B-24.pdf
Book No. 9026690-02 Rev. 4
Nombre del manual: Separator Manual High Speed Separator MAB 104B-14/24.pdf
Book No. 9027982-02 Rev. 3

Tabla 21: Nuevo plan de mantenimiento para purificadores diésel GEA Westfalia. Fuente: Victor Frederico, creado con información levantada de la empresa de purificadores GEA Westfalia.

Inspección Diaria	Limpieza de bol separador	Mantenimiento anual	Mantenimiento año IMPAR desde ciclo de vida del equipo	Mantenimiento año PAR desde ciclo de vida del equipo
Purifier - Inspección Diaria: MARCA GEA WESTFALIA FRECUENCIA DE LA TAREA ========== Uso Estándar: Diario Uso Pesado: Diario MEDIDAS DE SEGURIDAD ========== 1) Detener el equipo y señalizar "En mantención, no poner en servicio". 2) Desconectar baterías si es necesario. 3) No permitir personal no autorizado en las cercanías del equipo mientras se efectúa el mantenimiento. 4) Usar el equipamiento personal, acorde con los trabajos que se efectúen. 5) No usar vestimenta holgada, que puedan engancharse con piezas en movimiento. 6) No utilizar aire comprimido para la limpieza del cuerpo, ni del equipo de protección personal. 7) Descartar adecuadamente los residuos, evitando contaminar el medio ambiente. 8) Esperar que el motor se enfríe antes de iniciar cualquier mantenimiento. 9) Tomar las precauciones necesarias antes de destapar un cuerpo que se encuentre presurizado, tales como: Tapón de llenado, válvulas de presión, venteos y drenajes. 10) Para remover una cubierta, con presión en el otro lado, remover los tornillos hasta que dos permanezcan colocados en diagonal, liberar la presión / resorte y luego retirar los dos tornillos faltantes. 11) No depositar fluidos de mantención en recipientes de vidrio, ya que estos se pueden quebrar.	Purifier - Limpieza de bol separador: MARCA GEA WESTFALIA FRECUENCIA DE LA TAREA ========== Uso Estándar: Determinado por remolcador Uso Pesado: Determinado por remolcador MEDIDAS DE SEGURIDAD ========== 1) Detener el equipo y señalizar "En mantención, no poner en servicio". 2) Desconectar baterías si es necesario. 3) No permitir personal no autorizado en las cercanías del equipo mientras se efectúa el mantenimiento. 4) Usar el equipamiento personal, acorde con los trabajos que se efectúen. 5) No usar vestimenta holgada, que puedan engancharse con piezas en movimiento. 6) No utilizar aire comprimido para la limpieza del cuerpo, ni del equipo de protección personal. 7) Descartar adecuadamente los residuos, evitando contaminar el medio ambiente. 8) Esperar que el motor se enfríe antes de iniciar cualquier mantenimiento. 9) Tomar las precauciones necesarias antes de destapar un cuerpo que se encuentre presurizado, tales como: Tapón de llenado, válvulas de presión, venteos y drenajes. 10) Para remover una cubierta, con presión en el otro lado, remover los tornillos hasta que dos permanezcan colocados en diagonal, liberar la presión / resorte y luego retirar los dos tornillos faltantes. 11) No depositar fluidos de mantención en recipientes de vidrio, ya que estos se pueden quebrar. 12) Tener precaución con el manejo de soluciones de limpieza. 13) Utilizar siempre una placa o papel duro para	Purifier - Mantenimiento anual: MARCA GEA WESTFALIA FRECUENCIA DE LA TAREA ========== Uso Estándar: Cada 12 meses Uso Pesado: Cada 8.000 horas MEDIDAS DE SEGURIDAD ========== 1) Detener el equipo y señalizar "En mantención, no poner en servicio". 2) Desconectar baterías si es necesario. 3) No permitir personal no autorizado en las cercanías del equipo mientras se efectúa el mantenimiento. 4) Usar el equipamiento personal, acorde con los trabajos que se efectúen. 5) No usar vestimenta holgada, que puedan engancharse con piezas en movimiento. 6) No utilizar aire comprimido para la limpieza del cuerpo, ni del equipo de protección personal. 7) Descartar adecuadamente los residuos, evitando contaminar el medio ambiente. 8) Esperar que el motor se enfríe antes de iniciar cualquier mantenimiento. 9) Tomar las precauciones necesarias antes de destapar un cuerpo que se encuentre presurizado, tales como: Tapón de llenado, válvulas de presión, venteos y drenajes. 10) Para remover una cubierta, con presión en el otro lado, remover los tornillos hasta que dos permanezcan colocados en diagonal, liberar la presión / resorte y luego retirar los dos tornillos faltantes. 11) No depositar fluidos de mantención en recipientes de vidrio, ya que estos se pueden quebrar. 12) Tener precaución con el manejo de soluciones de limpieza. 13) Utilizar siempre una placa o papel duro para	Purifier - Mantenimiento año IMPAR desde ciclo de vida del equipo: MARCA GEA WESTFALIA FRECUENCIA DE LA TAREA ========== Uso Estándar: Cada 24 meses Uso Pesado: Cada 16.000 horas *Se realiza una vez a los primeros 12 meses o primeras 8.000 horas de operación, lo que llegue antes. Seguido de eso, es de acuerdo a la frecuencia de la tarea. MEDIDAS DE SEGURIDAD ========== 1) Detener el equipo y señalizar "En mantención, no poner en servicio". 2) Desconectar baterías si es necesario. 3) No permitir personal no autorizado en las cercanías del equipo mientras se efectúa el mantenimiento. 4) Usar el equipamiento personal, acorde con los trabajos que se efectúen. 5) No usar vestimenta holgada, que puedan engancharse con piezas en movimiento. 6) No utilizar aire comprimido para la limpieza del cuerpo, ni del equipo de protección personal. 7) Descartar adecuadamente los residuos, evitando contaminar el medio ambiente. 8) Esperar que el motor se enfríe antes de iniciar cualquier mantenimiento. 9) Tomar las precauciones necesarias antes de destapar un cuerpo que se encuentre presurizado, tales como: Tapón de llenado, válvulas de presión, venteos y drenajes. 10) Para remover una cubierta, con presión en el otro lado, remover los	Purifier - Mantenimiento año PAR desde ciclo de vida del equipo: MARCA GEA WESTFALIA FRECUENCIA DE LA TAREA ========== Uso Estándar: Cada 24 meses Uso Pesado: Cada 16.000 horas MEDIDAS DE SEGURIDAD ========== 1) Detener el equipo y señalizar "En mantención, no poner en servicio". 2) Desconectar baterías si es necesario. 3) No permitir personal no autorizado en las cercanías del equipo mientras se efectúa el mantenimiento. 4) Usar el equipamiento personal, acorde con los trabajos que se efectúen. 5) No usar vestimenta holgada, que puedan engancharse con piezas en movimiento. 6) No utilizar aire comprimido para la limpieza del cuerpo, ni del equipo de protección personal. 7) Descartar adecuadamente los residuos, evitando contaminar el medio ambiente. 8) Esperar que el motor se enfríe antes de iniciar cualquier mantenimiento. 9) Tomar las precauciones necesarias antes de destapar un cuerpo que se encuentre presurizado, tales como: Tapón de llenado, válvulas de presión, venteos y drenajes. 10) Para remover una cubierta, con presión en el otro lado, remover los tornillos hasta que dos permanezcan colocados en diagonal, liberar la presión / resorte y luego retirar los dos tornillos faltantes. 11) No depositar fluidos de mantención en recipientes de vidrio, ya que estos se pueden quebrar. 12) Tener precaución con

12) Tener precaución con el manejo de soluciones de limpieza. 13) Utilizar siempre una placa o papel duro para detectar las fugas de fluido, con tal de evitar quemaduras en el cuerpo. 14) Asegurarse que todas las líneas de presión se encuentren despresurizadas. ACCIONES DE MANTENIMIENTO ========== 1) Nivel de aceite. 2) Temperatura de operación. 3) Presiones. 4) Filtraciones. 5) Vibración. 6) Consumo energético. 7) Tiempo en iniciar el equipo. 8) Mangueras y tubos de conexión. DOCUMENTOS DE REFERENCIA ========== Nombre del manual: Instruction manual Designation: Centrifuge Type: OTC 2-02-137 Book No. 2050-9001-010 Edition: 0905 Nombre del manual: Instruction manual Designation: Centrifuge Type: OTC 3-02-137 Book No. 2051-9001-010 Edition: 1203	detectar las fugas de fluido, con tal de evitar quemaduras en el cuerpo. 14) Asegurarse que todas las líneas de presión se encuentren despresurizadas. ACCIONES DE MANTENIMIENTO ========== 1) Bol separador: - En el se debe levanta el Capó del equipo, las camisas del tambor, el plato separador y los platos. Se limpia asegurándose que no haya suciedad en ellos. OBTENCIÓN DE PERIODO DE LIMPIEZA ========== Se obtiene el periodo de manera empirica, para ello se enciende el purificador por un tiempo determinado, una vez completado el tiempo de prueba se apaga el equipo y se mide la cantidad de sedimento formado en el bowl. Con la cantidad de sedimento y el tiempo de prueba se obtiene el periodo de limpieza maximo del equipo, se recomienda hacerlo antes que ese tiempo. $t_{max} = (t_v * V * 0{,}7)/(V_f)$ t_max: Tiempo maximo permitido para hacer limpieza de bol separador [hrs] t_v: Tiempo de prueba empirica [hrs] V: Volumen maximo de almacenamiento de solidos (Sedimento)[L] V_f: Volumen de solido (Sedimento) obtenido en prueba empirica [L] VOLUMEN MAXIMO DE ALMACENAMIENTO DE SOLIDOS ========== Modelo OTC 2-02-137: Volumen maximo de almacenamiento de solidos (Sedimento) 0,75 [L]. Modelo OTC 3-02-137: Volumen maximo de almacenamiento de solidos (Sedimento) 1,20 [L]. Otros modelos: Consultar en manual actualidado. DOCUMENTOS DE REFERENCIA ========== Nombre del manual: Instruction manual Designation: Centrifuge Type: OTC 2-02-137 Book No. 2050-9001-010	detectar las fugas de fluido, con tal de evitar quemaduras en el cuerpo. 14) Asegurarse que todas las líneas de presión se encuentren despresurizadas. ACCIONES DE MANTENIMIENTO ========== 1) Remplazar las empaquetaduras (En set of spare parts "bowl/hood"). 2) Relubricar los rodamientos del motor. 3) Revisar tuberias y mangueras y reemplazar en caso de ser necesario. OBSERVACIONES ========== Se realiza por primera vez a los 6 meses o 4.000 horas, seguido se realiza anual o cada 8.000 hrs de la siguiente forma: 0,5/1,5/2,5/3,5/4,5/5,5 años… o 4.000/12.000/20.000/28.000 hrs... Se necesita: set of spare parts ""bowl/hood"" (operation: 1 year or 8.000 hours) DOCUMENTOS DE REFERENCIA ========== Nombre del manual: Instruction manual Designation: Centrifuge Type: OTC 2-02-137 Book No. 2050-9001-010 Edition: 0905 Nombre del manual: Instruction manual Designation: Centrifuge Type: OTC 3-02-137 Book No. 2051-9001-010 Edition: 1203	tornillos hasta que dos permanezcan colocados en diagonal, liberar la presión / resorte y luego retirar los dos tornillos faltantes. 11) No depositar fluidos de mantención en recipientes de vidrio, ya que estos se pueden quebrar. 12) Tener precaución con el manejo de soluciones de limpieza. 13) Utilizar siempre una placa o papel duro para detectar las fugas de fluido, con tal de evitar quemaduras en el cuerpo. 14) Asegurarse que todas las líneas de presión se encuentren despresurizadas. ACCIONES DE MANTENIMIENTO ========== 1) Remplazar las empaquetaduras (En set of spare parts "bowl/hood"). 2) Reemplazar correa de transmisión (En set of spare parts "bowl/hood"). 3) Revisar rodamiento de bolas y reemplazar en caso de ser necesario (En set of spare parts "Drive"). 4) Re lubricar rodamientos del motor. 5) Cambiar el aceite y realizar una limpieza profunda de la cámara de accionamiento (En caso de usar aceite mineral). 6) Revisar tuberías, mangueras y reemplazar en caso de ser necesario. OBSERVACIONES ========== Se realiza por primera vez al año o 8.000 horas, seguido se realiza cada dos años o cada 16.000 hrs de la siguiente forma: 1/3/5/7 años… o 8.000/24.000/40.000 hrs... Se necesita: set of spare parts "bowl/hood" (operation: 1 year or 8.000 hours) Se necesita: set of spare parts "Drive" (Operation: 2 years or 16.000 hours) DOCUMENTOS DE	el manejo de soluciones de limpieza. 13) Utilizar siempre una placa o papel duro para detectar las fugas de fluido, con tal de evitar quemaduras en el cuerpo. 14) Asegurarse que todas las líneas de presión se encuentren despresurizadas. ACCIONES DE MANTENIMIENTO ========== 1) Reemplazar las empaquetaduras (En set of spare parts "bowl/hood"). 2) Reemplazar correa de transmisión (En set of spare parts "bowl/hood"). 3) Reemplazar las empaquetaduras (En set of spare parts "Drive"). 4) Reemplazar anillo de empaquetadura radial (En set of spare parts "Drive"). 5) Reemplazar los rodamientos de bola (En set of spare parts "Drive"). 6) Reemplazar las monturas antivibración (En set of spare parts "Drive", solo para modelo OTC 2-02-137). 7) Reemplazar las almohadillas caucho metal (En set of spare parts "Drive"). 8) Re lubricar los rodamientos del motor. 9) Cambiar el aceite y realizar una limpieza profunda de la cámara de accionamiento (En caso de usar aceite mineral o aceite sintético). 10) Revisar tuberías, mangueras y reemplazar en caso de ser necesario. OBSERVACIONES ========== Se realiza cada dos años o cada 16.000 hrs de la siguiente forma: 2/4/6/8 años… o 16.000/32.000/48.000 hrs... Se necesita: set of spare parts "bowl/hood" (operation: 1 year or 8.000 hours) Se necesita: set of spare parts "Drive" (Operation: 2 years or 16.000 hours)

	Edition: 0905 Nombre del manual: Instruction manual Designation: Centrifuge Type: OTC 3-02-137 Book No. 2051-9001-010 Edition: 1203		REFERENCIA ========== Nombre del manual: Instruction manual Designation: Centrifuge Type: OTC 2-02-137 Book No. 2050-9001-010 Edition: 0905 Nombre del manual: Instruction manual Designation: Centrifuge Type: OTC 3-02-137 Book No. 2051-9001-010 Edition: 1203	DOCUMENTOS DE REFERENCIA ========== Nombre del manual: Instruction manual Designation: Centrifuge Type: OTC 2-02-137 Book No. 2050-9001-010 Edition: 0905 Nombre del manual: Instruction manual Designation: Centrifuge Type: OTC 3-02-137 Book No. 2051-9001-010 Edition: 1203

Tabla 22: Periodos de mantenimiento para purificadores diésel marca Alfa Laval. Fuente: Victor Frederico, creado con información levantada de la empresa de purificadores ALFA LAVAL.

Marca	Modo de operación	Revisión diaria	Limpieza de bol	Cambio de aceite	Servicio mayor
Alfa Laval	Estándar	Diaria	Determinar por RAM	Aceite mineral: 6 meses Aceite sintético: 12 meses	Aceite mineral: 12 meses Aceite sintético: 12 meses
	Pesado	Diaria	Determinar por RAM	Aceite mineral: 1.500 horas de op. Aceite sintético: 2.000 horas de op.	Aceite mineral: 7.500 horas de op. Aceite sintético: 8.000 horas de op.

Tabla 23: Periodos de mantenimiento para purificadores diésel marca GEA Westfalia. Fuente: Victor Frederico, creado con información levantada de la empresa de purificadores GEA Westfalia.

Marca	Modo de operación	Revisión diaria	Limpieza de bol	Servicio anual	Servicio bienal año par	Servicio bienal año impar
GEA Westfalia	Estándar	Diaria	Determinar por RAM	Cada 12 meses	Cada 24 meses debiéndose realizar según antigüedad del equipo (Año de operación par)	Cada 24 meses debiéndose realizar según antigüedad del equipo (Año de operación impar)
	Pesado	Diaria	Determinar por RAM	Cada 8.000 horas de Op.	Cada 16.000 horas de Op.	Cada 16.000 horas de Op. Se comienza a contar desde que el equipo cumple 8.000 horas de Op. (se debe realizar en esas primeras 8.000 horas.)

Tabla 24: Tablas de selección de diámetro interno para equipos Alfa Laval y GEA Westfalia. Fuente: Victor Frederico, creado con información levantada de las empresas de purificadores ALFA LAVAL y GEA Westfalia.

Densidad a 15°C/Diámetro interno de la perforación	MAB 104B [mm]	OTC 2 [mm]	OTC 3 [mm]
0,800 - 0,843	93,5	36	36
0,901 - 0,843	83	41	41

Tabla 25: Tabla de selección de disco de gravedad para modelo Alfa Laval MAB 103B-24. Extraído de Alfa Laval. Extraído de ALFA LAVAL

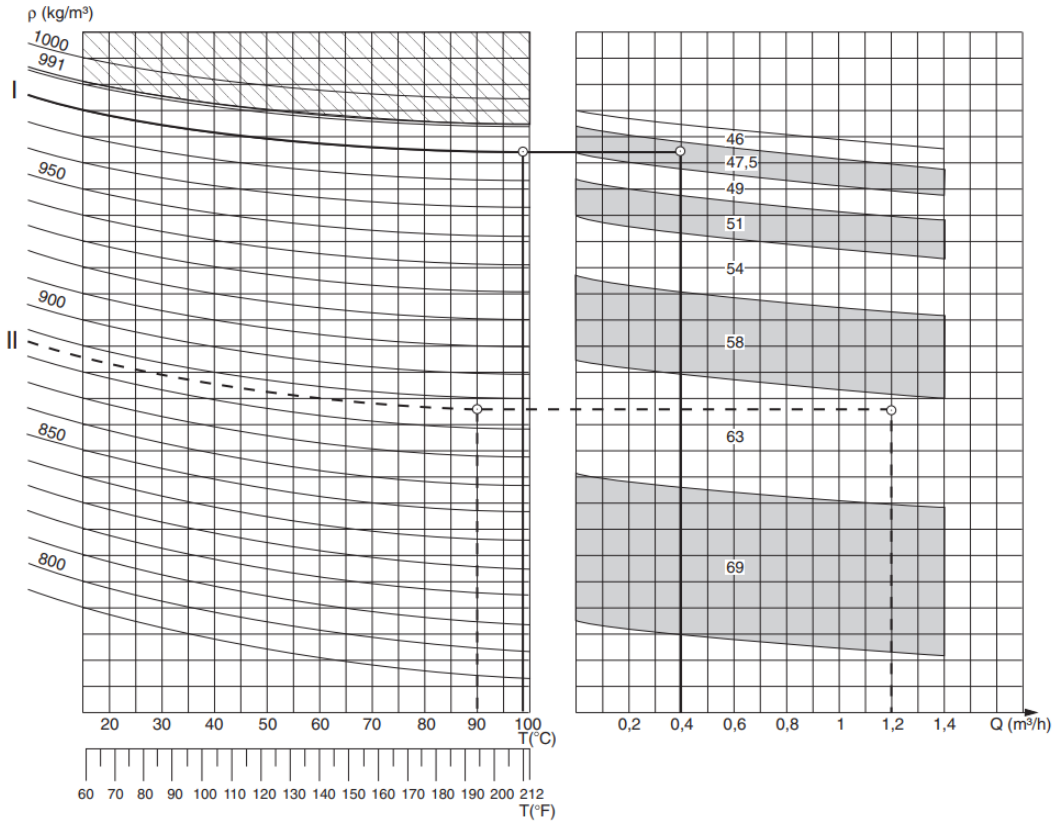


Tabla 26: Tabla de filtros compatibles con serie racor 2020 encontrados en la flota. Fuente: Victor Frederico, creado con información levantada de la empresa afiliada a la memoria.

Ítem en listado	Marca	Código	Micraje	Eficiencia de filtrado (partículas)/Prueba
FILTRO COMBUSTIBLE PARKER 2020SM-OR	Parker Racor	2020SM-OR	2 µm	98% a 4 µm / J905, ISO 19438
FILTRO COMBUSTIBLE PARKER 2020TM-OR	Parker Racor	2020TM-OR	10 µm	98% a 10 µm / J905, ISO 19438
FILTRO COMBUSTIBLE PARKER 2020PM-OR	Parker Racor	2020PM-OR	30 µm	98% a 30 µm / J905, ISO 19438
FILTRO COMBUSTIBLE PARKER 2020N-02	Parker Racor	2020N-02	2 µm	98% a 4 µm / J905, ISO 19438
FILTRO COMBUSTIBLE PARKER 2020N-10	Parker Racor	2020N-10	10 µm	98% a 10 µm / J905, ISO 19438
FILTRO SEPARADOR P552020	Donaldson	P552020	10 µm	Beta75 a 10 µm (≈98,7%) y Beta1000 a 14 µm (≈99,9%) / ISO 16889
FILTRO SEPARADOR COMBUSTIBLE FS20202	Fleetguard (Cummins Filtration)	FS20202	10 µm	98% a 10 µm / J905
FILTRO COMBUSTIBLE LUBER-FINER L2020F	Luber-Finer	L2020F	10 µm	99% a 10 µm / ISO 19438
FILTRO COMBUSTIBLE LUBER-FINER L2020FN	Luber-Finer	L2020FN	10 µm	99% a 10 µm / ISO 19438)

Tabla 27: Tabla de filtros compatibles para motores en la flota. Fuente: Victor Frederico, creado con información levantada de la empresa afiliada a la memoria.

Tipo de motor	Marca	Filtro mínimo requerido	Opción en la flota
Altas Revoluciones	Caterpillar	20 micrones (absoluto)	Racor 10 micras, Separ 10 micras, o cualquier filtro de 10 micras con mínimo eficiencia del 98%
Altas Revoluciones	MTU	20 micrones (absoluto)	Racor 10 micras, Separ 10 micras, o cualquier filtro de 10 micras con mínimo eficiencia del 98%
Medias Revoluciones	Wärtsilä	34 micrones (absoluto)	Racor 30 micras, Separ 30 micras, o cualquier filtro de 30 micras con mínimo eficiencia del 98%

Tabla 28: Tabla de especificaciones del remolcador piloto seleccionado. Fuente: Victor Frederico, creado con información levantada de la empresa afiliada a la memoria.

Nombre Oficial	SAAM Tarqui
Estatus	En servicio
País	Ecuador
Año de Fabricación	2016
Break Horse Power [bhp]	4.828
Pollard Pull [ton]	70
Eslora [m]	25,3
Manga [m]	12
Casa Clasificadora	Lloyd's Register (LR)
Origen	Turquía
MMSI	354444000
Motores Principales x2 Marca/Modelo	Wärtsilä 9L20
Generadores x2 Marca/Modelo	Perkins 1104C4.4TA (93,4KW)

Tabla 29: Especificaciones diésel requeridas por Caterpillar, MTU y Wärtsilä. Datos obtenidos de Caterpillar, MTU y Wärtsilä.

Especificación	Unidad	Límite	CAT	MTU	Wärtsilä Serie 20	Método de Prueba y Referencia
Concentración de partícula	-	Máx.	ISO 18/16/13	ISO 18/17/14	No solicita	ISO 4406 ASTM D7619
Densidad a 15°C	g/ml	Máx.	0,860	0,890	0,890	ISO 3675 ISO 12185 ASTM D287 ASTM D1298 ASTM D4052
		Mín.	0,800	0,820	0,800	
Contenido de Agua	ppm	Máx.	200	200	3000	ISO 12937 ASTM D6304 ASTM E 1064
Crecimiento de Bacterias	-	-	Inadmisible	Inadmisible	Inadmisible	-

Tabla 30: Plan de mantenimiento antiguo del purificador presente en el Piloto. Fuente: Victor Frederico, creado con información levantada de la empresa afiliada a la memoria.

Tarea	Acciones de mantenimiento
Inspección Cada 6 Meses: Purifier Westfalia OTC2	1) Verificar las herramientas en busca de daños visibles 2) Reemplazar las Juntas 3) Verificar el motor 4) Vuelva a lubricar los rodamientos del motor (si es necesario) 5) Verificar las manqueras y las tuberías de las mangueras y reemplazar en caso de ser necesario
Inspección Cada 12 Meses: Purifier: Westfalia OTC2	1) Realizar el reemplazo de las juntas según las instrucciones del fabricante. Note: El fabricante recomienda que este Overhaul se realice en cada intervalo de 4000H. 1) Verificar las herramientas en busca de daños visibles. Haga que una persona competente Verificar la seguridad de funcionamiento del equipo de transporte de carga. 2) Reemplazar las juntas. 3) Reemplazar la correa de transmisión. 4) Verificar los rodamientos de bolas ranurados y reemplácelos si es necesario. 5) Verificar el motor. 6) Vuelva a lubricar los rodamientos del motor (si es necesario). 7) Cambio de aceite y cámara. 8) Verificar las mangueras y las tuberías de las mangueras y reemplazarlas en caso de ser necesario.
Inspección Cada 24 Meses: Purifier: Westfalia OTC 2	1) Reemplazar la correa de transmisión y las juntas según las instrucciones. 2) Revisar los rodamientos de bolas ranurados, reemplazarlos cuando sea necesario. 3) Realizar el cambio de aceite y la limpieza a fondo de la cámara de transmisión Note: El fabricante recomienda que este overhaul se realice en cada intervalo de 8000H.) Verificar las herramientas en busca de daños visibles. Haga que una persona competente Verificar la seguridad de funcionamiento del equipo de transporte de carga. 2) Reemplazar las juntas. 3) Reemplazar la correa de transmisión.

	4) Reemplazar las juntas. 5) Reemplazar el anillo de empaquetadura radial. 6) Reemplazar los rodamientos de bolas ranurados. 7)Reemplazar los cojines de caucho-metal. 8) Verificar el motor. Vuelva a lubricar los rodamientos del motor (si es necesario) 9) Cambio de aceite y Limpieza a fondo de la cámara de transmisión 10) Verificar las mangueras y tuberías de las mangueras y reemplazarlas en caso de ser necesario.

Tabla 31: Nuevo plan de mantenimiento para remolcador piloto. Fuente: Victor Frederico, creado con información levantada de la empresa de purificadores GEA Westfalia.

nspección Diaria	1)) Nivel de aceite. 2) Temperatura de operación. 3) Presiones. 4) Filtraciones. 5) Vibración. 6) Consumo energético. 7) Tiempo en iniciar el equipo. 8) Mangueras y tubos de conexión.
Limpieza de bol separador	1) Bol separador: - En él se debe levanta el Capó del equipo, las camisas del tambor, el plato separador y los platos. Se limpia asegurándose que no haya suciedad en ellos. OBTENCIÓN DE PERIODO DE LIMPIEZA ========== Se obtiene el periodo de manera empírica, para ello se enciende el purificador por un tiempo determinado, una vez completado el tiempo de prueba se apaga el equipo y se mide la cantidad de sedimento formado en el bowl. Con la cantidad de sedimento y el tiempo de prueba se obtiene el periodo de limpieza máximo del equipo, se recomienda hacerlo antes que ese tiempo. t_max= (t_v*V*0,7)/(V_f) t_max: Tiempo máximo permitido para hacer limpieza de bol separador [hrs] t_v: Tiempo de prueba empírica [hrs] V: Volumen máximo de almacenamiento de solidos (Sedimento)[L] V= 0,75[L] V_f: Volumen de solido (Sedimento) obtenido en prueba empírica [L]
Mantenimiento anual	1) Remplazar las empaquetaduras (En set of spare parts "bowl/hood").

	2) Relubricar los rodamientos del motor. 3) Revisar tuberías y mangueras y reemplazar en caso de ser necesario.
Mantenimiento año IMPAR desde ciclo de vida del equipo	1) Remplazar las empaquetaduras (En set of spare parts "bowl/hood"). 2) Reemplazar correa de transmisión (En set of spare parts "bowl/hood"). 3) Revisar rodamiento de bolas y reemplazar en caso de ser necesario (En set of spare parts "Drive"). 4) Re lubricar rodamientos del motor. 5) Cambiar el aceite y realizar una limpieza profunda de la cámara de accionamiento (En caso de usar aceite mineral). 6) Revisar tuberías, mangueras y reemplazar en caso de ser necesario.
Mantenimiento año PAR desde ciclo de vida del equipo	1) Reemplazar las empaquetaduras (En set of spare parts "bowl/hood"). 2) Reemplazar correa de transmisión (En set of spare parts "bowl/hood"). 3) Reemplazar las empaquetaduras (En set of spare parts "Drive"). 4) Reemplazar anillo de empaquetadura radial (En set of spare parts "Drive"). 5) Reemplazar los rodamientos de bola (En set of spare parts "Drive"). 6) Reemplazar las monturas antivibración (En set of spare parts "Drive", solo para modelo OTC 2-02-137). 7) Reemplazar las almohadillas caucho metal (En set of spare parts "Drive"). 8) Re lubricar los rodamientos del motor. 9) Cambiar el aceite y realizar una limpieza profunda de la cámara de accionamiento (En caso de usar aceite mineral o aceite sintético). 10) Revisar tuberías, mangueras y reemplazar en caso de ser necesario.

Tabla 32: Requisitos de limpieza para el tanque de servicio en remolcadores marítimos. Elaborado con información extraída de MTU, Caterpillar y Wärtsilä.

Tipo de motor	Marca	Conteo de partículas [-]	Calidad de agua [ppm]	Total de solidos [mg/l]	Total de sedimentos [% m/m]
Altas Revoluciones	Caterpillar	ISO 18/16/13	200	10	0,05
Altas Revoluciones	MTU	ISO 18/17/14	200	20	0,05
Medias Revoluciones	Wärtsilä	ISO 20/18/15	2000	-	0,20

Tabla 33: Plan de Mantenimiento para el equipo prefiltro AK1000P. Elaborado con información extraída la empresa Gigonsa AK.

Tarea	Frecuencia	Acciones
Purga de sistema	Cada 30 días o cuando la alarma de agua lo indique	1) Asegurarse de que el motor esté apagado. 2) Abrir las válvulas de aire y drenado y drenar hasta obtener diésel limpio (aproximadamente ¼ adicional al contenido de impurezas y agua); cerrar la válvula de drenado y purgar el aire del sistema por la válvula de aire. 3) Rellenar la unidad: abrir el switch por 1 minuto, encender el motor por 5 minutos y acelerar a 2.000 rpm, verificando que no existan fuga.
Mantenimiento profundo	Cada 180 días; en caso de contaminación excesiva, cada 60 días	1) Asegurarse de que el motor esté apagado. 2) Abrir las válvulas de aire y drenado y drenar hasta obtener diésel limpio. 3) Desmontar el equipo: retirar mangueras, válvulas y sensor de agua; limpiar con aire comprimido hasta que el aire salga limpio y sin impurezas. 4) Rearmar el equipo: colocar abrazaderas, mangueras, válvulas y sensor de agua, y fijar el equipo. 5) Rellenar la unidad: abrir el switch por 1 minuto, encender el motor por 5 minutos y acelerar a 2.000 rpm, verificando que no existan fugas.

Tabla 34: Procedimiento de toma de muestra para muestreo periódico. Autor: Victor Frederico. Elaborado con información extraído de empresa afiliada a memoria.

Paso	Acción
Paso 1 – Configuración de válvulas	Con el motor detenido, cerrar la válvula de salida del filtro primario (lado motor) y verificar que la válvula de entrada (lado tanque de servicio) permanezca abierta.
Paso 2 – Purga Sacrificial	Abrir la válvula de purga y drenar al recipiente de descarte el contenido inferior del vaso (agua libre y sedimento acumulados por el propio filtro).
Paso 3 – Barrido de combustible	Mantener la purga abierta hasta observar un flujo uniforme, sin estratificación ni frente de agua (típicamente 1 a 2 litros adicionales).
Paso 4 – Toma de muestra	Sin interrumpir el flujo, llenar el envase hasta aproximadamente tres cuartos de su capacidad directamente desde el chorro, evitando el contacto del envase con la válvula o superficies adyacentes. Tapar de inmediato, sellar y rotular (remolcador, punto, fecha, horómetro).
Paso 5 – Restablecimiento del sistema	Cerrar la válvula de purga y reabrir la válvula de salida (lado motor). Purgar el aire del filtro, verificar ausencia de fugas, confirmar el arranque y funcionamiento normal del motor.
Paso 6 – Registro y disposición	Registrar el trabajo y los hallazgos en la plataforma de gestión del mantenimiento y descartar el combustible de purga en el circuito de residuos oleosos; NO debe retornarse al tanque de servicio.

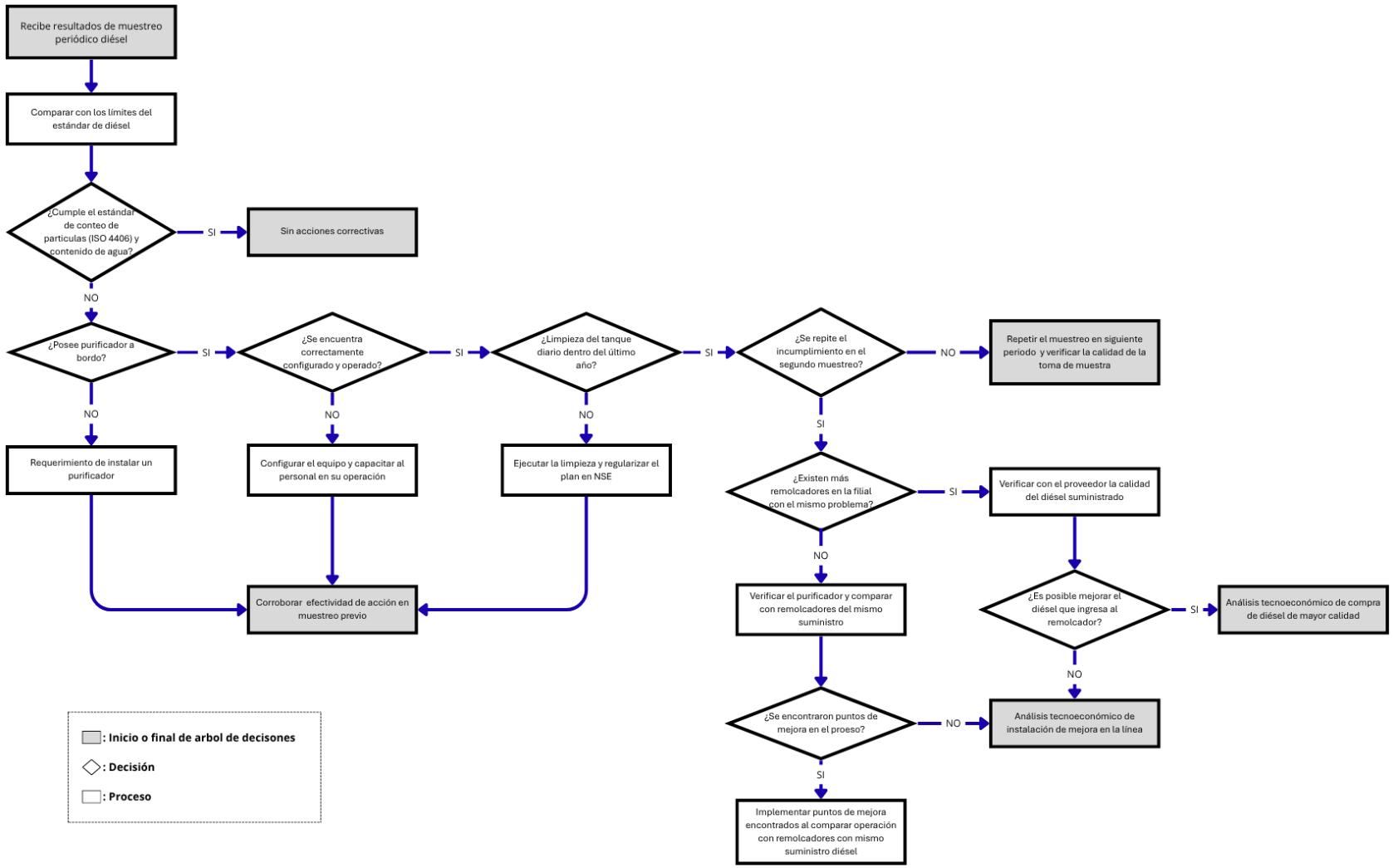


Ilustración 15: Ilustración ampliada del árbol de decisiones para la instalación de una mejora en la línea de purificado y filtrado diésel de un remolcador. Autor: Victor Frederico. Elaborado con información levantada de la empresa afiliada a la memoria.