

UNIVERSIDAD TÉCNICA FEDERICO SANTA MARÍA

SEDE VIÑA DEL MAR – JOSÉ MIGUEL CARRERA

**PROPUESTA DE MEJORA DE CONFIABILIDAD HUMANA EN DETROIT S.A.
RAJO INCA**

Trabajo de Titulación para
optar al Título Profesional de
INGENIERO EN
MANTENIMIENTO
INDUSTRIAL

Alumno:

Germán Hernández

Profesor guía:

Mg. Ing. Carlos Baldi González



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 DE CONFIABILIDAD HUMANA EN DETROIT S.A.
RAJO INCA

Nombre del candidato(a): Germán Alexis Hernández Gómez

Carrera / Grado: Ingeniería en Mantenimiento Industrial con Licenciatura en
Ingeniería

Campus: Viña del Mar Departamento: Mecánica

2.- VALIDACIÓN DEL PROFESOR GUÍA/DIRECTOR DE TESIS

Yo, Carlos Baldi González, 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

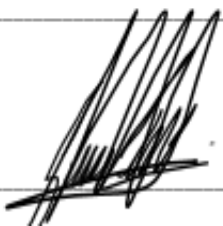
Fundamentación de la necesidad de confidencialidad (obligatorio si se solicita embargo):

4.- FIRMAS

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

Fecha: 07/07/2026 Firma: 

Estudiante o Candidato(a):

Fecha: 06/07/2026 Firma: 

Este trabajo se lo dedico a mis papás, hermanos y mi pareja, que son quienes han estado conmigo en este proceso y en todos mis altibajos, y quienes son las personas que más amo y admiro, Gracias totales.

RESUMEN

Este trabajo de título presenta una propuesta de mejora para la confiabilidad humana en el mantenimiento de motores MTU Serie 4000, operados por Detroit S.A. en la faena Rajo Inca. El diagnóstico inicial, realizado mediante una auditoría de confiabilidad humana (ICH), permitió identificar brechas críticas en la formación técnica y en la falta de estandarización de procesos de diagnóstico y montaje. Estas deficiencias impactan directamente en la disponibilidad de los camiones CAEX 930E y cargadores frontales WE1850, generando retrabajos y un aumento en el tiempo de detención total (TDT).

La solución propuesta se fundamenta en los requisitos de la norma ISO 55001:2024 y se estructura en tres ejes: la digitalización de protocolos de mantenimiento a través de DataScope, la creación de guías visuales para componentes críticos y un plan de formación técnica que incorpora mentoring en terreno. La implementación de puntos de control obligatorios y auditorías de cumplimiento busca asegurar la trazabilidad documental y reducir la variabilidad en las intervenciones. Los resultados proyectados indican una reducción del MTTR de entre un 20% y 30%, junto con un retorno de inversión (ROI) estimado del 88% para el primer año, logrando estabilizar el factor de retrabajo (FR) en niveles inferiores a 2 veces lo inicial.

El diagnóstico se fundamentó metodológicamente en una Auditoría de Confiabilidad Humana (HRA) aplicada a una muestra de $n=12$ trabajadores, compuesta por 10 técnicos y 2 supervisores. Cuantitativamente, la operación actual enfrenta eventos críticos como fallas en la instalación de golillas de inyectoras, que han generado un Tiempo de Detención Total (TDT) de 26 horas por evento, resultando en un Factor de Retrabajo (FR) de 52 veces lo inicial, y una pérdida de disponibilidad mensual de 4,33% por equipo afectado. El impacto económico se estima en USD 7.630 por cada incidente de filtración de aceite, considerando materiales, limpieza y costo de oportunidad.

INDICE

RESUMEN	3
ÍNDICE DE GRÁFICOS	6
ÍNDICE DE TABLAS	6
SIGLAS Y SIMBOLOGIA	8
INTRODUCCION	9
OBJETIVO GENERAL	11
OBJETIVOS ESPECIFICOS	11
CAPITULO 1: ANTECEDENTES GENERALES	12
1.0 Resumen de capítulo	13
1.1 Antecedentes de la empresa	13
1.1.1 Misión	14
1.1.2 Visión	14
1.1.3 Alcance de la Empresa	14
1.1.4 Actividades en taller Casa matriz	15
1.1.5 Actividades de Detroit en Faena Rajo Inca.	17
1.1.6 Organigrama Detroit Rajo Inca	17
1.2 Auditoría de Confiabilidad Humana (Identificación de Brechas)	18
1.2.1 Objetivo de la auditoría	18
1.2.2 Instrumento de medición (encuesta en Microsoft Forms)	19
1.2.3 Alcance y población	22
1.2.4 Procedimiento de aplicación	22
1.2.5 Plan de análisis de datos	22
1.2.6 Resultados de la auditoría	24
1.2.7 Alfa de Cronbach	26
1.2.8 Discusión	27
1.2.9 Limitaciones	28
1.3 Conclusión del diagnóstico	29
CAPÍTULO 2. ESTANDARIZACIÓN DE PROCESOS CRÍTICOS DE MANTENCIÓN	30
2.0 Resumen de capítulo	31
2.1 Propósito y marco normativo	31

2.2 Alcance y cadena de valor (SIPOC)	31
2.3 Requisitos habilitantes	32
2.4 Estándares operacionales	33
2.4.1 Procedimiento de diagnóstico	33
2.4.2 Procedimiento de intervención (desmontaje/montaje)	33
2.4.3 Procedimiento de cierre y liberación	34
2.5 Trazabilidad documental (ISO 7.5)	34
2.6 Personas y comunicación (ISO 7.2 y 7.4)	35
2.7 Gestión del cambio (ISO 8.2)	35
2.8 Control de proveedores y servicios externos (ISO 8.3)	36
2.9 Barreras y verificación (error-proofing)	36
2.10 RACI (roles)	37
2.11 Indicadores y metas	38
2.12 Caso crítico: golilla de inyector mal instalada (CF1850)	40
2.13 Programa de auditoría y revisión	44
2.14 Riesgos y mitigaciones	44
2.15 Cierre del capítulo	45
CAPÍTULO 3. PROPUESTA DE MEJORA Y EVALUACIÓN TÉCNICO- ECONÓMICA	46
3.1 Resumen de capítulo	46
3.2 Alcance	47
3.3 Supuestos y premisas	47
3.4 Metodología	48
3.5 Diseño técnico de la propuesta	49
3.5.1 Estándares por tarea crítica	49
3.5.2 DataScope: flujo, evidencias y control documental	49
3.5.3 Programa de formación (e-learning + práctica guiada)	50
3.5.4 Gestión del cambio y control de externos	51
3.6 Casos de negocio	51
3.6.1 Caso A – Filtro de aceite mal instalado	51
3.6.2 Caso B – Golilla de inyector omitida/mal instalada (CF1850)	52
3.6.3 Caso C – Fallas eléctricas latentes	52
3.7 Evaluación económico-financiera	52

3.7.1 Valores Estimativos	52
3.7.2 Beneficio anual estimado (desglose)	53
3.7.3 Costos de despliegue	53
3.7.4 Resumen financiero	54
3.8 Plan de implantación	54
3.9 Cambio y comunicaciones	55
3.10 Gobernanza (RACI)	55
3.11 Auditoría interna y revisión	56
3.12 Resultados esperados	56
3.13 Cierre	56
CONCLUSION	58
BIBLIOGRAFIA	58
WEBGRAFÍA	60
ANEXOS	60

ÍNDICE DE GRÁFICOS

Gráfico 1-1: Gráfico Radial Global del diagnóstico ICH	21
--	----

Gráfico 1-2: Gráfico Radial comparativo por Rol (Técnicos vs Supervisores)	21
--	----

ÍNDICE DE TABLAS

Capítulo 1: Antecedentes Generales

Tabla 1-1: Estructura de dimensiones e ítems de la encuesta de auditoría	18
Tabla 1-2: Categorización de puntajes para el ICH	19
Tabla 1-3: Resultados de promedios por dimensión e ICH global	20
Tabla 1-4: Comparativa de puntajes ICH por rol de cargo	21

Capítulo 2: Estandarización de Procesos Críticos

Tabla 2-1: Matriz RACI de responsabilidades en el mantenimiento	32
Tabla 2-2: Definición de indicadores clave (KPI) y metas de desempeño	33
Tabla 2-3: Detalle de tiempos de recuperación en caso crítico CF1850	35
Tabla 2-4: Resumen técnico del formato de diagnóstico F-DIA-01	36
Tabla 2-5: Resumen técnico del formato de montaje F-MON-02	36
Tabla 2-6: Resumen técnico del formato de pruebas F-PRB-03	36
Tabla 2-7: Resumen técnico del formato de cierre F-CIE-04	37
Tabla 2-8: Resumen técnico del formato de lección aprendida F-LEC-05	37

Capítulo 3: Propuesta de Mejora y Evaluación Económica

Tabla 3-1: Parametrización de formatos y reglas de validación en DataScope	42
Tabla 3-2: Malla curricular del programa de formación técnica	43
Tabla 3-3: Desglose de costos asociados al filtro de aceite mal instalado	44
Tabla 3-4: Parámetros estimativos para la mejora de indicadores	45
Tabla 3-5: Cálculo del beneficio anual estimado por mitigación de eventos	45
Tabla 3-6: Resumen de costos de despliegue de la propuesta	46
Tabla 3-7: Resumen financiero del proyecto (ROI y Payback)	46
Tabla 3-8: Plan de implementación por fases y plazos	46
Tabla 3-9: Matriz de gobernanza (RACI) para el despliegue del proyecto	47

SIGLAS Y SIMBOLOGIA

ICH: Índice de Confiabilidad Humana (0–5).

PMA: Programa mecánico aprendiz (Casa Matriz, Santiago).

Mentoring: Acompañamiento 1:1 de un senior a un junior para aprender en terreno y reducir errores.

DDEC (Detroit Diesel Electronic Controls): Sistema de control/diagnóstico electrónico del motor (códigos y parámetros).

GAPS: Brechas o desviaciones identificadas entre el estado operativo actual y el estándar de desempeño definido (estándar/meta).

DDDL (Detroit Diesel Diagnostic Link): Herramienta de diagnóstico sistema DDEC

TDT (Tiempo de Detención Total): horas totales de equipo detenido por un evento.

FR (Factor de Retrabajo): TDT / tiempo previsto de la tarea (veces).

ΔA (Pérdida de disponibilidad): TDT / horas calendario del período.

MTBF (Mean Time Between Failures): tiempo medio entre fallas.

KPI (Key Performance Indicator): indicador clave de desempeño.

OEM (Original Equipment Manufacturer): fabricante original (MTU, Allison, etc.).

LOTO (Lockout/Tagout): bloqueo/etiquetado para asegurar equipos sin energía durante el trabajo.

Poka-yoke: “a prueba de errores”: barreras simples que evitan fallas humanas (plantillas, marcas, conectores únicos).

Estanqueidad: ausencia de fugas en un sistema (combustible, aceite, refrigerante, aire).

Ruteo/Rutado: disposición y fijación correcta de cañerías, mangueras y cables.

Flushing: limpieza forzada de un circuito (p. ej., lubricación) para remover contaminantes.

NC (No Conformidad): incumplimiento de un requisito (técnico, documental o de seguridad).

MOC (Management of Change) / Gestión del cambio: control formal de cambios de método, par, repuesto, etc.

SIPOC: Suppliers-Inputs-Process-Outputs-Customers; vista de alto nivel de un proceso.

RACI: matriz de roles (Responsible, Accountable, Consulted, Informed).

CAEX 930E: camión de extracción Komatsu 930E.

CF1850: cargador frontal modelo 1850.

ISO 55001: norma de sistemas de gestión de activos (requisitos).

Debriefing: Reunión técnica posterior a la tarea para analizar hallazgos y registrar lecciones aprendidas

INTRODUCCION

La operación minera en Rajo Inca (División Salvador de Codelco) exige una alta disponibilidad de sus activos críticos para cumplir con las metas de producción. Detroit

S.A. es el encargado del soporte técnico de los motores MTU Serie 4000 (16V4000C21/C11) instalados en camiones Komatsu 930E y cargadores frontales WE1850. En este entorno, la precisión en las tareas de diagnóstico, montaje y liberación técnica es fundamental, ya que cualquier error impacta directamente en la seguridad y en la continuidad operativa del contrato.

Actualmente, el servicio presenta una variabilidad en los resultados de mantenimiento derivada del recambio generacional y de brechas detectadas en la formación técnica inicial del personal. Esta problemática se cuantifica en un Índice de Confiabilidad Humana (ICH) global de 2,99, lo que sitúa la operación en un nivel de madurez medio con alta dependencia del criterio individual en lugar de procesos estandarizados. Esta falta de estandarización se traduce en retrabajos críticos, con un Factor de Retrabajo (FR) que ha alcanzado picos de 52 veces el tiempo inicial en eventos específicos, generando un Tiempo de Detención Total (TDT) de hasta 26 horas por errores de montaje y una pérdida económica estimada en USD 7.630 por cada incidente de falla latente.

Este trabajo sostiene que la mejora de la confiabilidad técnica requiere formalizar la transferencia de experiencia y asegurar el control operacional en terreno. Para ello, se propone una estrategia que integra el mentoring senior-junior, el uso de guías visuales y la validación obligatoria de pasos críticos mediante listas de verificación con doble firma. Estas medidas permiten que la liberación de los equipos a operación se realice bajo parámetros técnicos verificables.

La propuesta se rige por los lineamientos de la norma ISO 55001:2024, enfocándose en la integridad de la información documentada y el control de procesos. El objetivo final es reducir el impacto del error humano a través de la estandarización y la trazabilidad digital mediante DataScope, evaluando la factibilidad técnica y económica de estas acciones para optimizar los indicadores de mantenimiento en Detroit S.A.

OBJETIVO GENERAL

Diseñar una propuesta de mejora de confiabilidad humana en el mantenimiento de motores MTU Serie 4000 mediante estándares y capacitación enfocada en la reducción de la variabilidad operativa en la faena Rajo Inca.

OBJETIVOS ESPECIFICOS

1. Identificar las brechas de confiabilidad humana mediante encuestas y análisis de eventos históricos para la priorización de fallas críticas.
2. Estandarizar los procesos críticos de mantenimiento mediante procedimientos operativos y formatos trazables dirigidos al aseguramiento del control operacional bajo la normativa vigente.
3. Evaluar la viabilidad técnica y económica de la propuesta mediante indicadores financieros para la validación de la inversión requerida.

CAPITULO 1: ANTECEDENTES GENERALES

1.1 Resumen de capítulo

Este capítulo presenta los antecedentes de Detroit S.A. y el diagnóstico de confiabilidad humana en la faena Rajo Inca. Mediante una auditoría HRA (n=12), se identifica un Índice de Confiabilidad Humana (ICH) de 2,99, evidenciando una brecha crítica entre la competencia técnica (4,33) y la formación específica (1,33). Los hallazgos sustentan técnicamente la necesidad de una reingeniería operativa para transformar el conocimiento empírico en procesos estandarizados y auditables.

1.2 Antecedentes de la empresa

Fundada en 1949 (como Jaras Ltda.), pasó de distribuir combustibles y lubricantes a representar marcas como Vauxhall Bedford y, desde 1976, a focalizarse en Detroit Diesel y Allison; luego incorporó MTU y Donaldson, eje actual de su División Motores con fuerte presencia en Minería.

Desde 1985 inició una etapa de expansión: astillero de Puerto Montt (1990) con más de 150 embarcaciones y servicios a pesca, marina mercante, Armada y acuicultura; en 2000 ingresó a servicios marítimo-portuarios para salmonicultura; en 2001 adopta el nombre Detroit Chile S.A. y crea la División Turismo (Hotel Loberías del Sur, catamaranes a Laguna San Rafael, Parque Aikén del Sur). En 2002 abre Detroit Brasil Ltda. (astillero en Itajaí) y en 2007 co-funda Starnav para servicios offshore/portuarios (incl. Petrobras). En motores, mantiene presencia más de 40 años en minería y hoy representa MTU (industrial, marino y generación), con alto estándar de postventa. La Casa Matriz realiza diagnóstico y reparaciones mayores de motores, capacitaciones, Allison (transmisiones), Weichai (generación) y funciones administrativas; además cuenta con 6 oficinas a lo largo del país con repuestos y servicio técnico para respuesta rápida nacional.



Figura 1-1, Detroit S.A Casa Matriz, Santiago

Fuente: Elaboración propia en base a imagen tomada el 16/01/2023

1.2.1 Misión

Atender las necesidades de los clientes con personal altamente calificado, respetando los compromisos bajo pilares fundamentales: Seguridad, Calidad, Plazo e Integración, generando resultados positivos para los accionistas.

1.2.2 Visión

Ser reconocidos en el mercado por entregar un servicio de alta calidad y consolidarse como una empresa referente y líder en las actividades en que participa.

1.2.3 Alcance de la Empresa

Detroit S.A. cuenta con un alcance diversificado que se organiza en cuatro divisiones principales:

- **División Motores:** Representa a MTU, Detroit Diesel, Allison Transmission y Donaldson. Ofrece motores industriales y marinos (series 1000, 2000, 4000 y 8000), generación eléctrica (MTU Onsite Energy), transmisiones automáticas, sistemas de filtración, repuestos y programas de capacitación técnica.
- **Astilleros:** Fundado en 1990 en Puerto Montt, ha desarrollado más de 150 proyectos de embarcaciones en aluminio y acero, además de servicios de reparación y mantenimiento a la flota regional.

- **Servicios Marítimos y Portuarios:** Creado en el año 2000 en Puerto Montt, presta apoyo logístico a la industria acuícola mediante transporte de alimento y peces vivos, traslado de personal y operación de un puerto propio. En Brasil, participa en operaciones offshore a través de Starnav Serviços Marítimos.
- **Turismo:** Desarrollo de proyectos en Aysén como el Hotel Loberías del Sur, catamaranes a Laguna San Rafael y el Parque Aikén del Sur.

En minería, Detroit S.A. mantiene presencia en faenas como Rajo Inca, Collahuasi, Caserones, Los Bronces, Andina, Los Pelambres y Sierra Gorda, donde los motores MTU Serie 4000 constituyen activos críticos para la continuidad operativa.

1.2.4 Actividades en taller Casa matriz

Dentro del taller en casa matriz se divide en una variedad de áreas, en donde se encuentran:

Series altas: Donde se desarmen y arman los motores MTU de gran cilindraje como los de la faena rajo inca. Donde en la figura 1-3 podemos ver el área de armado de motores.

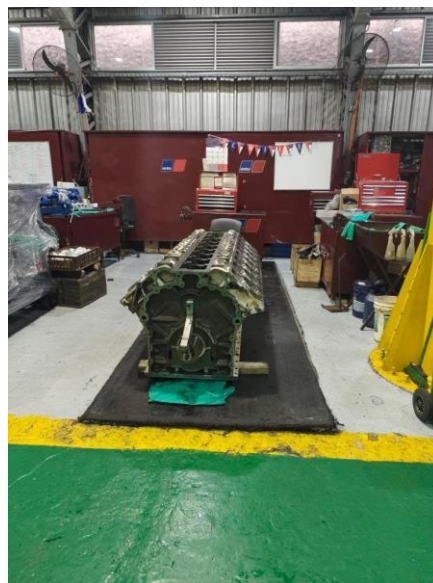


Figura 1-2, Area de Series Altas

Fuente: Elaboración propia en base a imagen tomada el 03/10/2025

Series bajas: En el cual se trabajan motores de bajo cilindraje como motores volvo de camiones de carretera, motores serie 2000 de embarcaciones pequeñas o motores Detroit de equipos más pequeños de minería o camiones de carretera.

Metrología: Área en el cual se realizan las medidas milimétricas de bielas, cigüeñales, pernos de culata o bielas, ejes de levas, entre otras, diagnosticando si es viable utilizar el componente nuevamente.

Componentes: Área donde se diagnostican los componentes internos y externos del motor, como lo son pistones, bombas, dámper, filtros de aceite centrífugos y automáticos, culatas, camisas y turbos.

Dinamómetro: Luego del armado del motor, este pasa a pruebas en donde se evalúan fugas, parámetros de funcionamiento, entrega de potencia entre otros aspectos.

Módulos: Posterior a que el motor cumpla con lo proyectado, este es pasado al área en donde se le monta radiador y alternador principal para tener un módulo listo para la instalación en el equipo minero.

Allison: taller de diagnóstico y reparación de cajas automáticas Allison.

Weichai: Diagnóstico y reparación de motores de generación eléctrica Weichai.

Capacitaciones: Cuenta de 2 salas, un motor de Maqueta y múltiples arneses y módulos de control electrónicos (ECM), Para la realización de Cursos. Sala mostrada en figura 1-4.



Figura 1-3, Salas de capacitación

Fuente: Elaboración propia en base a imagen tomada el 03/10/2025

1.2.5 Actividades de Detroit en Faena Rajo Inca.

En la faena Rajo Inca en donde Detroit, a diferencia de otras faenas en donde la empresa suele ser subcontrato de Komatsu, cuenta con contrato directo con la empresa mandante el cual es Codelco, la empresa ofrece servicio de mantención y reparación de motores 16V4000C21 y C11 instalados en camiones CAEX 930E y Cargadores frontales 1850, Esto conlleva mantenciones preventivas y correctivas, cuando el daño de un motor es grave (motor fundido), este se extrae del equipo para ser enviado a reparar a la casa matriz, todo lo demás se realiza en faena, como cambio de unidades de fuerza (pistón, biela, camisas, bombas, etc)

1.2.6 Organigrama Detroit Rajo Inca

La estructura de cargos dentro de Detroit Rajo inca se compone del Administrador de Contrato primeramente como jefe directo de bodegueras, supervisores, prevencionistas y planificador, los técnicos tienen como jefe directo a su supervisor a cargo.

Actualmente en la faena se cuenta con:

- 1 administrador de contrato
- 4 supervisores
- 1 planificador
- 2 bodegueras
- 2 prevencionistas de Riesgo
- 16 técnicos Mecánicos

Organigrama:

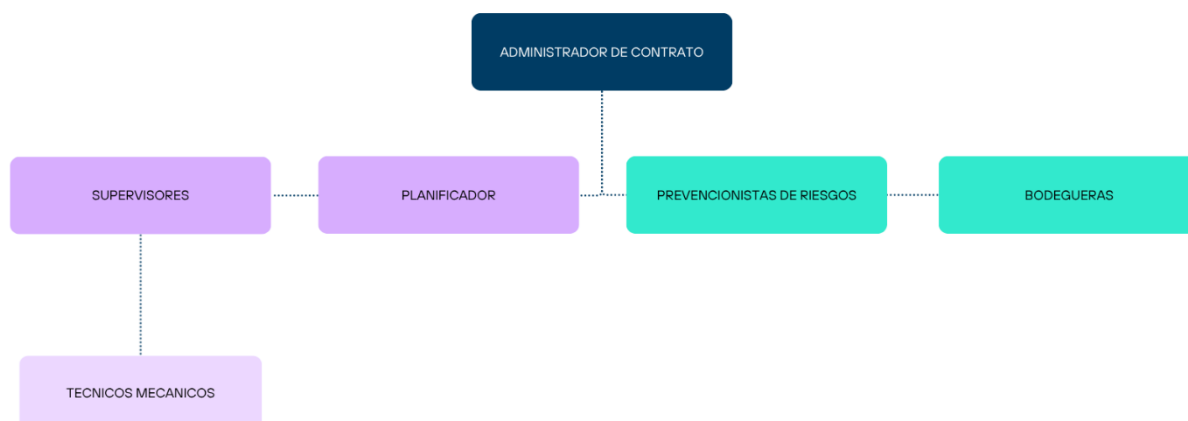


Figura 1-4, Organigrama Detroit Rajo Inca

Fuente: Elaboración propia con creación el 07-10-2025

1.3 Auditoría de Confiabilidad Humana (Identificación de Brechas)

Se utilizó una auditoría de confiabilidad humana (HRA) para cuantificar prácticas y condiciones que influyen en la ejecución del mantenimiento, integrando competencias individuales, controles de calidad y condiciones organizacionales. El instrumento se diseñó con referentes HRA (industrias de alto riesgo) y se alineó con ISO 55001 (cláus. 7–8: competencia, información documentada y operación) e ISO 30401 (aprendizaje, lecciones aprendidas). Esto permite obtener una línea base comparable (escala 0–5) y un índice sintético (ICH) para priorizar brechas.

1.3.1 Objetivo de la auditoría

Evaluar el nivel de desempeño de la confiabilidad humana en el mantenimiento de motores MTU Serie 4000 en Detroit S.A. Rajo Inca, identificando brechas en seis dimensiones:

1. **Formación y experiencia:** Cuantificación de la trayectoria académica y años de servicio específico en la Serie 4000 para determinar la madurez del perfil técnico .
2. **Competencia técnica:** Calificación de la destreza en el uso de software de diagnóstico (DDDL) y precisión en la aplicación de torques críticos según manual OEM .

3. **Comunicación y registro:** Evaluación de la calidad en la transferencia de información técnica durante el traspaso de turnos y el llenado de bitácoras operativas.
4. **Liderazgo y control de calidad:** Medición de la efectividad de la supervisión directa y la ejecución de retroalimentación técnica en tareas de alta criticidad.
5. **Gestión del conocimiento:** Verificación de la disponibilidad de guías visuales y la formalización de lecciones aprendidas tras fallas latentes.
6. **Condiciones organizacionales:** Análisis de la suficiencia de herramientas calibradas, razonabilidad de los tiempos asignados y factores de motivación administrativa.

El diagnóstico se enmarca en los lineamientos de gestión de activos y de factores humanos (competencia, conciencia, comunicación y conocimiento) que sustentan la propuesta de mejora del Capítulo 2.

“La organización deberá realizar auditorías internas a intervalos planificados” (ISO 55001:2024, cl. 9.2.1, p. 15).

“Al establecer el programa o los programas de auditoría interna, la organización debe considerar la importancia de los procesos involucrados y los resultados de auditorías anteriores” (ISO 55001:2024, cl. 9.2.2, p. 15).

1.3.2 Instrumento de medición (encuesta en Microsoft Forms)

La auditoría se levantó mediante un cuestionario estructurado aplicado en Microsoft Forms, orientado a técnicos y supervisores del mantenimiento de motores MTU Serie 4000 en Rajo Inca. El formulario es anónimo, de respuesta individual, y combina ítems cerrados (opción única) con preguntas abiertas para captar evidencia cualitativa.

A) Estructura del cuestionario y contenido

El instrumento contiene 28 preguntas, organizadas en cinco bloques analíticos y un bloque de perfil:

1. Perfil (no puntuado):

- P1: Cargo (Supervisor / Técnico).

2. Formación y experiencia (puntuado):

- P2: Años en S4000
- P3: Tiempo de preparación en Casa Matriz
- P4: N° de cursos (sin PMA)
- P5: Experiencia en faena

3. Competencia técnica

- P6: Parámetros de torque y uso de torquímetro calibrado en tareas críticas
- P7: Diagnóstico de fallas comunes del MTU S4000 sin ayuda externa
- P8: Manejo de parámetros de funcionamiento y software de diagnóstico
- P9: Verificación de fugas cuando corresponde, antes de entregar el equipo
- P10: Procedimiento correcto para instalación de componentes críticos (unidades de fuerza, bombas, inyectores, etc.)
- P11: Cuidado/Meticulosidad en instalación de componentes o aseguramiento de que el personal lo cumpla

4. Comunicación y registro

- P12: Traspaso de turno escrito (bitácora) con la información técnica necesaria
- P13: Registro escrito claro de lo ejecutado, pendientes y riesgos
- P14: Instrucciones de trabajo a tiempo y completas
- P15: No conformidades comunicadas al equipo del siguiente turno

5. Liderazgo y control de calidad

- P16: Existencia de líder técnico que revisa trabajos críticos
- P17: Retroalimentación técnica sobre desempeño y oportunidades de mejora
- P18: Doble verificación (técnico + líder/supervisor) en trabajos críticos

6. Gestión del conocimiento y capacitación

- P19: Disponibilidad de procedimientos/guías visuales (checklists, fotos, videos)
- P20: Capacitaciones formales sobre MTU S4000 en los últimos 12 meses
- P21: Lecciones aprendidas registradas y socializadas

7. Condiciones organizacionales

- P22: Herramientas y útiles disponibles y en buen estado

- P23: Preparación en Santiago (PMA) suficiente para operar con seguridad y calidad
- P24: Tiempos asignados razonables que no presionan a omitir pasos
- P25: La gestión administrativa (pagos, liquidaciones, EPP) afecta mi motivación

8. Preguntas abiertas

- P26: Incidente técnico más complejo enfrentado y cómo se resolvió.
- P27: Capacitaciones específicas prioritarias.
- P28: Sugerencias para mejorar la confiabilidad humana en su área.

B) Escalas y codificación

Para la cuantificación de la auditoría, se diseñó un sistema de puntuación que permite transformar las respuestas en datos numéricos comparables. Este proceso se aplicó a los veinticuatro ítems evaluados, dividiendo la codificación en dos criterios técnicos según la naturaleza de la consulta.

En el primer grupo, que abarca desde la pregunta dos hasta la cinco, se utilizó una escala de cero, uno, tres y cinco puntos. Esta ponderación se asignó de acuerdo con la antigüedad y la experiencia técnica en la faena Rajo Inca, permitiendo que el diagnóstico valore de forma proporcional el tiempo de permanencia del personal en Detroit Sociedad Anónima.

Para el segundo grupo, comprendido entre la pregunta seis y la veinticinco, se aplicó una escala de cumplimiento operativo basada en tres niveles de desempeño. Una respuesta afirmativa, que indica una adherencia total al estándar, se califica con cinco puntos. La opción intermedia denominada a veces recibe tres puntos y la respuesta negativa se traduce en cero puntos.

Esta estructura de codificación garantiza que el instrumento sea unidireccional y fiable, lo cual se ratifica con el coeficiente alfa de Cronbach de 0,90.

Dimensión	Ítems
Formación y experiencia	P2–P5
Competencia técnica	P6–P11
Comunicación y registro	P12–P15
Liderazgo y control de calidad	P16–P18
Gestión del conocimiento y capacitación	P19–P21
Condiciones organizacionales	P22–P25

Tabla 1-1, Preguntas encuesta

Fuente: Elaboración propia en base a tabla creada el 03/10/2025

1.3.3 Alcance y población

Ámbito: mantenimiento de motores MTU Serie 4000 en Rajo Inca (Codelco División Salvador).

Población objetivo: técnicos y supervisores con intervención o supervisión en diagnóstico, montaje/desmontaje, pruebas, entre otras actividades en Detroit Rajo Inca.

1.3.4 Procedimiento de aplicación

Encuesta anónima en Microsoft Form. Se solicitó una respuesta por persona con la petición de total sinceridad para una mejor identificación de las brechas y problemáticas en confiabilidad humana.

1.3.5 Plan de análisis de datos

El procesamiento de la información se ejecuta mediante estadística descriptiva para transformar las respuestas cualitativas en indicadores métricos. El procedimiento incluye:

- **Extracción:** Exportar los resultados de Microsoft Forms a una matriz de datos en Microsoft Excel para su limpieza y tabulación.
- **Codificación:** Convertir los ítems P2 a P25 en valores numéricos en escala de 0 a 5, según los criterios de experiencia y cumplimiento operacional definidos en la sección de escalas.

- **Segmentación:** Utilizar el ítem P1 (rol) para diferenciar los perfiles de respuesta entre técnicos y supervisores, permitiendo un análisis comparativo de percepciones.
- **Cálculo del ICH:** Obtener el Índice de Confiabilidad Humana mediante el promedio aritmético simple de los puntajes alcanzados en las seis dimensiones evaluadas.

Definición y Significado del ICH

El Índice de Confiabilidad Humana (ICH) es un indicador sintético que cuantifica la robustez de las prácticas y condiciones que influyen en la ejecución del mantenimiento en una escala de 0 a 5. Su propósito consiste en medir la madurez operativa de Detroit S.A. frente al error humano; un valor alto indica procesos estandarizados independientes de la individualidad, mientras que un valor bajo señala una dependencia crítica de la pericia empírica o del azar.

Criterios de Interpretación de Resultados

La evaluación de los niveles de madurez se realiza bajo los siguientes rangos de puntuación:

- **Nivel Alto ($\geq 4,0$):** Indica una operación robusta con alta adherencia a estándares y variabilidad controlada.
- **Nivel Medio (2,5 a 3,9):** Representa un desempeño aceptable con brechas de estandarización o formación que exigen medidas de mitigación.
- **Nivel Bajo ($\leq 2,4$):** Define un riesgo operacional elevado por carencia de controles, capacitación deficiente o falta de infraestructura de conocimiento.

ALTO	MEDIO	BAJO
$\geq 4,0$	2,5 – 3,9	$\leq 2,4$

Tabla 1-2, categorización de puntaje

Fuente: Elaboración propia en base a tabla creada el 03/10/2025

1.3.6 Resultados de la auditoría

Muestra: n=12 respuestas válidas.

Rol:

1. Técnicos=10
2. Supervisores=2.

Promedios por dimensión (0–5) e ICH

Formación y experiencia	1,33	Bajo
Competencia técnica	4,33	Alto
Comunicación y registro	3,15	Medio
Liderazgo y control de calidad	3,25	Medio
Gestión del conocimiento y capacitación	3,03	Medio
Condiciones organizacionales	2,83	Medio
ICH (promedio de las 6 dimensiones analizadas)	2,99	Medio

Tabla 1-3, Puntajes ICH global

Fuente: Elaboración propia en base a tabla creada el 03/10/2025



Gráfico 1-1 Grafico Radial Global

Fuente: Elaboración Propia en base a grafico creado el 08/10/2025

Comparación por rol

	TECNICOS	SUPERVISORES
Formación y experiencia	1	3,00
Competencia técnica	4,37	4,17
Comunicación y registro	2,88	4,50
Liderazgo y C. de calidad	3,27	3,17
Gestión del conocimiento	2,87	3,83
Condiciones organizacionales	2,60	4,00
ICH	2,83	3,78

Tabla 1-4, Puntajes ICH por rol

Fuente: Elaboración propia en base a tabla creada el 03/10/2025

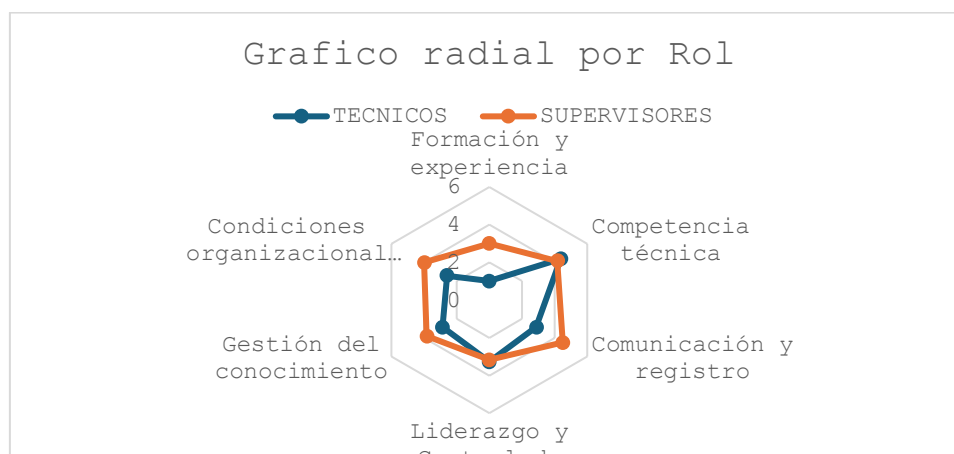


Gráfico 1-2 Grafico Radial por Rol

Fuente: Elaboración Propia en base a grafico creado el 08/10/2025

1.3.7 Alfa de Cronbach

La validación técnica de la auditoría se realizó mediante el cálculo del coeficiente alfa de Cronbach, el cual funciona como una herramienta estadística para medir la fiabilidad del instrumento de recolección de datos. El objetivo de integrar este análisis es otorgar un respaldo científico a los hallazgos detectados, asegurando que la medición de la confiabilidad humana en Detroit Sociedad Anónima sea estable y esté libre de errores derivados de la interpretación de las preguntas por parte del personal técnico de la faena Rajo Inca.

El procedimiento de cálculo se ejecutó sobre la matriz de respuestas obtenida de los doce trabajadores participantes, considerando la totalidad de los veinticuatro ítems puntuados del cuestionario. Para obtener el resultado, se determinó la relación entre la suma de las varianzas individuales de cada pregunta y la varianza total de los puntajes alcanzados por cada sujeto. Matemáticamente, el desarrollo se presenta de la siguiente forma:

$$\alpha = \frac{k}{k - 1} \left[1 - \frac{\sum s_i^2}{s_t^2} \right]$$

$$\alpha = \frac{24}{24 - 1} \left[1 - \frac{57,87}{434,74} \right] = 0,90$$

ecuación 1-1, Cálculo alfa de cronbach

Fuente: Elaboración propia en base a imagen tomada el 03/10/2025

Como resultado final de esta operación, se obtuvo un valor de 0,90. De acuerdo con los estándares internacionales de validación, una cifra superior a 0,8 se clasifica como una consistencia interna excelente. Por lo tanto, se confirma que la escala de puntuación utilizada es altamente fiable, lo que permite validar que las brechas de formación y competencia identificadas en las tablas anteriores son un reflejo exacto de la realidad operativa y constituyen una base sólida para el diseño de la propuesta de mejora técnica y económica de este trabajo.

Resumen cualitativo (P26–P28)

- Se repiten pedidos de más capacitación (Diagnóstico electrónico DDEC, Cambio de componentes, curso de electricidad).
- Instalación de componentes críticos concentran los errores.
- Aparecen sellos/O-rings, sensores y bombas de combustible como puntos sensibles.
- Se sugieren implementación de líderes con más experiencia, capacitaciones e-learning adicionales a las presenciales en casa matriz

1.3.8 Discusión

El análisis detallado de los promedios por dimensión revela una brecha operativa crítica que define el estado actual de Detroit Sociedad Anónima en la faena Rajo Inca. La fortaleza principal del equipo reside en la competencia técnica, la cual alcanza un nivel sobresaliente de 4,33. Este valor indica que el personal posee habilidades prácticas y de diagnóstico muy robustas para intervenir los motores MTU Serie 4000. Sin embargo,

este desempeño se encuentra desprotegido por el puntaje de 1,33 en la dimensión de formación y experiencia, la cifra más deficiente de todo el estudio. Esta disparidad confirma que el éxito de las tareas depende casi exclusivamente de la pericia empírica de los trabajadores y no de un proceso de capacitación formal o una trayectoria institucionalizada, lo que genera una vulnerabilidad extrema ante la rotación de personal o el enfrentamiento a fallas complejas sin precedentes.

Esta realidad impacta directamente en los requisitos de la normativa internacional ISO 55001 versión 2024, específicamente en su cláusula 7,2 sobre competencia y la 7,4 sobre comunicación. Aunque las dimensiones de liderazgo con 3,25 y comunicación y registro con 3,15 presentan niveles aceptables, todavía existe una oportunidad de mejora significativa para alcanzar la excelencia operativa. La falta de bitácoras estandarizadas y la gestión del conocimiento situada en 3,03 impiden que la empresa cuente con la información documentada necesaria para asegurar la calidad de los procesos de manera sistemática. El propósito de este análisis es demostrar que, para alcanzar una confiabilidad real, es imperativo cerrar la brecha de formación para que la alta capacidad técnica se transforme en un desempeño predecible, documentado y seguro.

1.3.9 Limitaciones

La principal restricción metodológica de este diagnóstico se encuentra en el tamaño de la muestra, la cual se compone de 12 integrantes de una dotación total de 20 personas en el contrato, conformada por 16 técnicos y 4 supervisores. Si bien la participación de 10 técnicos y 2 supervisores entrega una visión clara, los resultados se presentan como una base exploratoria por no contar con la totalidad del personal operativo. No obstante, esta limitación se ve mitigada estadísticamente mediante el análisis de consistencia interna, donde el coeficiente alfa de Cronbach arrojó un valor de 0,90. Este resultado confirma que el instrumento posee una fiabilidad excelente y que las respuestas obtenidas son altamente representativas de las brechas técnicas reales que existen en la faena.

Para neutralizar posibles sesgos derivados del auto reporte en las encuestas, se garantizó el anonimato de los participantes y se realizó un cruce de información con los registros históricos de fallas latentes y retrabajos en las unidades de fuerza. El objetivo de este procedimiento fue validar que las percepciones de los técnicos sobre sus propias

habilidades estuvieran alineadas con la evidencia técnica recolectada en terreno respecto a la instalación de componentes críticos. De este modo, el diagnóstico adquiere la solidez necesaria para fundamentar una propuesta de mejora que no dependa únicamente de opiniones aisladas, sino de datos consistentes que permitan una toma de decisiones informada para elevar la disponibilidad mecánica de los activos.

1.4 Conclusión del diagnóstico

El proceso de auditoría de confiabilidad humana en la faena Rajo Inca concluye con la determinación de un índice global de 2,99. Este valor define un perfil de madurez inicial donde la mayor fortaleza es la capacidad técnica instalada de 4,33, pero la debilidad estructural reside en la formación y trayectoria específica con un escaso 1,33. El hallazgo central de esta investigación es que la organización opera bajo un riesgo de variabilidad elevado debido a que el conocimiento práctico no está respaldado por estándares escritos ni programas de transferencia formal de competencias. El para qué de concluir este diagnóstico es establecer la línea base necesaria para justificar una reingeniería en los procesos de intervención y liberación de los motores.

Consecuentemente, las prioridades establecidas para el desarrollo del Capítulo 2 se enfocan en la creación de una infraestructura de gestión del conocimiento. Esto se ejecutará mediante la implementación de guías visuales paso a paso y procedimientos operativos digitales en la plataforma DataScope, junto con un programa de acompañamiento técnico o mentoring senior. Estas herramientas tienen la finalidad de estandarizar las tareas críticas y asegurar que la competencia técnica detectada se traduzca en un desempeño trazable y seguro. El objetivo final es blindar la operación mediante procesos que garanticen la seguridad del personal y la continuidad operacional de los activos estratégicos de Detroit Sociedad Anónima, eliminando la dependencia del azar o del criterio individual no normado.

CAPÍTULO 2. ESTANDARIZACIÓN DE PROCESOS CRÍTICOS DE MANTENCIÓN

2.1 Resumen de capítulo

Este capítulo define los estándares mínimos de trabajo para el mantenimiento de motores MTU Serie 4000 bajo la norma ISO 55001:2024. Se integran herramientas de control operacional como el diagrama SIPOC, barreras Poka-yoke y la plataforma DataScope para garantizar la trazabilidad digital y reducir la variabilidad humana. El diseño establece una infraestructura técnica orientada al aseguramiento de la calidad y la eliminación sistemática de errores en intervenciones críticas.

2.2 Propósito y marco normativo

Este capítulo define y deja operativos los estándares mínimos de trabajo en faena para diagnóstico, intervención y verificación de motores MTU Serie 4000, de modo que los resultados no dependan de la variabilidad individual. Se formalizan procedimientos, formatos en DataScope, uso de herramientas calibradas y evidencias obligatorias.

Esto responde a la exigencia de “implementar el control de los procesos, de acuerdo con criterios” (ISO 55001:2024, 8.1) y de “controlar la información documentada” (ISO 55001:2024, 7.5.1).

Enfoque: control operacional (8.1), información documentada (7.5), competencia y comunicación (7.2–7.4), gestión del cambio (8.2), control de externos (8.3).

2.3 Alcance y cadena de valor (SIPOC)

Establecer los límites y componentes del proceso de mantenimiento de motores MTU Serie 4000 mediante un diagrama SIPOC para la estandarización de los requisitos operativos y responsabilidades transversales.

Finalidad y Justificación del SIPOC

El desarrollo de esta herramienta tiene como finalidad la visualización macroscópica de la cadena de valor, permitiendo identificar las interdependencias críticas entre los

proveedores de insumos y los clientes del servicio. Su inclusión es fundamental por tres razones técnicas:

Delimitación del Proceso: Define el inicio (detección de la necesidad) y el término (liberación del equipo) de la intervención, asegurando que ninguna etapa crítica quede fuera del control documental.

Aseguramiento de Insumos (Inputs): Garantiza que la confiabilidad técnica no dependa solo de la pericia del personal, sino de la disponibilidad de herramientas calibradas, repuestos verificados y criterios OEM provistos por la Casa Matriz y fabricantes.

Control Operacional (ISO 55001): Responde al requisito de la cláusula 8.1 sobre la implementación de controles de proceso de acuerdo con criterios técnicos predefinidos para la entrega de activos validados.

Diagrama SIPOC Resumido

Suppliers (Proveedores): Casa Matriz (ingeniería/repuestos), OEM (MTU/Allison) y servicios de metrología externa.

Inputs (Entradas): Órdenes de trabajo (OT), historial técnico, herramientas calibradas y formatos controlados en DataScope.

Process (Proceso): Flujo secuencial de Diagnóstico → Preparación → Intervención → Pruebas → Cierre → Entrega.

Outputs (Salidas): Equipos validados operativamente, documentación técnica trazable y lecciones aprendidas registradas.

Customers (Clientes): Operaciones mineras (CAEX/CF) y el área de Aseguramiento de Calidad de Detroit S.A..

2.4 Requisitos habilitantes

- Información técnica al alcance: manuales, listados de torques/ángulos, pauta de regulación 16V4000, diagramas DDEC/DDDL y guías visuales.
- Pañol controlado: torquímetros/medidores identificados y con vigencia de calibración.
- Puntos de control (PC) y doble verificación en tareas críticas (inyectores, culata, bombas, líneas, filtros).

- Trazabilidad en DataScope: fotos, capturas DDDL, lecturas, firmas y checklist de cierre.

2.5 Estándares operacionales

2.5.1 Procedimiento de diagnóstico

Objetivo: confirmar condición, acotar causa y definir plan.

Pasos mínimos:

1. Seguridad/LOTO.
2. Lecturas DDEC/DDDL y captura de parámetros (turbo, aceite, temp., códigos).
3. Inspección visual/funcional (fugas, conectores, rutado).
4. Pruebas dirigidas (presión combustible, continuidad/aislamiento, estanqueidad).
5. Diagnóstico causal mas plan de intervención.
Evidencias: F-DIA-01 (lecturas, parámetros, fotos), plan aprobado.
Puntos de control: PC-D1 lecturas adjuntas; PC-D2 prueba dirigida documentada; PC-D3 aprobación supervisor.

“La organización debe implementar el control de los procesos, de acuerdo con los criterios” (ISO 55001:2024, cl. 8.1, p. 13).

2.5.2 Procedimiento de intervención (desmontaje/montaje)

Objetivo: ejecutar con calidad repetible, reduciendo errores de montaje.

Pasos mínimos:

1. Preparación (repuestos verificados, banco limpio, herramientas calibradas).
2. Desmontaje controlado (etiquetado/orden).
3. Montaje por secuencia y pares/torques; reemplazo de sellos/O-rings.
4. Rutado y fijación de cañerías/conectores.

5. Pruebas intermedias (estanqueidad, presión, continuidad).
6. Evidencias: F-MON-02 (torques/firmas), fotos de puntos críticos, F-PRB-03 (pruebas intermedias).
Puntos de control: PC-M1 par verificado; PC-M2 estanqueidad OK; PC-M3 doble firma (técnico+supervisor).

“La información documentada [...] deberá ser controlada” (ISO 55001:2024, cl. 7.5.3, p. 12).

2.5.3 Procedimiento de cierre y liberación

Objetivo: validar funcionamiento y documentación antes de operar.

Pasos mínimos:

1. Prueba funcional (presiones/temperaturas/rpm; barrido de códigos).
2. Reinspección (fugas, vibraciones, amarres).
3. Checklist de cierre completo y firmado.
4. Registro en sistema + lección aprendida (si aplica).
5. Liberación con firma responsable.
6. Evidencias: F-CIE-04, F-PRB-03 (prueba final), F-LEC-05 (si aplica).
Puntos de control: PC-C1 prueba final conforme; PC-C2 docs completas; PC-C3 liberación autorizada.

“La organización deberá determinar [...] cuándo se realizará el seguimiento y la medición” (ISO 55001:2024, cl. 9.1, p. 15).

2.6 Trazabilidad documental (ISO 7.5)

La documentación operativa se gestionará bajo un esquema de control de versiones, cambios, almacenamiento y aprobación para asegurar su vigencia y trazabilidad. En términos de la propia norma, la información “deberá ser controlada” (ISO 55001:2024, 7.5.1) y la organización “debe abordar” explícitamente control de cambios,

almacenamiento/conservación, así como revisión y aprobación (7.5.3); por eso, cada formato llevará código, versión, fecha, responsable y registro de modificaciones. Los formatos controlados son: F-DIA-01 (diagnóstico), F-MON-02 (torques), F-PRB-03 (pruebas), F-CIE-04 (cierre/liberación) y F-LEC-05 (lección aprendida); todos quedarán vinculados a la OT en DataScope con evidencias (fotos, capturas DDDL) y bloqueos cuando falten campos obligatorios. Así se asegura que la información usada en faena sea única, vigente y verificable, y que cualquier corrección o actualización deje rastro documental antes de su aplicación.

2.7 Personas y comunicación (ISO 7.2 y 7.4)

La gestión de personas se centrará en competencia demostrable y canales de comunicación efectivos. En línea con la exigencia de mantener “información documentada apropiada como prueba de competencia” (ISO 55001:2024, 7.2), cada técnico mantendrá evidencia de cursos PMA/MTU, evaluaciones prácticas en terreno y recertificaciones ligadas a tareas críticas (inyectores, sellos, bombas, pruebas). A su vez, y dado que la norma pide que la organización “consulte” al definir sus necesidades de comunicación y evalúe su eficacia (7.4), se formalizan briefings previos (criterios, riesgos, cambios vigentes) y **debriefings** posteriores (hallazgos, lecciones F-LEC-05), además de difusión oportuna de cambios aprobados por 8.2 (gestión del cambio). Con esto, la competencia queda respaldada por evidencias y la comunicación se vuelve un ciclo medible (asistencia, comprensión, cumplimiento), reduciendo errores de interpretación en diagnóstico, armado y verificación.

2.8 Gestión del cambio (ISO 8.2)

Todo ajuste de método, par/ángulo, secuencia o prueba se tramita mediante un flujo formal que incluye solicitud, evaluación de riesgos, aprobación, comunicación/capacitación, emisión de versión vigente y verificación en la primera aplicación. Este enfoque responde a ISO 55001:2024, que exige controlar los cambios planificados y revisar sus posibles consecuencias no deseadas (cláusula 8.2), de modo que cada modificación quede trazada, validada y probada antes de su uso generalizado.

2.9 Control de proveedores y servicios externos (ISO 8.3)

Se establecerán criterios técnicos en los contratos (pares/torques conforme OEM, trazabilidad de repuestos, certificados de calidad), calibraciones vigentes para instrumentos provistos por terceros, recepción técnica con checklist (conformidad dimensional/funcional) y evaluación periódica de desempeño. Esto responde al requisito de que “la organización se asegure de que los servicios proporcionados externamente estén controlados” (ISO 55001:2024, 8.3) y de mantener la información documentada bajo control (7.5.1).

2.10 Barreras y verificación (error-proofing)

Implementar barreras técnicas y operativas de tipo **Poka-yoke** (a prueba de errores) para la eliminación sistemática de fallas humanas en tareas de alta criticidad. Los ejemplos específicos aplicados en la faena Rajo Inca son:

- **Plantillas de secuencia:** Guías visuales y físicas que establecen el orden estricto de apriete para los pernos de culata e inyectores, mitigando riesgos de deformación o torque desigual.
- **Etiquetado y rutado:** Identificación cromática o numérica de cañerías y mangueras para garantizar su conexión precisa en los puertos correspondientes según diseño OEM.
- **Marcado de conectores:** Empleo de marcas visuales o muescas de posición única en arneses y sensores para impedir conexiones invertidas o errores en el sistema eléctrico.
- **Validaciones digitales (DataScope):** Configuración de campos obligatorios en formatos digitales que bloquean el cierre de la orden de trabajo ante la ausencia de evidencias críticas, como fotografías de asientos limpios o capturas de parámetros en DDDL.
- **Puntos de control (PC):** Barreras de doble verificación (técnico y supervisor) que exigen la validación formal de etapas críticas de montaje previo a la liberación técnica del activo.

2.11 RACI (roles)

La matriz RACI (responsable, Aprobador, Consultado, Informado) establece la estructura de gobernanza y las responsabilidades operativas en el mantenimiento de los motores MTU Serie 4000. Su implementación responde a la cláusula 5.3 de la norma ISO 55001:2024, la cual exige que las responsabilidades y autoridades para los roles relevantes se asignen y comuniquen dentro de la organización para asegurar el desempeño del sistema.

- **Responsable (R):** Corresponde al ejecutor directo de la actividad. En las etapas de Diagnóstico, Intervención, Pruebas y Documentación, esta función recae en el Técnico, quien debe aplicar los procedimientos estandarizados y recolectar las evidencias obligatorias en DataScope. En la Gestión del Cambio, el Especialista o líder asume la responsabilidad de procesar las solicitudes y evaluar los riesgos técnicos asociados.
- **Aprobador (A):** Representa la autoridad máxima que rinde cuentas por el resultado y posee la facultad de firma para la liberación técnica. El Supervisor asume este rol en todas las etapas del proceso para garantizar que el control operacional cumpla con los requisitos de seguridad y calidad del contrato. Es el único rol con autoridad para validar los puntos de control críticos (PC-M3, PC-C3).
- **Consultado (C):** Aporta información técnica o experta de manera bidireccional. El Especialista o líder actúa como consultor en las tareas de terreno para la resolución de fallas complejas o desviaciones en el diagnóstico. Durante la Gestión del Cambio, el Técnico es consultado para validar la factibilidad práctica de las modificaciones en los métodos de trabajo.
- **Informado (I):** Recibe comunicación sobre el estado o término del proceso para fines de coordinación. El área de Planificación mantiene este rol en todas las fases para asegurar la actualización de la disponibilidad del activo y la gestión de los recursos necesarios en el programa de mantenimiento.

Esta distribución de roles elimina la ambigüedad en la toma de decisiones, asegura que cada tarea crítica cuente con una validación independiente y garantiza la trazabilidad exigida por la normativa internacional de gestión de activos.

Etapa	Técnico	Supervisor	Especialista o líder	Planificación
Diagnóstico	R	A	C	I
Intervención	R	A	C	I
Pruebas	R	A	C	I
Cierre/liberación	R	A	C	I
Documentación	R	A	C	I
Gestión del cambio	C	A	R	I

R=responsable; A=Aprobador; C=Consultado; I=Informado.

Tabla 2-1, RACI

Fuente: Elaboración propia en base a tabla creada el 05/11/2025

2.12 Indicadores y metas

Los indicadores seleccionados para este proyecto no son solo métricas aisladas, sino que constituyen el tablero de control para asegurar la Confiabilidad Humana y la Gestión de Activos bajo la norma ISO 55001:2024.

A. Definición y Objetivo de los Indicadores

Los indicadores definidos para este trabajo de titulación constituyen el tablero de control necesario para monitorear el desempeño de la propuesta. Cada métrica tributa de manera directa a los **Objetivos Específicos (OE)** definidos en la sección 2.0, asegurando la trazabilidad entre el diseño y los resultados esperados:

- **% OT con evidencias:** Tributa al **OE2 (Estandarizar)**. Asegura que el control operacional y la trazabilidad digital se ejecuten bajo los requisitos de información documentada definidos en la norma ISO 55001:2024 (cláusula 7.5.1).

- **Retrabajos críticos:** Tributa al **OE2 (Estandarizar)**. Permite cuantificar la efectividad de los nuevos estándares para disminuir la variabilidad operativa y mitigar el error humano en tareas de alta criticidad.
- **FR promedio (Factor de Retrabajo):** Tributa al **OE2 y OE3 (Evaluar)**. Busca estabilizar la eficiencia del mantenimiento para que los tiempos de intervención reales no excedan lo planificado, impactando directamente en la viabilidad económica de la propuesta.
- **MTTR (vs. inicial):** Tributa al **OE3 (Evaluar)**. Funciona como la métrica principal para validar la factibilidad técnica del diseño, asegurando una mejora en la disponibilidad de los equipos CAEX y cargadores frontales.
- **Herramientas con calibración vigente:** Tributa al **OE2**. Constituye el requisito habilitante crítico para garantizar que los procesos de torque y medición cumplan estrictamente con los estándares de precisión del fabricante (OEM).

B. Construcción y Fórmulas de Cálculo

Los indicadores se construyen a partir de los datos capturados en la plataforma DataScope y el historial de eventos de faena.

Indicador	Método de Cálculo	Fuente de Datos	Rojo	Amarillo	Verde
% OT con evidencias	$\left(\frac{OT \text{ con evidencias completas}}{OT \text{ cerradas}} \right) \times 100$	DataScope	<90%	90–94%	≥95%
Retrabajos críticos	$\left(\frac{N^{\circ} \text{ de retrabajos}}{Total \text{ de intervenciones}} \right) \times 100$	Historial de fallas	≥3%	2,0–2,9%	≤2%
FR promedio	$\frac{Tiempo \text{ de detencion total}}{Tiempo \text{ de detencion planificado}}$	DataScope / Planificación	>3,0×	2,1–3,0×	≤2,0×
MTTR	$\left(\frac{MTTR \text{ actual} - MTTR \text{ Unicial}}{MTTR \text{ inicial}} \right) \times 100$	Registros de Detroit	0–10%	10–19%	20–30%
Calibración	$\left(\frac{Herramientas \text{ con certificación}}{Total \text{ de Herramientas}} \right) \times 100$	Inventario de Pañol	<95%	95–99%	100%

Tabla 2-2, Indicadores

Fuente: Elaboración propia en base a tabla creada el 20/03/2026

C. Determinación de Rangos y Metas (Semáforo RAG)

Los rangos se han fijado siguiendo criterios de madurez operativa y los resultados proyectados en la evaluación económica:

1. Zona Verde (Meta): Representa el estado deseado tras la implementación. Por ejemplo, se fijó un MTTR de -20% a -30% porque es el rango que asegura la viabilidad financiera y el ROI del 88% proyectado.
2. Zona Amarilla (Alerta): Define un desempeño aceptable, pero con desviaciones que requieren supervisión inmediata o ajustes en el mentoring.
3. Zona Roja (Crítico): Se basa en la línea base (diagnóstico inicial). Los valores actuales, como el FR de 52,0 veces lo inicial, en casos críticos o el ICH de 2,99, se sitúan en esta zona, lo que justifica la necesidad de la propuesta.

“La organización deberá determinar [...] cuándo se realizará el seguimiento y la medición” (ISO 55001:2024, cl. 9.1, p. 15).

2.13 Caso crítico: golilla de inyector mal instalada (CF1850)

La tarea prevista (cambio de inyector, $\approx 0,5$ h) terminó en una detención total de 26 h (2 h de diagnóstico y 24 h de recuperación). El FR fue $52,0\times$ ($26/0,5$).

La Tabla resume el detalle por subtarea. Los principales aportes al TDT fueron:

Subtarea de recuperación (CF1850)	Descripción	Duración (h)	% del Trabajo
Diagnostico	Revision de fuga de refrigerante	2	7,69%
Limpieza del motor	Desengrase/limpieza externa previa a intervención	4	15,38%
Drenaje aceite	Vaciar cárter, gestión de residuos	1	3,85%
Drenaje refrigerante	Vaciar circuito; gestión de residuos	2	7,69%
Cambio de culata	Retiro/instalación + pares/torques	6	23,08%
Limpieza de componentes	Asientos, superficies	2	7,69%
Cambio de inyector	Sustitución + torque + golilla nueva	0,5	1,92%
Cambio de cañerías	Alimentación/retorno, fijaciones	0,5	1,92%
Cambio válvula antirretorno	Sustitución	0,5	1,92%
Abastecimiento refrigerante	Llenado, purga	2	7,69%
Flushing sistema de aceite	Limpieza circuito lubricación	2	7,69%
Pruebas de potencia	Lectura parámetros (turbo/temps/códigos)	2	7,69%
Verificación de fugas	Reinspección final	1,5	5,77%
Total		26	100%

Tabla 2-3, Caso critico

Fuente: Elaboración propia en base a tabla creada el 05/11/2025

Tabla. Detalle de recuperación CF1850
(Nota: si el período mensual del CF1850 es 600 h (considerando horas reales de operación de 20 hrs diarias, este evento equivale a 4,33% de pérdida de disponibilidad mensual).

Controles específicos para incorporar en formatos:

F-DIA-01 — Diagnóstico	
Ítem	Contenido
¿Para qué es?	Dejar trazable el diagnóstico inicial: síntomas, lecturas, pruebas, causa probable y plan. Evita “parchar” sin confirmar causa.
¿Cuándo usarlo?	Al abrir una OT por falla/alarma/anomalía (antes de desmontar).
¿Quién lo llena/firma?	Llena: Técnico responsable. Revisa/firma: Supervisor (PC-D3).
Evidencias mínimas	Capturas DDEC/DDDL; parámetros (turbo/aceite/temp/rpm); pruebas (presión, continuidad/aislamiento, estanqueidad); fotos del área.
Errores típicos	No adjuntar capturas; saltarse pruebas dirigidas; causa vaga sin evidencia.
Métricas	TDT-Diagnóstico (h); % diagnóstico/TDT; frecuencia de modos de falla por sistema.
Ejemplo (CF1850)	DDEC sin códigos críticos; inspección detecta fuga/contaminación; estanqueidad apunta a golilla mal instalada → plan: desmontaje y verificación de asiento + torques.

Tabla 2-4, formato diagnostico

Fuente: Elaboración propia en base a tabla creada el 05/11/2025

F-MON-02 — Montaje / Torques	
Ítem	Contenido
¿Para qué es?	Estandarizar desmontaje/montaje con secuencia + pares/torques y exigir sellos nuevos.
¿Cuándo usarlo?	Todo montaje crítico (inyectores, culata, bombas, líneas de combustible/aceite, sensores sellados).
¿Quién lo llena/firma?	Llena: Técnico (herramienta/ID, secuencia y torques). Firma: Técnico (PC-M1/M2) + Supervisor (PC-M3).
Evidencias mínimas	Check “Golilla nueva = Sí”; pares/torques y secuencia; foto del asiento/injector; ID y fecha de calibración de herramienta.
Errores típicos	No registrar par/ángulo exacto; reusar golillas/O-rings; no fotografiar puntos críticos.
Métricas	% OT con torques/secuencia; retrabajos por mal montaje; hallazgos de herramienta sin calibración.
Ejemplo (CF1850)	“Golilla nueva: Sí”; secuencia y par del portainyector; foto de asiento limpio; herramienta #TQ-123, cal. 2025-06.

Tabla 2-5, montaje

Fuente: Elaboración propia en base a tabla creada el 05/11/2025

F-PRB-03 — Pruebas (intermedias y final)	
Ítem	Contenido
¿Para qué es?	Registrar criterios y resultados de pruebas: estanqueidad, presiones, funcional, eléctrica; definir Conforme/No conforme.
¿Cuándo usarlo?	Intermedia: tras armado crítico (antes de cerrar). Final: antes de liberar el equipo.
¿Quién lo llena/firma?	Llena: Técnico ejecutor. Firma: Supervisor.
Evidencias mínimas	Criterio de aceptación (OEM/procedimiento); lecturas (presión comb., temp. aceite, turbo boost); fugas (Sí/No + ubicación); capturas DDEC de códigos.
Errores típicos	“Conforme” sin criterio; no repetir prueba tras ajuste; no registrar ubicación de fuga.
Métricas	% pruebas Conforme a la primera; tiempos de re-prueba; incidencia de fugas post-montaje.
Ejemplo (CF1850)	Intermedia: estanqueidad en inyector. Final: turbo 28–30 psi, temp/aceite OK, sin códigos → Conforme.

Tabla 2-6, formato Pruebas

Fuente: Elaboración propia en base a tabla creada el 05/11/2025

F-CIE-04 — Cierre y Liberación	
Ítem	Contenido
¿Para qué es?	Checklist final que asegura que todo está correcto antes de entregar el equipo a operación.
¿Cuándo usarlo?	Siempre antes de liberar un CAEX/CF tras intervención.
¿Quién lo llena/firma?	Llena: Técnico con Supervisor. Firma: Supervisor y (opcional) Responsable Operaciones.
Evidencias mínimas	Documentación completa (DIA, MON, PRB); prueba final conforme y sin fugas; parámetros en rango; sin códigos; lección aprendida (si aplica).
Errores típicos	Liberar con “pendientes menores”; falta de formato o firma; no verificar amarres/soportes.
Métricas	% OT con cierre completo; NC en liberación; reingresos por falla post-liberación.
Ejemplo (CF1850)	Checklist completo, sin códigos, sin fugas; lección aprendida creada; Decisión final: Conforme.

Tabla 2-7, formato cierre

Fuente: Elaboración propia en base a tabla creada el 05/11/2025

F-LEC-05 — Lección Aprendida	
Ítem	Contenido
¿Para qué es?	Capturar modo de falla, causa raíz, impacto (TDT, FR, ΔA , costo) y acciones (contención y preventivas) + verificación de eficacia.
¿Cuándo usarlo?	Siempre que haya retrabajo, TDT relevante o un hallazgo crítico.
¿Quién lo llena/firma?	Llena: Técnico con Supervisor/Ingeniería. Aprueba: Supervisor/Ingeniería/QA.
Evidencias mínimas	Árbol o 5 Porqués; fotos/capturas; indicadores (TDT, FR=TDT/tiempo previsto, ΔA); acciones con responsable/plazo y verificación.
Errores típicos	Culpar a “error humano” sin barreras; no medir impacto (TDT/FR); no verificar eficacia.
Métricas	FR promedio por familia de falla; % acciones cumplidas vs plazo; recurrencia del modo.
Ejemplo (CF1850)	Modo: golilla de inyector mal instalada. Causa: secuencia/torque y evidencia insuficiente. Impacto.

Tabla 2-8, formato lección aprendida

Fuente: Elaboración propia en base a tabla creada el 05/11/2025

2.14 Programa de auditoría y revisión

Se ejecutarán auditorías internas cada 3–6 meses sobre una muestra de OT cerradas con foco en tareas críticas (inyectores, mantenciones programadas, bomba de transferencia). El alcance verifica torques y secuencias, existencia de pruebas intermedias, evidencia fotográfica y cumplimiento documental. La norma exige “realizar auditorías internas a intervalos planificados” y que, al definir el programa, se considere la importancia de los procesos y los resultados de auditorías previas (ISO 55001:2024, 9.2.1–9.2.2). La revisión por la dirección recibe los resultados y gatilla acciones de mejora.

2.15 Riesgos y mitigaciones

Riesgos típicos: par incorrecto, sello mal instalado, rutado deficiente, pruebas incompletas, documentación incompleta. Mitigación: PC-M1/M2/M3, checklist de puntos críticos, doble firma, evidencia fotográfica obligatoria, validación de parámetros y checklist de cierre. El desempeño se monitorea con KPIs definidos (ISO 55001:2024, 9.1) y se alimenta al ciclo de mejora (ISO 55001:2024, 10.1).

2.16 Cierre del capítulo

El desarrollo de este capítulo ha permitido transformar el diagnóstico inicial de variabilidad en un sistema de control robusto y auditable. A través de la estandarización de los procesos críticos, se han establecido las siguientes bases operativas:

Institucionalización del Conocimiento: Se mitiga la dependencia del criterio individual mediante la formalización de procedimientos de diagnóstico, intervención y liberación técnica.

Aseguramiento de la Calidad (Error-Proofing): La implementación de barreras tipo Poka-yoke, puntos de control (PC) con doble firma y el uso obligatorio de herramientas calibradas garantiza que tareas sensibles se ejecuten bajo estándares OEM.

Trazabilidad Digital: El uso de DataScope como repositorio central de evidencias (fotos, capturas DDDL y firmas) asegura el cumplimiento de la cláusula 7.5.1 de la norma ISO 55001:2024, eliminando la opacidad en el registro documental.

Reducción del Riesgo Operativo: Al establecer protocolos claros para casos críticos, como el analizado en el CF1850 (donde un error de montaje generó 26 horas de TDT), la organización queda blindada contra fallas latentes que comprometen la disponibilidad mecánica.

La validación técnica de la reducción proyectada del 30% en el MTTR se fundamenta en la eliminación sistemática de la variabilidad operativa mediante el control de procesos definido en la cláusula 8.1 de la norma ISO 55001:2024. Al implementar barreras Poka-yoke y puntos de control con doble firma, se previene la recurrencia de eventos atípicos de alto impacto, como el del equipo CF1850 (26 horas de TDT), cuya eliminación estabiliza el promedio estadístico de reparación al suprimir los "picos" de tiempo generados por fallas latentes y retrabajos. Adicionalmente, la estandarización de diagnósticos electrónicos y el uso de DataScope para la gestión de información documentada (cláusula 7.5.3) optimizan los tiempos de ejecución al reducir la opacidad y los tiempos muertos administrativos de consulta técnica. Finalmente, este diseño se alinea con la acción predictiva de la cláusula 10.3, permitiendo determinar puntos de intervención óptimos que reducen la complejidad técnica de las reparaciones, validando la meta del 30% como un objetivo conservador y verificable mediante el indicador MTTR propuesto.

En conclusión, este capítulo deja operativa la infraestructura administrativa y técnica necesaria para que la alta competencia técnica del personal se traduzca en un desempeño predecible y seguro.

CAPÍTULO 3. PROPUESTA DE MEJORA Y EVALUACIÓN TÉCNICO-ECONÓMICA

3.1 Resumen de capítulo

Esta propuesta eleva la confiabilidad humana en los motores MTU Serie 4000 (16V4000C21/C11) en Rajo Inca con tres ejes: estandarización operacional con formatos

en DataScope; formación mixta (e-learning + práctica guiada); y seguimiento–auditoría–mejora con KPI y lecciones aprendidas. Se espera reducir retrabajos y TDT, estabilizar $FR \leq 2,0\times$ y lograr $\geq 95\%$ de OTs con evidencia completa, alineado con ISO 9.1, 9.2 y 10.1.

3.2 Alcance

El capítulo abarca el diseño completo del sistema formativo y su integración operativa, sin ejecutar su implementación industrial ni intervenir sobre overhauls en Casa Matriz.

Población objetivo y roles: técnicos, líderes técnicos y supervisores de la faena Rajo Inca, con rutas formativas diferenciadas por rol y criticidad de tareas.

Malla y contenidos: cuatro cursos e-learning (Electricidad básica; Códigos de falla y troubleshooting DDEC/DDDL; Diagnóstico correcto; Electrónica DDEC, 8 h c/u) y práctica guiada en terreno, complementada con mentoring senior-junior.

Evaluación y evidencias: metas de aprobación $\geq 90\%$, requisitos de cobertura y horas anuales por técnico; registro de evidencias (aprobaciones, checklists de práctica, briefing/debrief) en DataScope, con control documental y versiones vigentes.

Vinculación con operación: la capacitación soporta los procesos críticos estandarizados del Cap. 2 (diagnóstico, montaje/torques, pruebas y cierre), asegurando que cada tarea sensible disponga de personal competente y evidencias trazables.

Indicadores y tablero: % de cobertura y aprobación; horas/año por técnico; auditorías formativas; impacto en FR/TDT y retrabajos; acciones de mejora derivadas.

Gobernanza: roles y responsabilidades para planificar, ejecutar, auditar y mejorar el programa; revisión gerencial periódica y ciclo de mejora continua.

3.3 Supuestos y premisas

En el diagnóstico actual se observa una alta variabilidad de experiencia en la dotación y una baja frecuencia de cursos presenciales, lo que tensiona el desempeño operativo. Aun así, los procesos definidos en el Capítulo 2 están vigentes y los formatos se ejecutan

mediante DataScope, lo que entrega trazabilidad. La competencia del personal se evidencia conforme a ISO 55001/7.2 y la comunicación se formaliza de acuerdo con ISO 55001/7.4. Operativamente, se aplica control operacional (ISO 55001/8.1), se gestiona el cambio cuando se modifican métodos o parámetros (ISO 55001/8.2) y se controlan los servicios externos y sus entregables (ISO 55001/8.3). Finalmente, el sistema considera seguimiento y auditorías internas periódicas (ISO 55001/9.1–9.2) y un ciclo de mejora continua (ISO 55001/10.1), lo que cierra el loop entre ejecución, verificación y corrección.

3.4 Metodología

La propuesta arranca de una línea base que combina tres entradas:

1. Resultados de la encuesta HRA/ICH aplicada al equipo,
2. KPIs de faena (retrabajos, TDT, MTTR y no conformidades) y
3. Casos reales recientes.

Con ese diagnóstico se diseña un sistema de control que une estándares por tarea crítica, puntos de control (PC), DataScope como repositorio de evidencias y torquímetros con calibración vigente. Este diseño respalda el “control operacional” y la definición de criterios de proceso (ISO 55001:2024, 8.1), así como el uso de información documentada controlada (ISO 55001:2024, 7.5.1–7.5.3). El tratamiento contempla formación breve (e-learning), mentoring senior–junior en faena, guías visuales y lecciones aprendidas; todo ello sirve para demostrar competencia con evidencia objetiva (ISO 55001:2024, 7.2) y estructurar la comunicación técnica antes/durante/después de la intervención (ISO 55001:2024, 7.4). Los beneficios esperados son reducción de retrabajos/TDT/NC y mayor trazabilidad. El análisis económico compara costos de implementación con TDT evitado y calcula payback y sensibilidad. Los riesgos se mapean por modo de falla y se amarran a barreras y auditorías internas trimestrales (ISO 55001:2024, 9.2), con seguimiento y medición en tableros (ISO 55001:2024, 9.1) y mejora continua (ISO 55001:2024, 10.1). La ejecución se ordena por fases con gobernanza simple (sponsor, responsable técnico y líderes de turno).

3.5 Diseño técnico de la propuesta

3.5.1 Estándares por tarea crítica

Inyectores: exigir golilla nueva, limpieza del asiento, aplicar secuencia y par/ángulos especificados por manual MTU, fotografiar el asiento antes del cierre, hacer estanqueidad intermedia y doble firma técnico–supervisor. (Referencia técnica: MTU 16V4000 procedimientos de inyección; ver también ISO 55001:2024, 8.1 para control del proceso).

Filtros de aceite: O-ring nuevo lubricado, método de apriete registrado (“¼ de giro” según OEM), foto de base y sello, prueba de fugas y Re inspección en prueba de potencia final, esto apoya la evidencia de control y registro (ISO 55001:2024, 7.5.1).

Bombas: validar alineación/acople, torque por etapas, ruteado y fijación de cañerías, prueba de presión/caudal y verificación en prueba de potencia final (ISO 55001:2024, 8.1).

Sensores/arneses: comprobar continuidad/aislamiento y masas, posición/ajuste; registrar lecturas DDDL antes/después y captura “sin códigos” al cierre (consistente con seguimiento/medición, ISO 55001:2024, 9.1).

Evidencias mínimas para todas: fotos de puntos críticos, par/ángulo aplicado, ID y vigencia de calibración de herramienta, capturas DDDL, pruebas intermedias y checklist de cierre (ISO 55001:2024, 7.5.3).

3.5.2 DataScope: flujo, evidencias y control documental

DataScope se usa como control de evidencias y trazabilidad por OT. Cada orden fuerza campos obligatorios (fotos, DDDL, par/ángulo, firmas); si falta algo crítico, el cierre se bloquea hasta completar. Los formatos mantienen control de versiones, con publicación de la versión vigente y registro de cambios (ISO 55001:2024, 7.5.1–7.5.3). La trazabilidad por QR/código alimenta tableros de cumplimiento, retrabajos y TDT (ISO 55001:2024, 9.1).

Módulo	Campo obligatorio	Regla de validación	Evidencia mínima
F-DIA-01 Diagnóstico	Lecturas DDDL + fotos	No avanza sin adjuntos	Códigos/estados + imagen del área
F-MON-02 Montaje	Par/ángulo + ID torquímetro	Requiere fecha de calibración vigente	Foto de asiento/pieza crítica
F-PRB-03 Pruebas	Criterio + resultado	Exige criterio escrito y lectura	Presión/temperatura/boost
F-CIE-04 Cierre	Checklist + firmas	Bloquea cierre sin firmas	Captura “sin códigos”
F-LEC-05 Lección	Modo, causa, acción, verificación	No cierra sin responsable/plazo	Evidencia post-acción

Tabla 3-1, formatos para datascope

Fuente: Elaboración propia en base a tabla creada el 15/12/2025

3.5.3 Programa de formación (e-learning + práctica guiada)

Para cerrar brechas se implementarán 4 cursos e-learning de 8 h cada uno: Electricidad básica, Códigos de falla y troubleshooting DDEC/DDDL, Diagnóstico correcto y Electrónica DDEC.

Objetivo operativo: medición segura, correcta interpretación de códigos/estados, ejecución disciplinada de pruebas y ajustes/lecturas básicas. Aprobación mínima por curso: $\geq 90\%$. Meta de cobertura: $\geq 90\%$ en 60 días, manteniendo ≥ 12 h/año por técnico. El onboarding PMA será ≤ 14 días (técnico con experiencia) y ≤ 30 días (perfil ingreso). La competencia queda evidenciada “*se dispondrá de información documentada apropiada como prueba de competencia*” (ISO 55001:2024, 7.2) y la comunicación técnica se ordena con briefing/debrief tal como “*la organización debe consultar... al determinar su necesidad de comunicaciones y al evaluar su eficacia*” (ISO 55001:2024, 7.4).

Curso	Modalidad	Duración	Objetivo operativo	Aprobación
Electricidad básica	E-learning	8 h	Medición segura y lecturas confiables	≥90%
Códigos DDEC/DDDL	E-learning	8 h	Interpretar códigos/estados	≥90%
Diagnóstico correcto	E-learning	8h	Ejecutar secuencia de pruebas	≥90%
Electrónica DDEC	E-learning	8 h	Parámetros/ajustes básicos	≥90%
Práctica guiada	Presencial	16 h (2 sesiones de 8h)	Transferencia “cómo se hace”	Lista de verificación

Tabla 3-2, Cursos

Fuente: Elaboración propia en base a tabla creada el 15/12/2025

3.5.4 Gestión del cambio y control de externos

Toda modificación de método, par, secuencia o prueba sigue un MOC: solicitud, evaluación de riesgos, aprobación, difusión/capacitación, publicación de versión vigente y verificación en la primera aplicación (ISO 55001:2024, 8.2). Para proveedores externos se fijan criterios técnicos, exigencia de calibraciones vigentes, recepción con checklist y evaluaciones periódicas de desempeño (ISO 55001:2024, 8.3).

3.6 Casos de negocio

3.6.1 Caso A – Filtro de aceite mal instalado

Fuga ≈ 230 L. Controles: foto asiento/filtro; O-ring nuevo; método de apriete; doble firma; estanqueidad intermedia. Beneficio: menor repetición/TDT y riesgo ambiental.

Concepto	Costo Estimativo (USD)	Nota
----------	------------------------	------

Aceite + reposición	\$1180	Volumen × valor vigente
Limpieza/Disposición	\$1400	Absorbentes y gestión de residuos
Mano de obra	\$150	\$/h x Tecnico
TDT equipo	\$4500	Horas FdS × costo/h
Materiales	\$400	filtros

Tabla 3-3, Costos

Fuente: Elaboración propia en base a tabla creada el 15/12/2025

3.6.2 Caso B – Golilla de inyector omitida/mal instalada (CF1850)

Tarea 0,5 h → TDT 26 h (FR=52×). Controles: golilla nueva; secuencia + par/ángulo; foto de asiento; estanqueidad intermedia; doble firma. Beneficio: $FR \leq 2,0\times$ y baja de recurrencia. Tabla de retrabajo en capítulo 2.

3.6.3 Caso C – Fallas eléctricas latentes

Diagnóstico rápido, pero liberación sin verificación de vibración/continuidad y reinstalación deficiente; reingreso en horas. Medidas: anexo eléctrico, fotos “antes/después”, brief eléctrico en cierre, DDDL sin códigos.

3.7 Evaluación económico–financiera

3.7.1 Valores Estimativos

Parámetro	Valor	Comentario
Costo hora fuera de servicio (FdS)	USD 1.200/h	Costo de oportunidad por equipo detenido
Costo material/limpieza por evento	USD 1.400	Absorbentes, retiro y disposición, reposición básica

Eventos base/año (aceite / eléctrico / “otras familias”)	6 / 8 / 9	N.º de incidentes típicos sin la propuesta
Reducción de probabilidad (aceite / eléctrico)	40% / 35%	Efecto de estándares + DataScope + formación
Reducción media de TDT	30%	Menor tiempo perdido por evento

Tabla 3-4, Estimaciones mejoras

Fuente: Elaboración propia en base a tabla creada el 15/12/2025

3.7.2 Beneficio anual estimado (desglose)

Concepto	Cálculo de referencia	Beneficio anual
Aceite (fuga/filtro)	$6 \text{ eventos} \times 40\% \times (6 \text{ h} \times 1.200 + 1.400)$	USD 20.080
Eléctrico (sensores/arneses)	$8 \text{ eventos} \times 35\% \times (3 \text{ h} \times 1.200 + 200)$	USD 10.640
Efecto TDT (otras familias)	Ahorro agregado por -30% TDT	USD 15.000
Total beneficios		USD 45.720

Tabla 3-5, cálculos beneficios

Fuente: Elaboración propia en base a tabla creada el 15/12/2025

3.7.3 Costos de despliegue

Ítem	Monto	Alcance
DataScope (parametrización y tableros)	USD 6.000	Flujos, validaciones y KPIs
Documentación (laminados/QR/torques/regulación)	USD 100	Material estándar en puesto de trabajo
Formación (4 e-learning + admin)	USD 10.000	Microcursos + gestión de matrículas

Coaching/Auditorías	USD 8.000	Práctica guiada y auditorías livianas
Total costos de despliegue	USD 24.100	

Tabla 3-6, Costos implementación estimados

Fuente: Elaboración propia en base a tabla creada el 15/12/2025

3.7.4 Resumen financiero

Métrica	Cálculo	Resultado
Beneficio anual	—	USD 45.320
Costos de despliegue	—	USD 24.100
Contribución neta año 1	$45.720 - 24.100$	USD 21.620
Payback (años)	$24.100 / 45.320$	0,53 años
Payback (meses)	$0,53 \times 12$	$\approx 6,3$ meses
ROI año 1	$(45.720 - 24.100) / 24.100$	$\approx 88\%$

Tabla 3-7, Resumen costos

Fuente: Elaboración propia en base a tabla creada el 15/12/2025

Sensibilidad rápida (solo beneficios)

- -20% beneficios $\rightarrow$ Beneficios $\approx 36.256 \rightarrow$ **Payback $\approx 8,0$ meses.**
- +20% beneficios $\rightarrow$ Beneficios $\approx 54.384 \rightarrow$ **Payback $\approx 5,3$ meses.**

Payback simple $\approx 0,53$ años ($\approx 6,3$ meses). En sensibilidad (± 20) se mantiene < 12 meses.

3.8 Plan de implantación

Fase	Plazo	Entregables	Responsable
0 – Preparación	2 semanas	Procedimientos/formatos DS; calibraciones; comunicación	Mantto/QA

1 – Piloto	4 semanas	1 CAEX + 1 CF; coaching; 1er KPI	Sup/Mantto
2 – Despliegue	8 semanas	Flota completa; tablero DS; auditoría 5×5	Sup/QA
3 – Mejora	Continuo	F-LEC-05; refrescos; auditoría trimestral	QA/Ing

Tabla 3-8, Plan implementacion

Fuente: Elaboración propia en base a tabla creada el 21/12/2025

3.9 Cambio y comunicaciones

Se aplicará un MOC por cualquier cambio de método/par/ángulo o criterio de prueba: solicitud → evaluación de riesgo (impacto técnico/seguridad/disponibilidad) → aprobación (Jefatura/QA) → difusión/capacitación → publicación de versión vigente → verificación en primera aplicación (testigo y registro). La comunicación formal se realiza con briefing (antes de intervención), boletín mensual de KPI, pizarra digital de estado y debrief (hallazgos y F-LEC). Esto cumple ISO 8.2 y 7.4.

3.10 Gobernanza (RACI)

Proceso	R	A	C	I
Estándares/PCs	Mantto	Jefatura	QA/Ing	Operaciones
DataScope	Sup	Mantto	QA/TI	Operaciones
Formación	RR.HH./Capac.	Mantto	Sup/QA	Operaciones
Auditoría	QA	Mantto	Sup/Ing	Operaciones
Lección aprendida	Sup/Téc	QA	Ing	Mantto

Tabla 3-9, RACI

Fuente: Elaboración propia en base a tabla creada el 21/12/2025

3.11 Auditoría interna y revisión

Muestreo: 10% de OTs de tareas críticas por trimestre (mínimo 10 OTs). Criterios de cierre: 0 NC mayores, ≤ 2 NC menores con plan de acción en 7 días. Se elabora informe trimestral, se presenta en revisión gerencial y se actualiza el plan de mejora (ISO 9.2 y 10.1).

3.12 Resultados esperados

- Evidencias $\geq 95\%$ (60 días).
- Retrabajos críticos $\leq 1-2\%$ (3-6 meses).
- FR $\leq 2,0\times$ sostenido.
- MTTR 20-30% vs base.
- NC críticas = 0/mes.
- Mejor disponibilidad por menor TDT.

3.13 Cierre

La propuesta de mejora presentada constituye una solución integral que equilibra la excelencia técnica con la rentabilidad financiera. Los resultados de este análisis técnico-económico permiten concluir lo siguiente:

- Sustentabilidad del Talento: El plan de formación mixta (e-learning y mentoring en terreno) garantiza que las brechas identificadas en el diagnóstico ICH (puntuación de 1,33 en formación) se cierren de manera sistemática y medible.
- Viabilidad Económica Sobresaliente: Con una inversión de USD 24.100, el proyecto proyecta beneficios anuales por USD 45.720, derivados de la mitigación de eventos críticos y la optimización del TDT. Esto se traduce en un ROI del 88% y un periodo de recuperación (payback) de solo 6,3 meses.
- Impacto en la Disponibilidad: La meta de reducir el MTTR entre un 20% y 30%, junto con la estabilización del Factor de Retrabajo (FR $\leq 2,0x$), posiciona a Detroit S.A. como un líder eficiente en el soporte técnico de los motores MTU Serie 4000 en Rajo Inca.

- Ciclo de Mejora Continua: La gobernanza propuesta y el sistema de auditorías internas aseguran que el proyecto no sea un esfuerzo aislado, sino un proceso dinámico alineado con la mejora continua (ISO 10.1) y la satisfacción del cliente.

Finalmente, esta propuesta no solo cumple con los requisitos académicos de la Ingeniería en Mantenimiento Industrial, sino que entrega a la gerencia de Detroit S.A. una hoja de ruta clara para elevar la confiabilidad técnica y asegurar la continuidad operativa en un entorno minero de alta exigencia.

CONCLUSION

La propuesta de mejora de confiabilidad humana en Detroit S.A. Rajo Inca constituye una respuesta estratégica y financieramente robusta frente a la variabilidad detectada en el mantenimiento de los motores MTU Serie 4000. A través del diagnóstico inicial, se evidenció que la organización dependía críticamente de la pericia empírica de su personal con una competencia técnica de 4,33, la cual se encontraba desprotegida por una formación institucionalizada deficiente de apenas 1,33. Esta brecha operativa, responsable de incidentes críticos como el error de montaje en el equipo CF1850 que generó un factor de retrabajo de 52,0x, se aborda mediante la implementación de un sistema de control operacional alineado con la norma ISO 55001:2024. La integración de la plataforma DataScope para asegurar la trazabilidad digital, junto con un plan de formación mixto que incorpora el mentoring senior-junior, permite transformar el conocimiento individual en un proceso estandarizado y auditable. Los resultados proyectados validan la viabilidad del proyecto, estimando una reducción del MTTR de entre un 20% y 30% y un Retorno de Inversión (ROI) del 88% en el primer año, lo que asegura un periodo de recuperación de capital de solo 6,4 meses. En definitiva, esta propuesta no solo optimiza la disponibilidad mecánica de los activos estratégicos en la faena Rajo Inca, sino que establece una cultura de mejora continua y rigor técnico que blindará la operación de Detroit S.A. frente al error humano y asegura la sostenibilidad del contrato a largo plazo.

BIBLIOGRAFIA

Normas Internacionales

- International Organization for Standardization. (2024). *ISO 55001:2024 Asset management — Management systems — Requirements*.
- International Organization for Standardization. (2018). *ISO 30401:2018 Knowledge management systems — Requirements*.

Literatura Científica y Académica

- Dhillon, B. S. (2014). *Human error in maintenance*. CRC Press.
- Franciosi, C., Di Pasquale, V., Iannone, R., & Miranda, S. (2019). A taxonomy of performance shaping factors for human reliability analysis in industrial maintenance. *Journal of Industrial Engineering and Management*, 12(1), 115-132.
- Hastings, N. A. (2021). *Physical Asset Management: With an Introduction to ISO 55000*. Springer Nature.
- Nonaka, I., & Takeuchi, H. (1995). *The Knowledge-Creating Company: How Japanese Companies Create the Dynamics of Innovation*. Oxford University Press.
- Reason, J. (1990). *Human Error*. Cambridge University Press.

Manuales del Fabricante (OEM)

- MTU Friedrichshafen GmbH. (s.f.). *Manual de taller y mantenimiento: Motores Diesel Serie 4000 (16V4000C21/C11)*.
- Detroit Diesel. (s.f.). *Detroit Diesel Diagnostic Link (DDDL) User Guide: Sistema de control y diagnóstico electrónico DDEC*.

Documentación Interna de la Empresa

- Detroit S.A. (2025). *Informes de eventos críticos, registros de Tiempo de Detención Total (TDT) y Factor de Retrabajo (FR) - Faena Rajo Inca*.
- Detroit Chile S.A. (2025). *Misión, Visión y Organigrama de Contrato Codelco División Salvador*.

WEBGRAFÍA

Herramientas de Gestión y Software

- DataScope. (2026). *Plataforma de control operacional y trazabilidad de evidencias digitales*. <https://www.mydatascope.com/es/>.
- Microsoft Corporation. (2026). *Microsoft Forms: Diseño de auditoría de confiabilidad humana e identificación de brechas*. <https://forms.office.com>.
- Microsoft Corporation. (2026). *Microsoft Excel: Procesamiento de datos estadísticos y cálculo de Coeficiente Alfa de Cronbach*. <https://www.microsoft.com/excel>.

Recursos Institucionales y Sectoriales

- Codelco. (2026). *Operación minera Rajo Inca - División Salvador*. <https://www.codelco.com>.
- Universidad Técnica Federico Santa María. (2025). *Guía para la elaboración de trabajos de título: Ingeniería en Mantenimiento Industrial*. <https://usm.cl>.

ANEXOS

ALFA DE CRONBACH

	PUNTAJES DE PREGUNTAS																								
Lista de encuestados	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	Total
1 (SUP)	5	0	0	5	3	3	3	3	3	5	5	5	3	3	0	3	3	5	0	3	3	3	3	3	72
2 (SUP)	3	1	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	3	5	5	5	5	5	5	5	112
3	0	0	0	1	5	3	5	5	3	5	0	3	5	3	0	3	5	0	5	5	3	3	3	0	65
4	0	5	0	1	5	5	5	5	5	5	3	5	3	3	0	5	5	5	0	3	3	5	5	3	84
5	1	5	5	1	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	112
6	0	3	3	1	5	3	5	5	3	5	0	3	3	5	0	3	3	5	0	3	3	3	3	0	64
7	0	0	0	1	3	3	5	5	3	5	3	3	3	5	0	3	3	5	0	5	3	3	3	0	64
8	0	0	1	1	5	3	5	5	5	5	3	5	5	5	5	5	5	5	5	3	3	0	5	0	84
9	0	0	0	0	3	3	3	3	3	5	0	0	3	3	5	3	3	0	5	3	3	3	3	3	57
10	1	1	1	1	3	5	5	5	5	5	0	0	3	3	5	3	3	5	0	3	3	3	3	3	68
11	1	1	1	1	5	5	5	5	5	5	3	3	3	3	5	3	3	5	0	3	3	0	3	0	71
12	0	1	1	1	3	3	3	5	3	3	0	0	3	0	0	0	3	0	0	3	3	0	0	0	35
Varianza (s ²)	2.24	3.24	3.24	2.41	0.97	0.97	0.75	0.56	1.00	0.31	4.19	3.91	0.89	2.08	6.25	1.91	0.97	5.56	6.00	0.88	0.56	3.19	1.91	3.81	
Promedio ICH	1.33				4.33				3.15				3.25				3.03				2.83				2.59
Promedio ICH SUP	3.00				4.17				4.50				3.17				3.83				4.00				3.78
Promedio ICH TEC	1.00				4.37				2.88				3.27				2.87				2.60				2.83

RESUMEN ESTADISTICO	
Numero de items (k)	24
Suma de varianzas (sum si^2)	57,87
Varianza total (st^2)	434,74
ALFA DE CRONBACH	0,90

$$\alpha = \frac{K}{K-1} \left[1 - \frac{\sum S_i^2}{S_T^2} \right]$$

FORMATOS

CAMPOS DE CONTROL	DETALLE / REGISTRO
N° Orden de Trabajo (OT)	
ID Equipo	
Síntomas Reportados	
Captura de Códigos DDEC	
Prueba Dirigida Realizada	
Diagnóstico Causal	
Plan de Acción	
Responsable (Firma)	Técnico: _____ Supervisor: _____



DETROIT S.A.®

Potencia de Motor	
	Hp

Descripción	Valor	Unidad
Crankcase Pressure		"H2O
Engine Coolant Temp		°C
Engine Intercooler Temp		°C
Engine Oil Pressure		psi
Engine Speed		rpm
Fuel Delivery Pressure		psi
Fuel temperature		°C
Coolant Pressure		psi
Injector Pressure		ksi
Injector Pump Usage		%
Air Inlet Pressure		psi
Air Inlet Temperature		°C
Ambient Air Temperature		°C
Barometric Pressure		psi
Batery potential		V
Boost Pressure		psi
Coolant Pressure – R1		psi
Output Torque		ft.lb
Percent Engine Load		%
Pulse Width		deg
Engine Oil Temperature – R1		°C
PWM2 Output FAN CONTROL		%gnd
Horómetro de motor		hrs

PUNTO DE CONTROL (PC)	Respuesta
Componente cambiado	
ID Componente Instalado	
Secuencia de Apriete según Manual MTU	
Par Aplicado (Nm / lb-ft)	
Motivo de cambio	
ID Torquímetro y Fecha Calibración Vigente	
Evidencia Fotográfica de Punto Crítico	
Responsable (Firma)	Técnico: _____
	Supervisor: _____



Potencia de Motor		
		Hp
Descripción	Valor	Unidad
Crankcase Pressure		"H2O
Engine Coolant Temp		°C
Engine Intercooler Temp		°C
Engine Oil Pressure		psi
Engine Speed		rpm
Fuel Delivery Pressure		psi
Fuel temperature		°C
Coolant Pressure		psi
Injector Pressure		ksi
Injector Pump Usage		%
Air Inlet Pressure		psi
Air Inlet Temperature		°C
Ambient Air Temperature		°C
Barometric Pressure		psi
Battery potential		V
Boost Pressure		psi
Coolant Pressure – R1		psi
Output Torque		ft.lb
Percent Engine Load		%
Pulse Width		deg
Engine Oil Temperature – R1		°C
PWM2 Output FAN CONTROL		%gnd
Horómetro de motor		hrs

PRUEBA REALIZADA	RESULTADO / LECTURA
Prueba de Estanqueidad	
Presiones de operación (PSI)	
Temperatura de Operación (°C)	
Evidencia fototrafica de sistemas evaluados	
Barrido Final DDEC: "Sin Códigos de Falla"	
Inspección Final de Ruteos y Fijaciones	
Responsable (Firma)	Técnico: _____
	Supervisor: _____



Potencia de Motor		
		Hp
Descripción	Valor	Unidad
Crankcase Pressure		"H2O
Engine Coolant Temp		°C
Engine Intercooler Temp		°C
Engine Oil Pressure		psi
Engine Speed		rpm
Fuel Delivery Pressure		psi
Fuel temperature		°C
Coolant Pressure		psi
Injector Pressure		ksi
Injector Pump Usage		%
Air Inlet Pressure		psi
Air Inlet Temperature		°C
Ambient Air Temperature		°C
Barometric Pressure		psi
Battery potential		V
Boost Pressure		psi
Coolant Pressure – R1		psi
Output Torque		ft.lb
Percent Engine Load		%
Pulse Width		deg
Engine Oil Temperature – R1		°C
PWM2 Output FAN CONTROL		%gnd
Horómetro de motor		hrs

REQUISITOS DE LIBERACIÓN	VERIFICACIÓN (SI/NO)
¿Formularios F-DIA, F-MON y F-PRB completos?	
¿Evidencia fotográfica ?	
¿Parámetros de funcionamiento dentro de rango de operacion?	
¿Aseo de area y retiro de herramientas realizado?	
¿Lección Aprendida (F-LEC-05) generada? (Si aplica)	
Firma Autorización Supervisor Detroit	



ENCABEZADO DE GESTIÓN	REGISTRO DE DATOS
Fecha del Evento	
Equipo (CAEX/CF)	
Componente Crítico / Falla	

ANÁLISIS DEL EVENTO	DETALLE TÉCNICO
Modo de Falla	
Causa Raíz	
Plan de acción	

MÉTRICAS DE IMPACTO	VALOR CALCULADO
Tiempo Detención (IDT)	
Tiempo Previsto Tarea	
Mejoras posibles	
Costo Estimado Evento	

