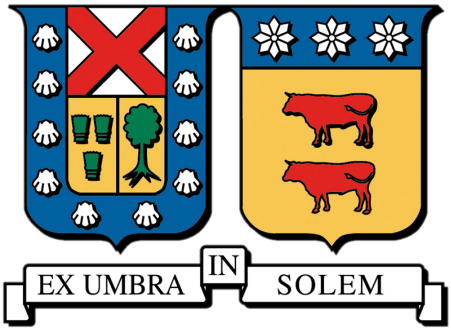


UNIVERSIDAD TÉCNICA FEDERICO SANTA MARÍA
DEPARTAMENTO DE INDUSTRIAS

Evaluación de la capacidad de la flota Volare V8L 4×4 y análisis de alternativas de renovación para el transporte de personal en Chuquicamata Subterránea: caso Transportes Géminis

MEMORIA PARA OPTAR AL TÍTULO DE INGENIERO CIVIL INDUSTRIAL

AUTOR

MATIAS IGNACIO MONTENEGRO GALLARDO

PROFESOR GUÍA

SR. RAÚL STEGMAIER B.

PROFESOR CO-REFERENTE

SR. SIMÓN GÓMEZ M.

VALPARAÍSO DE CHILE, 22 DE NOVIEMBRE 2025

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: Evaluación de la capacidad de la flota Volare V8L 4×4 y análisis de alternativas de renovación para el transporte de personal en Chuquicamata Subterránea: caso Transportes Géminis.

Nombre del candidato(a): Matias Ignacio Montenegro Gallardo

Carrera / Grado: Ingeniería Civil Industrial / Ingeniero Civil Industrial

Campus: Casa Central Valparaíso; **Departamento:** Industrias

2.- VALIDACIÓN DEL PROFESOR GUÍA/DIRECTOR DE TESIS

Yo, Raúl Stegmaier Bravo, 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

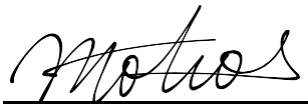
Fundamentación de la necesidad de confidencialidad (obligatorio si se solicita embargo):

4.- FIRMAS

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

Fecha: 5-12-25 **Firma:** 

Estudiante o Candidato(a):

Fecha: 04-12-25 **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.

1. Agradecimientos

Agradezco a Transportes Géminis por facilitar la información necesaria para el desarrollo de este trabajo de título y, en particular, al gerente Ignacio Mercado B., cuyo apoyo y disposición fueron fundamentales durante el proceso.

Asimismo, agradezco a la empresa Paus y a su Asesor de Soporte de Producto para Latinoamérica, David Gonzales J., por proporcionar información técnica relevante sobre el equipo MinCa-18 y por su colaboración en la resolución de consultas específicas.

Extiendo mi agradecimiento al profesor Raúl Stegmaier B., cuya guía, acompañamiento y observaciones contribuyeron de manera decisiva al desarrollo de este trabajo.

Finalmente, expreso mi gratitud a mi madre, Cristina Gallardo S., por su apoyo incondicional y por acompañarme en cada etapa de mi formación.

2. Resumen

Resumen

Este trabajo analiza la operación de los vehículos Volare V8L 4×4, regidos bajo el estándar ECF-21 de Codelco, utilizados en el transporte de personal al interior de la mina Chuquicamata Subterránea y operados por la empresa Transportes Géminis. A partir de registros históricos de órdenes de trabajo y series diarias de estado de los equipos, se calcularon indicadores de confiabilidad y mantenibilidad (MTBF, MTTR y disponibilidad) por activo y a nivel de flota, identificando los vehículos y subsistemas más críticos en términos de fallas y costos de repuestos.

Sobre esta base se ajustaron distribuciones Weibull de dos parámetros para los tiempos entre fallas de cada bus y se analizó el deterioro de la confiabilidad en función de la edad mediante TBF históricos, obteniendo un factor anual de reducción del tiempo medio entre fallas. Con estos parámetros se construyó un modelo de simulación Monte Carlo para un horizonte de cinco años, que incorpora el envejecimiento de los equipos y la restricción contractual de mantener al menos siete buses operativos. La simulación permite estimar, para distintos tamaños de flota, la cantidad esperada de días con incumplimiento, las multas acumuladas y las horas de holgura disponibles para realizar mantenimiento sin afectar el nivel de servicio.

Los resultados muestran que la configuración actual de nueve Volare proyecta un número elevado de días incumplidos y un monto esperado de multas del orden de 5,5 mil UF en cinco años. La incorporación de un bus Volare adicional reduce de forma significativa tanto las multas como los días con déficit, y genera en torno a 11 000 horas adicionales de holgura operativa, lo que abre espacio para implementar mejores prácticas de mantenimiento focalizadas en los componentes más

críticos identificados. Escenarios con más de un bus extra prácticamente eliminan las multas, pero resultan económicamente menos convenientes al considerar la inversión en flota.

Complementariamente, se evaluó una alternativa de renovación basada en buses MinCa-18, asumiendo para cada unidad una disponibilidad a la falla similar al mejor desempeño observado en los Volare (0,97) y utilizando un modelo de redundancia simple para dimensionar el tamaño de flota necesario para cumplir el mínimo de siete equipos operativos. Si bien esta opción resulta técnicamente adecuada para la operación subterránea, su costo de inversión es considerablemente mayor que el de reforzar la flota actual con un Volare adicional. En conjunto, el estudio entrega una base cuantitativa para comparar configuraciones de flota, estimar el riesgo contractual asociado y apoyar decisiones de refuerzo y eventual renovación del equipamiento de transporte de personal.

Abstract

This study analyzes the operation of Volare V8L 4×4 vehicles, regulated under Codelco's ECF-21 standard, used for personnel transportation inside the Chuquicamata Underground Mine and operated by Transportes Géminis. Using historical work order records and daily operational status data, reliability and maintainability indicators (MTBF, MTTR, and availability) were calculated for each vehicle and for the fleet as a whole, identifying the most critical components and subsystems in terms of failures and spare parts costs.

Based on these results, two parameter Weibull distributions were fitted to the time between failures (TBF) of each asset, and the deterioration of reliability as a function of age was estimated using historical TBF trends, obtaining an annual reduction factor for the expected TBF. These parameters were integrated into an hourly Monte Carlo simulation for a five year horizon, incorporating equipment ageing and the contractual requirement of maintaining at least seven operational buses. The simulation estimates, for different fleet sizes, the expected number of non compliance days, accumulated penalties, and the amount of operational slack available to perform maintenance without compromising the service level.

Results show that the current configuration of nine Volare buses is projected to accumulate a high number of non compliance days and an expected penalty of approximately 5.5 thousand UF over five years. Adding one extra Volare significantly reduces both penalties and deficit days, while generating approximately 11,000 additional hours of operational slack, enabling improved maintenance practices focused on the most critical components identified. Scenarios with more than one additional bus virtually eliminate penalties but become economically less favorable when fleet investment is considered.

Additionally, an alternative renewal strategy based on MinCa-18 mining buses was evaluated, assuming for each unit a failure free availability similar to the best performing Volare (0.97) and applying a simple redundancy model to determine the fleet size required to meet the seven bus minimum. Although technically suitable for underground operation, the investment cost of this alternative is considerably higher than reinforcing the current fleet with one additional Volare. Overall, the study provides a quantitative foundation to compare fleet configurations, assess contractual risk, and support decisions on fleet reinforcement and potential long term renewal of personnel transport equipment.

3. Introducción

3.1. Contexto general

La minería subterránea es una de las actividades productivas de mayor complejidad operacional, donde el transporte interno de personal constituye un elemento crítico para la continuidad de las faenas. En Chile, la mina Chuquicamata Subterránea, ubicada en Calama, Región de Antofagasta, representa uno de los proyectos más relevantes de la industria, caracterizado por sus extensas galerías, condiciones de terreno exigentes y estrictos requerimientos normativos en materia de seguridad y confiabilidad operacional.

En este escenario, la empresa Transportes Géminis, fundada en 1965 en Calama, mantiene una larga trayectoria en servicios de transporte para la minería. Actualmente opera nueve unidades Volare V8L 4×4 para el traslado interno de personal dentro de Chuquicamata Subterránea, cumpliendo un rol esencial en la logística diaria y desplazamiento de los trabajadores.

3.2. Contexto técnico y operativo

El Volare V8L 4×4 se rige según el estándar ECF-21 de Codelco y cuenta con 18 asientos, motor Cummins ISF 3.8 Euro V, tracción total, caja manual FSO 4505 C y dimensiones de 6.535 mm de largo, 2.130 mm de ancho y 3.192 mm de altura externa. Estas características le permiten acceder a galerías y rampas donde otros modelos disponibles en el mercado chileno no pueden operar.

Sin embargo, su diseño original no está orientado a faenas subterráneas. Las condiciones del entorno, como pendientes pronunciadas, superficie irregular, polvo abrasivo, humedad y ma-

niobras frecuentes en espacios confinados, generan un desgaste acelerado, incrementan la tasa de fallas y aumentan la exigencia sobre sistemas como transmisión, rodado, embrague y componentes eléctricos.

Esto repercute directamente en los tiempos de reparación, en el comportamiento de confiabilidad de los equipos y, finalmente, en la disponibilidad operativa del servicio, un atributo particularmente sensible en un contexto contractual donde cada día con menos de siete equipos operativos implica multas.

3.3. Situación actual y justificación del estudio

El servicio de transporte interno de personal en Chuquicamata Subterránea se rige por un contrato que establece la obligación de mantener un mínimo de siete buses operativos diariamente. No obstante, la variabilidad real de la disponibilidad, producto de detenciones por fallas, tiempos de reparación y postergación del mantenimiento preventivo, ha generado numerosos días de incumplimiento. La situación se agravó desde el 25-06-2025, cuando el bus 990 sufrió una avería mayor que lo mantiene fuera de servicio, reduciendo de forma permanente la capacidad efectiva de la flota. Con solo nueve unidades disponibles, cualquier intervención preventiva implica un riesgo directo de incumplimiento, por lo que las actividades de mantenimiento tienden a concentrarse en la corrección de fallas una vez ocurridas.

El problema, por tanto, no se limita únicamente a los procesos de mantenimiento, sino principalmente a la capacidad de la flota para absorber la variabilidad operativa y sostener los requerimientos contractuales. Surge así la necesidad de caracterizar cuantitativamente el desempeño actual de los Volare, estimar la probabilidad futura de incumplimiento y evaluar alternativas que

permitan reducir el riesgo operacional y económico asociado.

En este contexto, el presente estudio analiza en detalle el comportamiento histórico de los buses mediante indicadores MTBF, MTTR y disponibilidad, evalúa la confiabilidad a través de ajustes Weibull, estima el deterioro del tiempo entre fallas en función de la edad y desarrolla una proyección Monte Carlo a cinco años que incorpora el envejecimiento de los equipos y los requisitos contractuales. Adicionalmente, se analizan escenarios de ampliación de capacidad mediante unidades Volare adicionales y una alternativa de renovación con buses MinCa-18 diseñados para ambiente subterráneo.

El objetivo final es identificar configuraciones de flota que aseguren la continuidad del servicio, minimicen la exposición a multas y proporcionen una base técnica sólida para decisiones estratégicas en la gestión del transporte de personal en minería subterránea.

Tabla de Contenidos

1. Agradecimientos **1**

2. Resumen **2**

3. Introducción **6**

3.1. Contexto general 6

3.2. Contexto técnico y operativo 6

3.3. Situación actual y justificación del estudio 7

4. Objetivos **15**

4.1. Objetivo general 15

4.2. Objetivos específicos 15

5. Marco Teórico **17**

5.1. Condiciones operativas de la mina Chuquicamata Subterránea 17

5.2. Concepto y objetivos de la gestión de mantenimiento 18

5.3. Datos e indicadores para el análisis de disponibilidad de equipos 19

5.4. Disponibilidad objetivo, costos de ineficiencia y redundancia 20

5.5. Factores de intervención y su relación con la disponibilidad de equipos 21

5.6. Conceptos RAM: Confiabilidad, Disponibilidad y Mantenibilidad 22

5.7. Comportamiento de fallas y curva de la tina (bathtub) 23

5.8. Fundamentos matemáticos de confiabilidad 25

5.8.1. Definiciones básicas 25

5.8.2. Medidas resumen: MTBF y MTTR 26
5.8.3. Distribuciones de vida comunes 27
5.8.4. Aplicación al análisis de capacidad de flota 28
5.9. Disponibilidad conjunta de la flota y cumplimiento del servicio 28
5.10. Descripción del Volare V8L 4x4 29
5.10.1. Capacidad y dimensiones 29
5.10.2. Especificaciones mecánicas 30
5.10.3. Tabla de velocidades por marcha 31
5.11. Descripción del MinCa 18A PK 31
5.11.1. Capacidad y dimensiones 32
5.11.2. Condiciones operativas 32
5.11.3. Motorización 33
5.11.4. Tracción y desempeño 33
5.11.5. Sistema de frenos 34
5.11.6. Cabina y transporte de pasajeros 34
5.11.7. Sistemas eléctricos e hidráulicos 35

6. Metodología **36**

6.1. Diseño general del estudio 36
6.2. Construcción y depuración de la base de datos 37
6.2.1. Fuentes de información 38
6.2.2. Horizonte de análisis y selección de flota 39
6.2.3. Depuración de registros 39

6.2.4. Estructuras de datos para etapas posteriores 40

6.3. Modelación del comportamiento de fallas y confiabilidad 41

6.3.1. Identificación de eventos de falla 41

6.3.2. Construcción de los tiempos entre fallas (TBF) 42

6.3.3. Ajuste Weibull de dos parámetros 42

6.3.4. Cálculo de la confiabilidad $R(t)$ 43

6.3.5. Curvas de tasa de falla (hazard) 44

6.3.6. Propósito de esta etapa 44

6.4. Determinación de MTBF, MTTR y disponibilidad operativa de la flota 44

6.4.1. Período de servicio por activo 45

6.4.2. Transformación de OT correctivas en horas de falla 45

6.4.3. Falla mayor del activo 990 46

6.4.4. Cálculo de horas potenciales, horas de falla y horas operativas 46

6.4.5. Cálculo de MTBF y MTTR por activo 46

6.4.6. Disponibilidad operativa del equipo 47

6.4.7. Indicadores agregados de la flota 47

6.5. Reconstrucción de la disponibilidad diaria y evaluación del cumplimiento del mínimo contractual 48

6.5.1. Intervalos de falla efectivos por activo 48

6.5.2. Determinación del estado diario de cada activo 49

6.5.3. Serie diaria de equipos operativos 49

6.5.4. Aplicación del requisito contractual desde el 11-01-2024 50

6.5.5. Déficit diario de equipos 50

6.5.6. Indicadores mensuales de desempeño 51
6.6. Análisis de componentes y repuestos críticos 51
6.6.1. Fuentes de información y alcance 51
6.6.2. Selección de fallas relevantes 52
6.6.3. Clasificación funcional de los repuestos 52
6.6.4. Construcción de indicadores por repuesto, categoría y subsistema 53
6.6.5. Uso de los resultados en la evaluación del modelo Volare V8L 54
6.7. Proyección del desempeño futuro de la flota (5 años) 54
6.7.1. Estimación del deterioro de confiabilidad mediante TBF históricos 54
6.7.2. Modelación Weibull dependiente de edad 56
6.7.3. Simulación Monte Carlo horaria a cinco años 57
6.7.4. Estimación de holgura operativa 59
6.8. Evaluación económica equipos Volare 60
6.9. Evaluación flota MinCa-18 61

7. Resultados **64**

7.1. Indicadores operativos por equipo y flota 64
7.1.1. Resultados por equipo 64
7.1.2. Resultados agregados para la flota 66
7.2. Resultados del ajuste Weibull y confiabilidad 66
7.2.1. Comportamiento general de los tiempos entre fallas 68
7.2.2. Parámetro de escala η: tiempo característico entre fallas 68
7.2.3. Parámetro de forma β: tipo de comportamiento de fallas 69

7.2.4. Confiabilidad diaria y semanal 70
7.2.5. Interpretación conjunta de los parámetros 70
7.3. Disponibilidad diaria y cumplimiento del mínimo contractual 71
7.3.1. Resumen mensual de incumplimientos y déficit máximo diario 71
7.3.2. Días incumplidos por mes 72
7.3.3. Déficit máximo diario por mes 73
7.3.4. Identificación de meses críticos 74
7.3.5. Implicancias operativas 75
7.4. Resultados del análisis de componentes y repuestos críticos 75
7.4.1. Distribución de fallas y costos por categoría 75
7.4.2. Distribución de fallas y costos por subsistema 78
7.4.3. Interpretación conjunta 81
7.5. Resultados de la proyección del desempeño futuro de la flota (5 años) 82
7.5.1. Resultados de la estimación del deterioro de confiabilidad 82
7.5.2. Resultados de la proyección Monte Carlo a cinco años 84
7.5.3. Resultados de holgura operativa 87
7.6. Resultados de la evaluación económica equipos Volare 89
7.7. Resultados de la evaluación flota MinCa-18 90

8. Conclusiones **92**

9. Limitaciones del estudio **97**

10. Anexos **99**

10.1. A.1. Documentación técnica Paus MinCa 18 A PK 99

10.2. A.2. Documentación técnica Volare V8L 4×4 102

10.3. A.3. Extractos relevantes del estándar ECF-21 105

10.4. A.4. Extractos relevantes del estudio 107

4. Objetivos

4.1. Objetivo general

Evaluar la capacidad actual de la flota Volare V8L 4×4 operada por Transportes Géminis en la mina Chuquicamata Subterránea para cumplir los requisitos contractuales de disponibilidad mínima durante los años restantes del contrato, cuantificando el riesgo de multas asociado al incumplimiento y analizando alternativas de configuración de flota mediante la incorporación de unidades adicionales y la evaluación de equipos diseñados específicamente para operación subterránea.

4.2. Objetivos específicos

1. Caracterizar los requisitos contractuales del servicio de transporte de personal en Chuquicamata Subterránea, incluyendo el mínimo diario de unidades operativas exigido, la estructura de multas por incumplimiento y la configuración actual de la flota Volare V8L 4×4.

2. Analizar los registros históricos de operación, fallas, reparaciones, disponibilidad y consumo de repuestos de los vehículos Volare V8L 4×4, obteniendo indicadores de MTBF, MTTR, disponibilidad y comportamiento de fallas que describan el desempeño real de la flota.

3. Ajustar modelos de confiabilidad basados en distribuciones Weibull y en la evolución del tiempo entre fallas en función de la edad de los equipos, con el fin de representar el deterioro progresivo de la flota y utilizar estos modelos como base para la proyección a futuro.

4. Estimar, mediante simulación Monte Carlo horaria en un horizonte de cinco años, la probabilidad de incumplir el mínimo diario de unidades operativas y cuantificar las multas esperadas

para la configuración de flota actualmente disponible.

5. Definir y modelar escenarios alternativos de capacidad de flota basados en la incorporación de buses Volare adicionales, evaluando su efecto sobre los días de incumplimiento y las horas de holgura disponibles para la gestión de mantenimiento.

6. Evaluar, a partir de una disponibilidad objetivo de referencia, el tamaño mínimo de una flota alternativa basada en buses MinCa-18 que permita cumplir el requisito de contar con al menos siete unidades operativas, estimando el costo de inversión asociado.

7. Comparar los escenarios evaluados en términos de cumplimiento contractual, riesgo de multas, nivel de servicio y consecuencias económicas, con el propósito de recomendar configuraciones de flota que reduzcan la exposición al riesgo y entreguen una base técnica para decisiones de renovación o refuerzo de capacidad.

5. Marco Teórico

5.1. Condiciones operativas de la mina Chuquicamata Subterránea

La mina Chuquicamata Subterránea constituye una de las operaciones de *block caving* más grandes del mundo, desarrollada para reemplazar la histórica mina a cielo abierto. En su etapa inicial considera más de 140 km de túneles entre galerías de producción, transporte y ventilación (Codelco, 2019).

Las galerías principales presentan secciones del orden de 7 a 8 metros de ancho y 5 a 6 metros de alto, lo que permite el tránsito de equipos LHD y camiones de bajo perfil con capacidades de hasta 60 toneladas. Las rampas de acceso alcanzan pendientes entre 2 % y 15 %, dependiendo del nivel y su función operativa, lo que genera exigencias significativas sobre los sistemas de tracción y frenado de los equipos móviles (Teniente et al., 2018).

A profundidades superiores a los 900 metros, el macizo rocoso presenta temperaturas naturales elevadas, lo que requiere un sistema de ventilación forzada para inyectar aire fresco y evacuar gases de combustión. A ello se suma la presencia de polvo en suspensión y variaciones de humedad relativa, condiciones que afectan directamente los sistemas de refrigeración, filtrado y frenos de los equipos móviles, incrementando las exigencias sobre su desempeño mecánico (Codelco, 2019).

Estas características físicas y ambientales configuran un entorno de operación altamente demandante, en el cual la confiabilidad y la disponibilidad de los equipos móviles son factores críticos para la continuidad operacional de la faena. Por lo tanto, deben ser consideradas al analizar el comportamiento de la flota y su capacidad para sostener el servicio de transporte de personal al interior de la mina.

5.2. Concepto y objetivos de la gestión de mantenimiento

El mantenimiento se entiende como el conjunto de actividades técnicas, administrativas y de gestión orientadas a preservar o restablecer un activo para que cumpla las funciones requeridas en su contexto operativo, buscando simultáneamente la efectividad y la eficiencia en el uso de los recursos disponibles (Márquez, 2007).

Desde una perspectiva de gestión, el mantenimiento debe definir de manera explícita sus objetivos y prioridades, establecer estrategias y responsabilidades claras y operar como un proceso integrado a la organización. Esto facilita la planificación, programación y control de las tareas dentro de un esquema de mejora continua y con enfoque de ciclo de vida. Una gestión adecuada apunta a reducir los costos globales de la actividad productiva, asegurar el correcto funcionamiento de los equipos y sus funciones, minimizar los riesgos para las personas y el medio ambiente, y alinear objetivos en los niveles estratégico, táctico y operativo mediante indicadores de desempeño (Viveros et al., 2013).

En este marco, la función de mantenimiento se orienta a alcanzar niveles de confiabilidad y disponibilidad del equipamiento coherentes con los requerimientos de producción o servicio definidos por la organización, de modo que el desempeño técnico de los activos permita cumplir los objetivos operacionales y económico-financieros establecidos (Márquez, 2007; Viveros et al., 2013). Esto resulta especialmente relevante en sistemas intensivos en activos, donde la continuidad del servicio depende de que exista una capacidad mínima disponible de equipos.

5.3. Datos e indicadores para el análisis de disponibilidad de equipos

El análisis de la capacidad de una flota de equipos móviles para mantener un nivel de servicio a lo largo del tiempo requiere disponer de indicadores que reflejen su comportamiento real en operación, más allá de la capacidad nominal de cada unidad. Entre estos indicadores destacan la disponibilidad, el tiempo medio entre fallas (MTBF) y el tiempo medio de reparación (MTTR), los cuales se obtienen a partir de registros históricos de fallas, intervenciones y tiempo de uso. Sin una base de datos confiable que reúna estos antecedentes, el análisis cuantitativo de la disponibilidad y de la capacidad de la flota se ve fuertemente limitado.

En un modelo de gestión de mantenimiento orientado a la mejora continua, el diagnóstico inicial debe considerar el historial de fallas, los indicadores de tiempo medio entre fallas y de reparación, así como el impacto económico de las detenciones no planificadas. La disponibilidad se interpreta como un nivel de servicio o producción comprometido por la organización, cuya lectura sirve como insumo para la toma de decisiones a nivel táctico y operativo, en particular en lo relacionado con la asignación de recursos y la planificación de actividades (Viveros et al., 2013).

También se han propuesto sistemas de indicadores que se apoyan en la información registrada en la base de datos del sistema de gestión y que requieren establecer registros que permitan el cálculo periódico y consistente de dichos indicadores. Esto supone definir qué información se consigna en cada orden de trabajo, con qué nivel de detalle y bajo qué estructura, de modo que los resultados sean comparables en el tiempo y útiles para la gestión (Hernández and Navarrete, 2001).

En este contexto, un sistema computarizado de gestión de mantenimiento (CMMS) debe registrar, como mínimo, para cada evento: la identificación del activo, el subsistema o componente

intervenido, el modo de falla, las fechas y horas de inicio y término, el uso acumulado al momento del evento, los tiempos de intervención, los repuestos y costos asociados, las observaciones relevantes y el responsable de la ejecución. Con esta estructura es posible construir indicadores como el tiempo medio entre fallas (MTBF), el tiempo medio de reparación (MTTR) y la disponibilidad, que permiten evaluar de manera objetiva el comportamiento de la flota.

Tabla 1: Campos mínimos de registro en el sistema computarizado de gestión de mantenimiento (CMMS).

Campo	**Contenido**
Identificación del activo	Código, familia/taxonomía y ubicación.
Subsistema / componente	Nivel de desagregación aplicable.
Modo de falla	Modo de falla (causa y efecto).
Fecha y hora	Inicio y término del evento.
Uso acumulado	Kilómetros y/o horas al momento del evento.
Tiempos de intervención	Diagnóstico, espera y reparación (base para calcular *MTBF* y *MTTR*).
Repuestos y costos	Código, cantidad, costo unitario y costo total.
Observaciones / causa raíz	Hallazgos relevantes para análisis y mejora.
Responsable y evidencia	Ejecutor, listas de verificación y documentos de respaldo.

Fuente:(Viveros et al., 2013)

5.4. Disponibilidad objetivo, costos de ineficiencia y redundancia

En la gestión de mantenimiento, la disponibilidad se entiende como un nivel de servicio o producción esperada, definido como un objetivo por la dirección de la organización y coherente con el presupuesto disponible. Este nivel de disponibilidad se establece en función de la estrategia general de la empresa y se utiliza como referencia para evaluar el desempeño de los activos y de la gestión de mantenimiento (Viveros et al., 2013).

El seguimiento de la disponibilidad permite orientar decisiones en distintos niveles. A ni-

vel táctico, la información asociada a este indicador se utiliza para asignar recursos, planificar intervenciones y priorizar equipos o sistemas de acuerdo con su impacto en la operación. A nivel operativo, la disponibilidad condiciona la programación diaria de tareas y el uso de los recursos técnicos y humanos, de manera que el sistema pueda aproximarse al nivel de servicio definido como objetivo (Viveros et al., 2013).

La gestión del mantenimiento no se limita a los costos directos de intervención de los equipos, sino que considera también los costos de ineficiencia asociados a la pérdida de producción o de servicio cuando los activos no están disponibles. Estos costos de oportunidad se manifiestan cuando la indisponibilidad de equipos críticos impide alcanzar el nivel de desempeño esperado y, por ello, deben incorporarse en las evaluaciones económicas vinculadas a las decisiones de mantenimiento (Viveros et al., 2013).

En ciertos sistemas industriales, los costos de ineficiencia derivados de la indisponibilidad pueden ser suficientemente elevados como para justificar la incorporación de equipos de respaldo. En estos casos se recurren a esquemas de redundancia, en los cuales se dispone de capacidad adicional para asegurar el logro del nivel de disponibilidad requerido. La decisión de incorporar redundancia se analiza comparando el costo incremental de inversión y operación de los equipos adicionales con la reducción esperada en los costos de ineficiencia asociados a la indisponibilidad de los activos principales (Viveros et al., 2013).

5.5. Factores de intervención y su relación con la disponibilidad de equipos

Los enfoques de intervención sobre los equipos suelen agruparse en cuatro categorías principales: intervención correctiva, intervención preventiva programada por tiempo o uso, interven-

ción basada en condición o predictiva (CBM) y acciones mejorativas o de rediseño (Márquez, 2007; Ahmad and Kamaruddin, 2012; Zio, 2013). La combinación de estos enfoques determina cómo se distribuyen en el tiempo las detenciones: un predominio de intervenciones correctivas se asocia a paradas imprevistas y a una mayor variabilidad en la disponibilidad, mientras que una mayor proporción de intervenciones preventivas o basadas en condición tiende a concentrar las detenciones en períodos planificados y a estabilizar la disponibilidad observable. De este modo, la mezcla de estos tipos de intervención influye en los valores de confiabilidad, mantenibilidad y disponibilidad que se obtienen a partir del comportamiento histórico de los equipos.

5.6. Conceptos RAM: Confiabilidad, Disponibilidad y Mantenibilidad

En ingeniería de mantenimiento, el desempeño de sistemas reparables se caracteriza mediante la tríada RAM: *confiabilidad*, *mantenibilidad* y *disponibilidad* (Rausand et al., 2020).

Confiabilidad. Se define como la probabilidad de que un ítem cumpla su función requerida durante un intervalo de tiempo bajo condiciones especificadas. Si T es el tiempo hasta la falla, la función de confiabilidad es $R(t) = P(T > t)$; su medida resumen habitual en sistemas reparables es el *MTBF* (tiempo medio entre fallas).

Mantenibilidad. Describe la capacidad de restaurar un ítem a condición operativa dentro de un tiempo determinado, empleando procedimientos y recursos establecidos. Si T_R es el tiempo de reparación, la función de mantenibilidad es $M(t) = P(T_R \leq t)$, y su medida resumen es el *MTTR* (tiempo medio de reparación).

Disponibilidad. Es la probabilidad de que el ítem se encuentre en estado operativo cuando se le requiere. En sistemas reparables se distinguen, entre otras, la *disponibilidad inherente* (solo fallas y reparaciones correctivas), la *disponibilidad lograda* (incluye mantenimiento preventivo) y la *disponibilidad operativa* (incluye logística y esperas). Bajo condiciones estacionarias y supuestos estándar, la disponibilidad inherente puede aproximarse por

$$A \approx \frac{\text{MTBF}}{\text{MTBF} + \text{MTTR}}$$

relacionando directamente la frecuencia de fallas y la rapidez de reparación.

Estas métricas están interrelacionadas: valores más altos de tiempo medio entre fallas (MTBF) y menores de tiempo medio de reparación (MTTR) se traducen en niveles mayores de disponibilidad, mientras que la combinación opuesta implica una mayor proporción de tiempo fuera de servicio. En este sentido, la disponibilidad resume en un solo indicador el efecto conjunto de la frecuencia de fallas y de la rapidez con que los equipos pueden ser restituidos a operación.

5.7. Comportamiento de fallas y curva de la tina (bathtub)

En sistemas reparables, el comportamiento temporal de la falla suele describirse mediante la tasa de riesgo o *hazard* $h(t)$, que relaciona la probabilidad instantánea de falla con el tiempo transcurrido en operación.

En análisis de confiabilidad, si T denota el tiempo hasta la falla, se definen la función de confiabilidad

$$R(t) = P(T > t),$$

y la densidad

$$f(t) = \frac{d}{dt}\big(1 - R(t)\big).$$

La *función de riesgo (hazard)* se define como

$$h(t) = \frac{f(t)}{R(t)},$$

y representa la tasa instantánea de falla condicionada a haber sobrevivido hasta t (Rausand et al., 2020).

Una representación del comportamiento temporal de $h(t)$ es la *curva de la tina (bathtub)*, que distingue tres regiones (Rausand et al., 2020):

1. **Rodaje**: $h(t)$ *decreciente*, asociada a defectos de fabricación, instalación o ajuste inicial.
2. **Vida útil**: $h(t)$ *aproximadamente constante*, con ocurrencia de fallas sin tendencia marcada con el tiempo/uso.
3. **Desgaste**: $h(t)$ *creciente*, vinculada a mecanismos de envejecimiento como fatiga o corrosión.

Para modelar estadísticamente estos patrones se emplea, entre otras, la *distribución de Weibull*, cuya función de riesgo puede escribirse como

$$h(t) = \frac{\beta}{\eta}\left(\frac{t}{\eta}\right)^{\beta-1}.$$

El parámetro de forma β permite reflejar comportamientos *decrecientes* ($\beta < 1$), *aproximadamente constantes* ($\beta \approx 1$) o *crecientes* ($\beta > 1$) de la función de riesgo. Este tipo de modelos permite

obtener parámetros resumen y probabilidades de falla en intervalos de tiempo específicos, que se utilizan como base para el análisis cuantitativo del comportamiento de sistemas reparables.

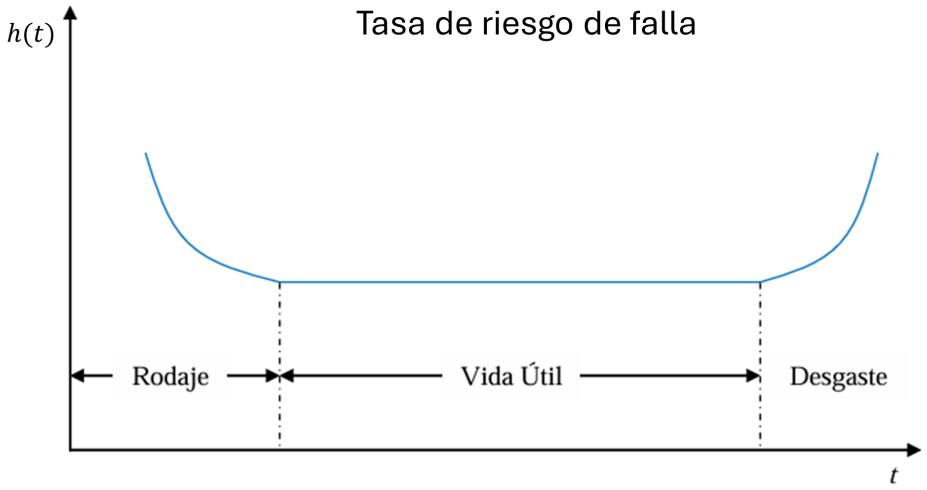


Figura 1: Curva de la tina: fases de rodaje, vida útil y desgaste.
Fuente: (Mardones, 2011).

5.8. Fundamentos matemáticos de confiabilidad

El análisis de la capacidad de una flota para sostener un nivel de servicio requiere describir el comportamiento de las fallas en los equipos. Para ello se utiliza la variable aleatoria T, definida como el tiempo hasta la falla bajo condiciones de operación específicas. A partir de T se derivan las funciones fundamentales de confiabilidad empleadas en ingeniería de mantenimiento.

5.8.1. Definiciones básicas

Sea T el tiempo hasta la falla, con $t \geq 0$. Se definen:

$$R(t) = P(T > t), \tag{1}$$

$$F(t) = 1 - R(t), \tag{2}$$

$$f(t) = \frac{dF(t)}{dt} = -\frac{dR(t)}{dt}, \tag{3}$$

$$h(t) = \frac{f(t)}{R(t)}, \tag{4}$$

donde $R(t)$ es la función de confiabilidad, $F(t)$ la distribución acumulada del tiempo hasta la falla y $f(t)$ la densidad asociada.

La *función de riesgo (hazard)* representa la tasa instantánea de falla condicionada a la supervivencia hasta t. La hazard acumulada se define como:

$$H(t) = \int_0^t h(u)\,du, \qquad \text{y satisface} \qquad R(t) = \exp[-H(t)]. \tag{5}$$

Estas funciones permiten caracterizar matemáticamente el patrón temporal de fallas y constituyen la base para estimar la probabilidad de indisponibilidad de los equipos en un periodo dado.

5.8.2. Medidas resumen: MTBF y MTTR

En sistemas reparables, como flotas de transporte, se utilizan dos indicadores centrales:

- **MTBF** (Mean Time Between Failures): promedio de los intervalos sucesivos entre fallas.
- **MTTR** (Mean Time To Repair): tiempo medio requerido para restaurar un equipo desde la falla hasta volver a operación.

Bajo una tasa de falla constante (proceso de Poisson con parámetro $\lambda > 0$):

$$R(t) = e^{-\lambda t}, \qquad E[T] = \frac{1}{\lambda}, \qquad \text{MTBF} = \frac{1}{\lambda}. \tag{6}$$

Este modelo corresponde a fallas aleatorias sin tendencia temporal marcada.

5.8.3. Distribuciones de vida comunes

a) Distribución exponencial.

$$R(t) = e^{-\lambda t}, \qquad h(t) = \lambda, \qquad E[T] = \frac{1}{\lambda}. \tag{7}$$

Corresponde a un modelo con hazard constante, adecuado para fallas aleatorias.

b) Distribución Weibull (dos parámetros). La distribución de Weibull permite modelar patrones de fallas de rodaje, vida útil o desgaste:

$$R(t) = \exp\left[-\left(\frac{t}{\eta}\right)^{\beta}\right], \tag{8}$$

$$h(t) = \frac{\beta}{\eta}\left(\frac{t}{\eta}\right)^{\beta-1}, \tag{9}$$

$$E[T] = \eta\,\Gamma\left(1 + \frac{1}{\beta}\right). \tag{10}$$

Interpretación clásica del parámetro de forma β:

- $\beta < 1$: hazard *decreciente* (rodaje).

- $\beta \approx 1$: hazard *aproximadamente constante* (fallas aleatorias).

- $\beta > 1$: hazard *creciente* (desgaste).

5.8.4. Aplicación al análisis de capacidad de flota

En una flota destinada al transporte de personal, la confiabilidad de cada unidad afecta directamente la disponibilidad diaria. Los parámetros derivados de los modelos anteriores, especialmente β, η, MTBF y MTTR permiten estimar:

- La probabilidad de que una unidad falle en un intervalo dado,

- El número esperado de unidades no disponibles,

- El riesgo de caer por debajo del mínimo contractual de equipos operativos.

Estos fundamentos constituyen el soporte del análisis de riesgo y evaluación de la capacidad requerida de la flota.

5.9. Disponibilidad conjunta de la flota y cumplimiento del servicio

En sistemas basados en una flota de activos, el desempeño operativo depende de que exista un número suficiente de unidades disponibles en cada instante. La literatura utiliza el concepto de *fleet readiness* para describir la probabilidad de que suficientes activos se encuentren disponibles para que el proceso principal pueda ejecutarse cuando es requerido (Basten and Arts, 2017). Esta perspectiva destaca que la disponibilidad individual de los equipos no refleja por sí sola la capacidad del sistema para mantener un nivel operativo mínimo, ya que la simultaneidad de fallas, los

tiempos de reparación y las demoras asociadas al mantenimiento pueden generar periodos en los que el número de unidades operativas sea insuficiente (Basten and Arts, 2017).

El *readiness* se ve afectado tanto por la duración efectiva de las tareas de mantenimiento como por los tiempos de espera vinculados a la falta de repuestos o recursos, los cuales influyen directamente en la probabilidad de contar con suficientes equipos disponibles en un momento dado (Basten and Arts, 2017). En contextos donde la operación exige un número mínimo de unidades para mantener la continuidad del servicio o evitar penalizaciones contractuales, el análisis de la disponibilidad conjunta se vuelve un elemento central para evaluar la capacidad real de la flota para sostener dicho nivel operativo.

5.10. Descripción del Volare V8L 4x4

El vehículo Volare V8L 4X4 incorpora motorización Cummins, transmisión manual Eaton y componentes específicos para operación en condiciones severas. La ficha técnica comercial declara además la planta de asientos y las dimensiones exteriores (Volare, 2025).

5.10.1. Capacidad y dimensiones

Tabla 2: Capacidad declarada y dimensiones exteriores.

Ítem	**Especificación**
Capacidad de asientos	18 asientos + conductor (total 19 plazas).
Dimensiones exteriores	Largo 6535 mm; ancho 2130 mm; altura 3192 mm

(Fuente:(Volare, 2018))

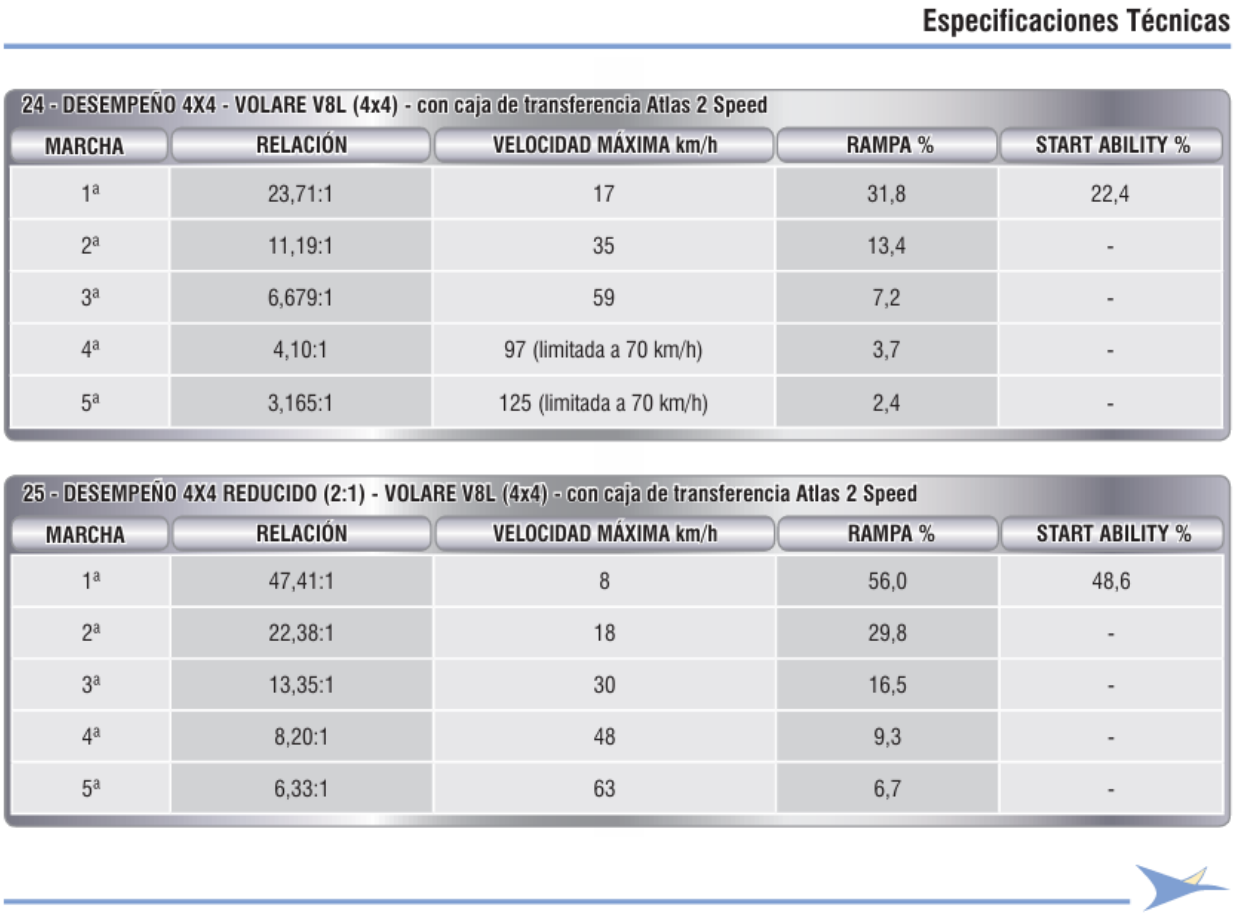
5.10.2. Especificaciones mecánicas

Tabla 3: Componentes y capacidades técnicas V8L 4x4.

Sistema	**Detalle (según manual)**
Motor	Cummins ISF 3.8; potencia 152 CV a 2600 rpm; torque 450 Nm (NBR ISO 1585); inyección *common rail*.
Transmisión	**Eaton FSO 4505 C**, 5 marchas + retroceso (manual).
Caja de transferencia	**Atlas 2 Speed** (accionamiento por cable); *alta* 1:1; *baja* 2:1 o 3:1 (según versión); capacidad aprox. 1,9 L.
Frenos	Servicio neumático tipo *S-CAM*; estacionamiento *spring-brake* 24"; freno motor (escape) electroneumático.
Dirección	ZF Servocom 8095 (servo asistida); fluido ATF.
Eléctrico	Sistema 24 V; alternador 28 V / 110 A; dos baterías 12 V 134 Ah.
Combustible y SCR	Estanque diésel **150 L**; depósito ARLA-32 (DEF) **16 L**.
Refrigeración	Capacidad total aprox. 14,5 L (mezcla 50/50).
Suspensión	Ballestas semi-elípticas (trasera de doble fase) con amortiguadores telescópicos.
Neumáticos	215/75R17.5
Pesos (PBT/CMT)	Peso Bruto Total aprox. 7.500 kg.
Desempeño 4x4	Capacidad de arranque en rampa maxima con 4X4 reducida $\sim$ 56,0 %.

(Fuente:(Volare, 2018))

5.10.3. Tabla de velocidades por marcha



Especificaciones Técnicas

24 - DESEMPEÑO 4X4 - VOLARE V8L (4x4) - con caja de transferencia Atlas 2 Speed

MARCHA	RELACIÓN	VELOCIDAD MÁXIMA km/h	RAMPA %	START ABILITY %
1ª	23,71:1	17	31,8	22,4
2ª	11,19:1	35	13,4	-
3ª	6,679:1	59	7,2	-
4ª	4,10:1	97 (limitada a 70 km/h)	3,7	-
5ª	3,165:1	125 (limitada a 70 km/h)	2,4	-

25 - DESEMPEÑO 4X4 REDUCIDO (2:1) - VOLARE V8L (4x4) - con caja de transferencia Atlas 2 Speed

MARCHA	RELACIÓN	VELOCIDAD MÁXIMA km/h	RAMPA %	START ABILITY %
1ª	47,41:1	8	56,0	48,6
2ª	22,38:1	18	29,8	-
3ª	13,35:1	30	16,5	-
4ª	8,20:1	48	9,3	-
5ª	6,33:1	63	6,7	-

Figura 2: Desempeño 4x4 y 4x4 reducido del Volare V8L (4x4) con caja de transferencia Atlas 2 Speed.

(Fuente:(Volare, 2018))

5.11. Descripción del MinCa 18A PK

El MinCa 18 A PK, fabricado por Hermann Paus Maschinenfabrik, es un vehículo compacto diseñado específicamente para el transporte de personal en minería subterránea (Hermann Paus Maschinenfabrik, 2025). A diferencia de equipos adaptados desde aplicaciones urbanas o de superficie, este modelo incorpora desde su diseño características estructurales, de seguridad y de operación orientadas a ambientes subterráneos de alta exigencia. El fabricante lo clasifica como un

compact passenger transporter con capacidad total para 18 personas, distribuidas en 2 plazas en la cabina del conductor y 16 en la cabina de pasajeros.

5.11.1. Capacidad y dimensiones

El MinCa 18 A PK presenta una capacidad total de 18 pasajeros y un peso operativo de 7.300 kg. La carga máxima permitida es de 2.000 kg, con una distribución máxima de 3.300 kg en el eje delantero y 6.000 kg en el eje trasero.

Las dimensiones generales del equipo son las siguientes:

- Largo: 5.850 mm
- Ancho: 2.140 mm
- Alto: 3.260 mm
- Distancia libre al suelo: 300 mm
- Ancho interior de cabina/módulo: 2.020 mm

Estas dimensiones permiten su operación en túneles y galerías de sección limitada, típicas del entorno subterráneo.

5.11.2. Condiciones operativas

El equipo está diseñado para operar entre temperaturas de –20 °C y +40 °C, con una pendiente longitudinal máxima de 35 %. El rango operativo considera funcionamiento a plena potencia hasta los 1.500 metros de altura sin pérdida de rendimiento del motor.

La estructura completa del vehículo, tanto cabina del conductor como cabina de pasajeros, cuenta con certificación ROPS/FOPS, requisito crítico para faenas subterráneas. A ello se suman características de seguridad como superficies antideslizantes, activación automática del freno de estacionamiento ante ausencia del operador, señalización sonora de retroceso y salidas de emergencia.

5.11.3. Motorización

El MinCa puede configurarse con distintos motores diésel DEUTZ:

- **Motor estándar:** BF4M 2012 C, 93 kW a 2.300 rpm.
- **Motor opcional:** TCD 2012 L04 2V, 95 kW a 2.300 rpm (Stage IIIA / EPA Tier 3).
- **Motor opcional:** TCD 3.6 L4, 90 kW a 2.200 rpm (Stage V / EPA Tier 4F), con sistema DOC + DPF + SCR.

Todos los motores incorporan filtración de aire de doble etapa, sistemas de prefiltrado de combustible con separador de agua y protecciones automáticas ante parámetros críticos. La capacidad del estanque de combustible es de 115 L.

5.11.4. Tracción y desempeño

El sistema de tracción corresponde a un tren hidrostático Danfoss H1, con tracción 4×4 permanente y conmutación reversible bajo carga. Las velocidades máximas son:

- Primera marcha: 10 km/h
- Segunda marcha: 33 km/h

El equipo desarrolla una fuerza de tracción máxima de 34 kN, con capacidad de pendiente de hasta 46 %, superior al rango típico de rampas en minería subterránea. Los ejes corresponden a DANA (212 delantero y 112 trasero), este último con diferencial bloqueable al 100 %.

5.11.5. Sistema de frenos

El sistema de frenos incluye:

- Freno de servicio hidráulico de dos circuitos, con frenos húmedos en baño de aceite.
- Freno de estacionamiento tipo SAHR (spring applied, hydraulic released).
- Freno de emergencia basado en uno de los circuitos del freno de servicio.

Esta arquitectura es estándar en equipos de minería por su confiabilidad y resistencia al desgaste en ambientes húmedos y con presencia de polvo.

5.11.6. Cabina y transporte de pasajeros

La cabina del conductor puede configurarse en versión abierta o cerrada. Incluye asiento ajustable, cinturón de seguridad, panel de información del motor, ventilación y opción de aire acondicionado. La cabina puede abatirse hidráulicamente para facilitar el mantenimiento.

La cabina de pasajeros posee 16 plazas distribuidas en bancas transversales, barandas interiores, iluminación automática por apertura de puertas y certificación ROPS/FOPS. Existen versiones abiertas o cerradas, estas últimas con calefacción y ventanas laterales corredizas. El módulo incorpora pulsadores de advertencia que se comunican con la bocina del vehículo.

5.11.7. Sistemas eléctricos e hidráulicos

El sistema eléctrico opera a 24 V mediante dos baterías de 12 V – 110 Ah, con iluminación LED en todos los puntos exteriores e interiores. El sistema hidráulico posee un estanque de 110 L con sensores de nivel y temperatura.

El equipo puede incorporar sistemas de supresión de incendios HRD (Protecfire o ANSUL), tanto de activación manual como automática.

6. Metodología

6.1. Diseño general del estudio

El desarrollo de este estudio se estructura en torno a determinar si la flota actual de equipos Volare V8L asignada al servicio de transporte en Chuquicamata Subterránea tiene la capacidad técnica y operativa para cumplir con el requerimiento contractual de mantener un mínimo de 7 equipos operativos por día. Además, se evalúa la conveniencia técnica y operativa de incorporar un *equipo específicamente diseñado para condiciones de mina subterránea*, considerando que el modelo actualmente utilizado no fue concebido para dicho entorno operacional.

Para abordar este problema, se plantea una metodología cuantitativa sustentada exclusivamente en registros reales de operación y mantenimiento provenientes de las Órdenes de Trabajo (OT), repuestos y costos asociados. El diseño general del estudio se organiza en cinco bloques principales:

1. **Construcción y depuración de la base de datos.** Se integran y normalizan los registros provenientes de las OT, identificando intervenciones correctivas, horas de mano de obra, componentes intervenidos y fechas asociadas. Se determina para cada equipo su período real de servicio dentro del horizonte analizado.

2. **Modelación del comportamiento de fallas y confiabilidad.** A partir de las OT correctivas se identifican eventos de falla que permiten calcular los tiempos entre fallas (TBF). Con estos datos se realiza un ajuste Weibull de dos parámetros (η, β) por cada activo, para caracterizar su comportamiento de desgaste y determinar su confiabilidad $R(t)$. Este análisis evidencia el nivel de adaptación (o falta de ella) del Volare V8L a las condiciones de la mina subterránea.

3. **Determinación de la disponibilidad efectiva y evaluación de capacidad.** Usando la lógica del taller (lunes a viernes, 09:00–17:48), se construyen intervalos efectivos de indisponibilidad asociadas a cada OT. Se incorpora además la falla mayor del activo 990-PGTS58-6 a partir del 25-06-2025, donde queda fuera de servicio continuo. Luego, se reconstruye la serie diaria de buses operativos para todo el horizonte histórico. El cumplimiento del mínimo contractual de 7 unidades se evalúa solo desde el 11-01-2024, fecha en que la flota se completa con 9 unidades.

4. **Evaluación económica y escenarios de capacidad.** Se cuantifica el impacto económico del incumplimiento mediante un modelo de multa por día en que no se alcanza el mínimo de 7 unidades. Luego se simulan escenarios incrementales de flota (0, 1, 2 y 3 unidades adicionales), determinando su efecto en la reducción de días incumplidos y de multas acumuladas.

5. **Evaluación comparativa de alternativas de equipo.** Con base en los resultados de confiabilidad, disponibilidad y criticidad de componentes, se analiza la pertinencia técnica de incorporar un bus especializado para transporte en mina subterránea, comparando el desempeño esperado frente al Volare V8L. Este bloque integra la evidencia técnica del modelo actual (fallas recurrentes, desgaste acelerado, $\beta > 1$, indisponibilidades prolongadas) con la evaluación operativa y económica de una alternativa diseñada para el ambiente subterráneo.

6.2. Construcción y depuración de la base de datos

La primera etapa del estudio consiste en construir una base de datos consistente a partir de los registros históricos de mantenimiento y operación de la flota Volare V8L utilizados en el servicio de Chuquicamata Subterránea. El objetivo es obtener, para cada equipo, una trazabilidad

clara de sus intervenciones, tiempos asociados y costos, sin incorporar información distinta a la registrada en los sistemas de la empresa.

6.2.1. Fuentes de información

Para este trabajo se utilizaron tres archivos consolidados proporcionados por la empresa:

1. Consolidado_OT: contiene el detalle de cada orden de trabajo (OT), incluyendo al menos:
   - Identificación del activo.
   - Fecha de intervención.
   - Tipo de OT (correctiva o preventiva).
   - Total de horas de mano de obra asociadas a la intervención.
2. Consolidado_OT_Costos: agrupa los costos asociados a cada orden de trabajo (OT), principalmente:
   - Costo de mano de obra.
   - Costo total de repuestos por orden.
3. Consolidado_por_producto: detalla, para cada orden de trabajo (OT), los repuestos o productos utilizados, especificando:
   - Código y descripción del producto.
   - Componente o sistema del vehículo al que está asociado.
   - Costo unitario y total del ítem.

Estos tres archivos se utilizan de forma integrada, el primero (Consolidado_OT) es la base principal para el análisis de fallas y tiempos, mientras que el segundo (Consolidado_OT_Costos) y el tercero (Consolidado_por_producto) se emplean para vincular las intervenciones con sus costos y con los componentes específicos reemplazados, lo que se utiliza más adelante en el análisis de criticidad por componente.

6.2.2. Horizonte de análisis y selección de flota

Del total de registros disponibles se seleccionó un horizonte de estudio que va aproximadamente desde el **04-01-2023** hasta el **25-10-2025**, periodo en el cual existe información consistente de la flota. Dentro de este intervalo se consideran únicamente las unidades Volare V8L asociadas al contrato de transporte en Chuquicamata Subterránea.

Para cada activo i se define su período de servicio dentro del horizonte como:

- **Inicio de servicio**: la primera fecha en que el activo aparece en cualquiera de los consolidados (ya sea con una OT correctiva, preventiva u otro tipo), truncada al inicio del horizonte cuando corresponde.
- **Fin de servicio**: el final del horizonte de análisis, es decir, la última fecha considerada en el estudio.

6.2.3. Depuración de registros

Sobre los archivos originales se aplican los siguientes criterios de depuración:

1. Se eliminan registros sin identificación de activo o sin fecha de intervención válida.
2. Se filtran las intervenciones cuya fecha queda fuera del horizonte definido.

3. Se homogenizan los formatos de fecha y tipos de dato:
    - las fechas se convierten a formato de fecha/hora (`datetime`),
    - las horas de mano de obra se convierten a valores numéricos (en horas).
4. Se mantiene el valor de Total horas mano de obra, tal como está en el consolidado, sin recalcular manualmente la duración de las intervenciones.

Además, se clasifican las órdenes según su tipo:

- **OT correctivas**: se interpretan como eventos de falla del equipo.
- **OT preventivas**: no se consideran como fallas en el cálculo de tiempos entre fallas ni en la construcción de los intervalos de indisponibilidad.

6.2.4. Estructuras de datos para etapas posteriores

A partir de la base depurada se construyen dos insumos principales que se utilizan en las etapas siguientes de la metodología:

1. Base de fallas por activo: incluye solamente OT correctivas con las columnas mínimas necesarias:
    - Activo.
    - Fecha de intervención.
    - Total de horas de mano de obra.

    Esta base se utiliza tanto para el cálculo de los tiempos entre fallas (TBF) como para la construcción de los intervalos de no disponibilidad.

2. Base de componentes y costos por OT: generada a partir de la unión de **Consolidado_OT_Costos** y **Consolidado_por_producto**, relacionando cada OT con los componentes intervenidos y sus costos. Esta estructura se emplea para identificar los componentes más críticos de la flota en términos de frecuencia de falla y costo acumulado.

Con estas estructuras definidas, la base de datos queda preparada para abordar de forma ordenada la modelación del comportamiento de fallas, la estimación de confiabilidad, la reconstrucción de la serie diaria de disponibilidad y, posteriormente, la evaluación económica y de escenarios de capacidad.

6.3. Modelación del comportamiento de fallas y confiabilidad

Esta etapa tiene como objetivo describir rigurosamente el comportamiento de fallas de cada bus de la flota, identificando patrones de desgaste y estimando la confiabilidad de operación en función de los datos reales obtenidos desde las OT correctivas. El enfoque utilizado se basa estrictamente en la información disponible, sin introducir supuestos adicionales.

6.3.1. Identificación de eventos de falla

Para efectos de este estudio, se considera que un equipo sufre una falla cada vez que aparece una Orden de Trabajo clasificada como *correctiva* en el consolidado. No se utilizan otras fuentes ni se infieren fallas no registradas. Para cada activo:

- Se extraen todas sus OT correctivas.
- Se ordenan cronológicamente por fecha de intervención.

- Cada fecha se interpreta como un evento de falla.

No se aplican modificaciones a las fechas ni ajustes por duración de trabajos en esta etapa.

6.3.2. Construcción de los tiempos entre fallas (TBF)

A partir de la secuencia ordenada de fallas para cada activo i, se construyen los tiempos entre fallas (TBF) como:

$$TBF_{i,k} = F_{i,k+1} - F_{i,k}$$

donde cada intervalo se expresa en horas, utilizando tiempo calendario 24/7.

Las reglas aplicadas son las siguientes:

- Se utiliza únicamente la información registrada en las OT.
- No se construyen intervalos al inicio o al final si no existe información suficiente.
- Solo se conservan TBF estrictamente positivos.
- Si un activo posee menos de dos OT correctivas, no es posible construir TBF y no se ajusta un modelo de confiabilidad Weibull para ese equipo.

El resultado es una serie de TBF para cada bus, con granularidad suficiente para aplicar un modelo estadístico de fallas.

6.3.3. Ajuste Weibull de dos parámetros

Con los TBF obtenidos, se estima para cada equipo un modelo Weibull de dos parámetros, caracterizado por:

- Parámetro de escala: η_i.

- Parámetro de forma: β_i.

El ajuste se realiza mediante máxima verosimilitud, fijando loc $= 0$, en coherencia con un modelo de dos parámetros. La interpretación de β_i es:

- $\beta_i > 1$: desgaste creciente del activo.

- $\beta_i = 1$: comportamiento exponencial (fallas esencialmente aleatorias).

- $\beta_i < 1$: presencia de fallas infantiles.

No se aplica ningún filtro externo ni suavizado adicional sobre los parámetros obtenidos.

6.3.4. Cálculo de la confiabilidad $R(t)$

Con los parámetros estimados, la confiabilidad de un activo para un tiempo de misión t (en horas) se calcula como:

$$R_i(t) = \exp\left[-\left(\frac{t}{\eta_i}\right)^{\beta_i}\right].$$

Los horizontes utilizados (24 h y 168 h) se seleccionan en función de la operación real del servicio:

- $t = 24$ h: confiabilidad para un día de operación.

- $t = 168$ h: confiabilidad aproximada en una semana de operación.

Solo se calculan confiabilidades para activos con ajuste Weibull válido.

6.3.5. Curvas de tasa de falla (hazard)

Para interpretar gráficamente el comportamiento de desgaste, se genera para cada activo una curva de tasa instantánea de fallas (hazard), definida como:

$$h_i(t) = \frac{\beta_i}{\eta_i}\left(\frac{t}{\eta_i}\right)^{\beta_i - 1}.$$

Estas curvas permiten visualizar si la probabilidad instantánea de falla aumenta con el tiempo de operación, información relevante al evaluar la adaptación del modelo Volare V8L al ambiente subterráneo.

6.3.6. Propósito de esta etapa

Los resultados de esta etapa permiten:

- Comprender el patrón real de fallas de cada bus.
- Identificar activos con desgaste acelerado ($\beta_i > 1$).
- Entregar evidencia técnica que respalde la evaluación de incorporar un bus especializado para minería subterránea.
- Conectar el comportamiento de fallas con la disponibilidad operativa y la capacidad de la flota para cumplir el mínimo contractual.

6.4. Determinación de MTBF, MTTR y disponibilidad operativa de la flota

Esta etapa describe el procedimiento utilizado para calcular los indicadores de disponibilidad de cada equipo de la flota (MTBF, MTTR y disponibilidad operativa). Todo el proceso se basa

exclusivamente en la información registrada en el **Consolidado_OT** y en el horario real de trabajo del taller.

6.4.1. Período de servicio por activo

Para cada activo se define su período de servicio dentro del horizonte del estudio:

- Inicio de servicio: primera fecha en que el activo aparece en el consolidado.
- Fin de servicio: 25-10-2025, correspondiente al fin del horizonte analizado.

Este intervalo se utiliza para calcular tanto las horas potenciales como las horas de falla y de operación del equipo.

6.4.2. Transformación de OT correctivas en horas de falla

Cada Orden de Trabajo clasificada como correctiva se transforma en horas de falla siguiendo la lógica operativa del taller:

1. El taller funciona de lunes a viernes, entre 09:00 y 17:48, equivalentes a 8,8 h por día hábil.
2. La reparación comienza a las 09:00 del primer día hábil igual o posterior a la fecha de intervención registrada en la OT.
3. Las horas de mano de obra asociadas a la OT se distribuyen dentro de este horario.
4. La indisponibilidad para el servicio se considera desde el inicio de la reparación hasta el término de las horas de trabajo acumuladas.

De este modo, cada OT correctiva se asocia a un intervalo de falla expresado en horas.

6.4.3. Falla mayor del activo 990

El activo 990-PGTS58-6 presenta una falla mayor a partir del 25-06-2025, quedando fuera de servicio continuo hasta el final del horizonte del estudio. Este período se incorpora como horas de falla adicionales, sumándose a las horas de falla obtenidas desde sus OT correctivas normales.

6.4.4. Cálculo de horas potenciales, horas de falla y horas operativas

Para cada activo se calculan los siguientes valores:

- **Horas potenciales 24/7**:

$$H_{\text{pot}} = (\text{días de servicio}) \times 24$$

- **Horas de falla**: suma de todas las horas de falla generadas por las OT correctivas, más la falla mayor en el caso del activo 990.

- **Horas operativas**:

$$H_{\text{oper}} = H_{\text{pot}} - H_{\text{falla}}$$

Estos tres valores se obtienen directamente desde los datos y la lógica descrita, sin introducir supuestos externos.

6.4.5. Cálculo de MTBF y MTTR por activo

El número de fallas de cada equipo N_i corresponde al número de OT correctivas asociadas al activo i dentro de su período de servicio. Con esto se calculan:

- **MTBF (Mean Time Between Failures)**:

$$MTBF_i = \frac{H_{\text{oper},i}}{N_i}$$

- **MTTR (Mean Time To Repair)**:

$$MTTR_i = \frac{H_{\text{falla},i}}{N_i}$$

Estos indicadores corresponden a valores operativos reales, ya que incorporan el horario del taller, las fallas registradas y la indisponibilidad.

6.4.6. Disponibilidad operativa del equipo

La disponibilidad operativa de cada activo se calcula a partir de sus valores de MTBF y MTTR:

$$A_i = \frac{MTBF_i}{MTBF_i + MTTR_i}.$$

Esta disponibilidad corresponde a una medida efectiva de desempeño del equipo en las condiciones reales del servicio.

6.4.7. Indicadores agregados de la flota

A nivel de flota se suman las horas potenciales, las horas de falla, las horas operativas y el número total de fallas de todos los activos. Con estos valores se obtienen indicadores globales:

$$MTBF_{\text{flota}} = \frac{\sum H_{\text{oper}}}{\sum N},$$

$$MTTR_{\text{flota}} = \frac{\sum H_{\text{falla}}}{\sum N},$$

$$A_{\text{flota}} = \frac{MTBF_{\text{flota}}}{MTBF_{\text{flota}} + MTTR_{\text{flota}}}.$$

Estos indicadores permiten evaluar el desempeño global de la flota bajo las condiciones reales de operación y mantenimiento registradas en el período de estudio.

6.5. Reconstrucción de la disponibilidad diaria y evaluación del cumplimiento del mínimo contractual

Esta etapa tiene como objetivo reconstruir la disponibilidad operativa diaria de la flota, considerando los intervalos de falla obtenidos previamente y el calendario real de funcionamiento del servicio. A partir de esta reconstrucción es posible determinar cuántos buses estuvieron efectivamente operativos por día y evaluar el cumplimiento del requisito contractual de mantener un mínimo de siete equipos desde el 11-01-2024 hasta el 25-10-2025.

6.5.1. Intervalos de falla efectivos por activo

A partir de las OT correctivas y de la lógica del taller descrita en las secciones anteriores, se construyen intervalos de falla expresados en tiempo para cada activo. Cada intervalo cubre el periodo comprendido entre el inicio de la reparación y el término efectivo.

Para el activo 990-PGTS58-6 se incorpora además un intervalo adicional de falla mayor que lo mantiene fuera de servicio desde el 25-06-2025 hasta el fin del horizonte analizado. Este intervalo se trata de la misma forma que las indisponibilidades normales, pero con duración extendida.

6.5.2. Determinación del estado diario de cada activo

Para cada día del período comprendido entre el 04-01-2023 y el 25-10-2025, y para cada activo, se evalúan dos condiciones:

1. **Pertenencia al período de servicio**: si el activo aún no ingresa a la flota o su inicio de servicio es posterior a la fecha evaluada, se clasifica como *no disponible por no incorporación*.

2. **Solapamiento con intervalos de falla**: si el día coincide parcial o totalmente con un intervalo de falla, el activo se clasifica como *en falla* para esa fecha.

Un activo se considera operativo en un día determinado solo cuando se encuentra dentro de su período de servicio y no está asociado a ningún intervalo de falla.

6.5.3. Serie diaria de equipos operativos

Con el estado diario de cada activo, se construye la siguiente serie:

$$buses_operativos(t) = \sum_{i=1}^{N} Operativo_i(t),$$

que corresponde al número de equipos operativos en cada fecha. Esta serie refleja la disponibilidad real y efectiva de la flota, incorporando:

- La duración real de cada reparación.
- El horario del taller.
- Las fallas consecutivas o extensas.
- La falla mayor del activo 990.

6.5.4. Aplicación del requisito contractual desde el 11-01-2024

El contrato exige mantener un mínimo de siete buses operativos por día, pero este requisito solo se aplica desde el **11-01-2024**, fecha en la cual la flota queda completa con nueve unidades. El cumplimiento diario se define como:

$$Cumple(t) = \begin{cases} \text{No aplica}, & t < \text{11-01-2024}, \\ 1, & buses_operativos(t) \geq 7, \\ 0, & buses_operativos(t) < 7. \end{cases}$$

6.5.5. Déficit diario de equipos

Para las fechas en que se exige el mínimo, se calcula el déficit de equipos necesarios para cumplir con el contrato:

$$Dficit(t) = \max\left(0,\ 7 - buses_operativos(t)\right).$$

Este indicador cuantifica *cuántos buses faltaron* en cada día de incumplimiento.

6.5.6. Indicadores mensuales de desempeño

Para cada mes posterior al 11-01-2024 se construyen los siguientes indicadores:

- **Días de incumplimiento**: número de días en que $buses_operativos(t) < 7$.
- **Déficit máximo diario**: valor máximo de Déficit del mes, utilizado como referencia para estimar el número mínimo de equipos adicionales necesarios para evitar incumplimientos.
- **Identificación de meses críticos**: meses con alta frecuencia de incumplimientos o con déficit máximo elevado.

Estos indicadores reflejan la estabilidad operativa de la flota y constituyen la base para el análisis posterior de la capacidad y su dimensionamiento.

6.6. Análisis de componentes y repuestos críticos

Esta etapa tiene como objetivo identificar qué repuestos, categorías y subsistemas concentran la mayor cantidad de fallas y costos de repuestos en la flota Volare V8L, con el fin de evaluar si el patrón de fallas es consistente con un uso en condiciones de mina subterránea.

6.6.1. Fuentes de información y alcance

Para este análisis se utilizaron tres archivos principales:

1. Consolidado_por_producto: registra, para cada orden de trabajo, los productos o repuestos utilizados, la fecha de intervención y el costo unitario.
2. Productos_clasificados: asocia cada producto a una categoría y un subsistema (por ejemplo, motor, transmisión, neumáticos, sistema eléctrico, etc.).

3. indicadores_por_activo: se utiliza para identificar los nueve buses Volare V8L que forman parte de la flota analizada.

El horizonte de tiempo considerado es el mismo que en el resto del estudio, desde el 04-01-2023 hasta el 25-10-2025, e incluye únicamente los registros correspondientes a estos nueve equipos.

6.6.2. Selección de fallas relevantes

Dado que el interés está en las fallas asociadas al uso en mina subterránea, el análisis se restringe a:

- Órdenes de trabajo de tipo correctiva, que representan fallas efectivas del equipo.
- Repuestos efectivamente cargados en dichas OT correctivas.

Las intervenciones preventivas u otros tipos de trabajo se excluyen de este análisis, ya que no responden directamente a una falla.

6.6.3. Clasificación funcional de los repuestos

Cada línea de repuesto del consolidado se vincula con su categoría y subsistema utilizando en el archivo Productos clasificados. Cuando un producto no tiene clasificación disponible, se le asigna una etiqueta genérica (por ejemplo, “Sin categoría” o “Sin subsistema”) para no perder información.

De esta forma, cada repuesto utilizado en una OT correctiva queda asociado a una unidad funcional del vehículo (motor, transmisión, neumáticos, sistema eléctrico, etc.), lo que permite analizar el comportamiento del modelo Volare V8L a nivel de conjuntos mecánicos y sistemas.

6.6.4. Construcción de indicadores por repuesto, categoría y subsistema

A partir de los datos clasificados se construyen indicadores en tres niveles:

- **Por repuesto (producto)**:
  - Número de veces que el repuesto aparece en OT correctivas (frecuencia).
  - Número de órdenes de trabajo distintas en que se utiliza.
  - Costo total asociado, a partir de la suma del costo unitario registrado para cada ítem.
- **Por categoría**:
  - Frecuencia total de repuestos de la categoría.
  - Número de OT correctivas en que la categoría está presente.
  - Costo total de repuestos de la categoría.
  - Porcentaje de frecuencia y de costo respecto del total.
- **Por subsistema**:
  - Frecuencia de repuestos por subsistema.
  - Costo total de repuestos del subsistema.
  - Porcentajes de participación en términos de cantidad y costo.

Para el cálculo de costos solo se consideran los valores informados a nivel de ítem, sin prorratear ni estimar montos faltantes, de modo que los resultados reflejan únicamente información efectivamente registrada.

6.6.5. Uso de los resultados en la evaluación del modelo Volare V8L

Los indicadores obtenidos permiten identificar:

- Qué repuestos se reemplazan con mayor frecuencia.
- Qué categorías y subsistemas concentran la mayor parte del costo de repuestos.
- Si estos patrones son coherentes con los esfuerzos y condiciones esperadas en la operación subterránea (por ejemplo, desgaste elevado en neumáticos, suspensión, transmisión o sistema eléctrico).

Esta caracterización del comportamiento de fallas del Volare V8L se utiliza posteriormente para argumentar su nivel de adecuación o incompatibilidad con el ambiente de mina subterránea y para apoyar la evaluación de alternativas de equipos diseñados específicamente para este tipo de servicio.

6.7. Proyección del desempeño futuro de la flota (5 años)

6.7.1. Estimación del deterioro de confiabilidad mediante TBF históricos

Para caracterizar la evolución temporal del comportamiento de fallas de la flota, se analizó la tendencia histórica de los intervalos entre fallas (TBF, *Time Between Failures*) registrados para cada activo. La base de datos de TBF considera, para cada evento de falla, la duración del intervalo operativo previo y su fecha de ocurrencia.

En primer lugar, para cada activo se ordenaron cronológicamente sus fallas empleando la fecha de inicio del evento, construyendo así la secuencia $TBF_1, TBF_2, \ldots, TBF_n$. A partir de esta secuencia se estimó, para cada intervalo, la edad acumulada aproximada del vehículo al momento

de la falla. Esta edad se definió como la cantidad de horas de operación acumuladas hasta el centro del intervalo:

$$\text{edad}_i = \sum_{k=1}^{i} TBF_k - \frac{TBF_i}{2}. \tag{11}$$

Lo anterior permite obtener, para cada activo, un conjunto de pares (edad_i, TBF_i) que describe la evolución de los tiempos entre fallas a medida que el vehículo acumula horas de servicio.

Con el objetivo de cuantificar dicha tendencia, se ajustó para cada activo un modelo de regresión lineal simple donde la variable dependiente corresponde al logaritmo natural del TBF y la variable independiente a la edad expresada en miles de horas:

$$\log(TBF_i) = a + b \cdot \left(\frac{\text{edad}_i}{1000}\right) + \varepsilon_i. \tag{12}$$

El empleo de $\log(TBF)$ permite estabilizar la variancia de los datos y mitigar la influencia de valores extremos, habituales en series de fallas reales. La edad en miles de horas facilita la interpretación de los coeficientes y evita magnitudes numéricas excesivamente grandes. Los parámetros del modelo se estimaron mediante mínimos cuadrados ordinarios.

Una vez obtenida la pendiente b para cada activo, estas se combinaron mediante un promedio ponderado según la cantidad de TBF disponibles por vehículo, con el fin de obtener una medida representativa del comportamiento global de la flota. Este valor resume la tendencia observada en los datos históricos y constituye la base para definir un factor anual de deterioro a utilizar en la modelación de fallas futuras.

6.7.2. Modelación Weibull dependiente de edad

En el apartado de resultado 7.2 se obtuvieron, para cada vehículo de la flota, los parámetros de la distribución Weibull que representan su comportamiento de fallas durante el periodo histórico analizado. Estos parámetros corresponden a la condición real de la flota antes del 25 de octubre de 2025 y se utilizan como estado inicial del modelo de proyección.

Cada activo cuenta con un par de parámetros (η, β) ajustados individualmente. El parámetro de forma β se mantiene constante durante la proyección, ya que describe la estructura del patrón de fallas propio de cada bus. El parámetro de escala η, asociado al intervalo medio entre fallas, es el que se ajusta de manera dinámica para incorporar el deterioro de confiabilidad identificado en la sección anterior 6.7.1 a partir de los TBF históricos.

El deterioro se incorpora mediante una modificación progresiva de la escala Weibull, definiendo un valor efectivo $\eta(t)$ que varía en función de la edad del activo:

$$\eta(t) = \eta_0 \cdot (\text{factor_TBF_anual})^t, \tag{13}$$

donde η_0 es la escala estimada a partir de los datos históricos del activo, t corresponde a la edad expresada en años desde el inicio del periodo de proyección y factor_TBF_anual es el factor de deterioro obtenido mediante el análisis de los TBF históricos.

Esta formulación permite que los intervalos entre fallas simulados se vuelvan progresivamente más cortos a medida que aumenta la edad del bus, reproduciendo el comportamiento observado empíricamente en la flota. De este modo, el modelo no asume que el comportamiento futuro será estacionario, sino que incorpora de forma explícita el desgaste progresivo de los equipos.

Además, para que la proyección sea coherente con la situación real de la operación, cada

activo inicia la simulación con la edad acumulada que presenta al 25 de octubre de 2025, de acuerdo con los registros de horas de operación. De esta manera, los buses que han acumulado mayor uso ingresan al modelo en un estado más deteriorado que los vehículos incorporados más recientemente, lo que se refleja en la magnitud de sus parámetros efectivos de Weibull y en la probabilidad de falla futura que se les asigna durante la simulación.

6.7.3. Simulación Monte Carlo horaria a cinco años

La proyección del comportamiento futuro de la flota se realizó mediante un modelo de simulación Monte Carlo horaria, construido a partir de los parámetros Weibull dependientes de edad obtenidos en las secciones anteriores. El propósito de esta simulación es generar de manera estocástica la secuencia de fallas y recuperaciones de cada vehículo, para estimar el cumplimiento diario del mínimo contractual y las multas asociadas en un horizonte de cinco años.

El horizonte de proyección se discretizó en pasos horarios, considerando días de 24 horas y años de 365 días. De este modo, la simulación cubre un total de cinco años continuos de operación, lo que corresponde a 43.800 horas. Esta resolución permite capturar adecuadamente tanto la duración de los intervalos entre fallas (TBF) como los tiempos de reparación (MTTR), evitando perder eventos de corta duración que igualmente pueden afectar el cumplimiento diario del contrato.

Cada trayectoria simulada comienza utilizando como condición inicial la edad acumulada real de cada bus al 25 de octubre de 2025, medida en horas totales de operación continua. A partir de esta edad inicial se generan sucesivos ciclos de operación y falla. Para cada ciclo, el tiempo hasta la próxima falla se obtiene muestreando un TBF desde una distribución Weibull con parámetros propios de cada activo: el parámetro de forma β se mantiene fijo e igual al ajustado históricicamente, mientras que el parámetro de escala efectivo $\eta(t)$ se actualiza dinámicamente en

función de la edad del activo, utilizando el factor anual de deterioro del TBF estimado a partir de los datos históricos. Con esta formulación, los vehículos más antiguos generan TBF simulados más cortos, reflejando el desgaste progresivo observado en los registros reales.

Una vez simulado el tiempo hasta la siguiente falla, se modela un periodo de reparación fijo igual al MTTR histórico del activo. Durante este intervalo, el bus permanece indisponible. Al finalizar la reparación, el ciclo se repite generando un nuevo TBF con la edad actualizada, de modo que el proceso continuo de envejecimiento afecta directamente la duración de los ciclos futuros. La edad acumulada se incrementa tanto durante los periodos operativos como durante los periodos de reparación, de manera coherente con el hecho de que el deterioro depende del tiempo total transcurrido desde el inicio de operación del activo.

El procedimiento descrito se ejecuta de manera independiente para cada activo de la flota, generando así una matriz de disponibilidad horaria donde las filas corresponden a los vehículos y las columnas a cada una de las horas del horizonte de simulación. A partir de esta matriz se calcula, para cada hora, el número de buses operativos, lo que permite evaluar el cumplimiento diario del contrato. Para cada día del horizonte se identifica el mínimo número de equipos disponibles en cualquiera de sus 24 horas; si este mínimo es menor que el requerido (siete buses), el día se considera incumplido.

La multa diaria se calcula aplicando la regla establecida contractualmente, en función del déficit de equipos observados respecto del mínimo de siete unidades:

- Déficit de 1 bus: multa de 8 UF.
- Déficit de 2 buses: multa de 12 UF.
- Déficit de 3 o más buses: multa de 20 UF.

El déficit diario se determina como la diferencia entre los siete equipos exigidos contractualmente y el mínimo número operativos observado en ese día. La multa total en el horizonte de cinco años se obtiene sumando la multa diaria en todos los días simulados.

El esquema descrito es válido tanto para la flota actual como para los distintos escenarios con incremento de capacidad. En estos últimos, los buses adicionales se incorporan como activos nuevos con edad inicial igual a cero. Para representar su comportamiento de fallas se selecciona un subconjunto de referencia compuesto por los buses Volare más recientes de la flota actual y, a partir de ellos, se calculan valores promedio de los parámetros η, β y del MTTR. Estos promedios se utilizan como parámetros representativos para los equipos nuevos, de modo que los buses adicionales se modelan con un desempeño de confiabilidad consistente con el de los vehículos más modernos ya en operación. A partir de su incorporación, estos buses nuevos participan en la simulación bajo la misma lógica que el resto de la flota, es decir, sus TBF futuros se generan utilizando el mismo factor anual de deterioro aplicado sobre su parámetro de escala, de modo que también experimentan desgaste a medida que aumenta su edad simulada.

Para capturar la variabilidad inherente al proceso de fallas, cada escenario se simula mediante 5000 iteraciones Monte Carlo independientes, empleando distintas semillas aleatorias. A partir de estas iteraciones se obtienen valores promedio y desviaciones estándar tanto del número de días incumplidos como de la multa total acumulada en el horizonte de cinco años, lo que permite comparar de manera robusta el desempeño de los distintos escenarios de la flota.

6.7.4. Estimación de holgura operativa

Además de las multas y de los días con incumplimiento, a partir de la misma simulación Monte Carlo se estimó una medida de holgura operativa, entendida como el tiempo en que la flota

opera por sobre el mínimo contractual de siete buses disponibles.

A partir de la matriz de disponibilidad horaria generada para cada escenario, se calculó, en cada una de las 43.800 horas del horizonte de cinco años, el número total de buses operativos. Luego, se identificaron como horas con holgura aquellas en las que la flota contó con más de siete buses disponibles (es decir, al menos un bus adicional sobre el mínimo exigido). Para cada réplica de simulación se sumó el número de horas con holgura en todo el periodo, y finalmente se promedió este valor sobre las 5000 réplicas Monte Carlo de cada escenario.

De esta forma, para cada tamaño de flota se obtiene una estimación del número medio de horas en que el sistema dispone de capacidad adicional por encima del mínimo contractual, lo que sirve como indicador del margen temporal potencialmente disponible para absorber contingencias operativas o programar intervenciones sin incurrir en incumplimientos.

6.8. Evaluación económica equipos Volare

La evaluación económica compara el costo total asociado a cada escenario de flota, integrando el costo de inversión por la incorporación de buses nuevos y la multa esperada a cinco años obtenida a partir de la simulación Monte Carlo. Este análisis permite determinar qué configuración de flota presenta el menor costo esperado en el periodo restante del contrato.

El costo de inversión se estima utilizando un valor de 156.000 USD por bus Volare. Los valores en USD se convierten a pesos chilenos empleando el tipo de cambio observado al 26 de noviembre de 2025 (935,38 CLP por USD). En caso de los costos en UF se utiliza un cambio de (39.643,59 CLP por UF).

El costo por multas corresponde a la multa media proyectada en cinco años para cada es-

cenario, la cual se obtiene como el promedio de las 5000 réplicas Monte Carlo. Las desviaciones estándar reportadas en la tabla de resultados cumplen únicamente un rol descriptivo, pues representan la variabilidad del modelo, pero no se incorporan directamente en el cálculo económico. Por ello, la evaluación se basa en el valor esperado de la multa y no en sus fluctuaciones.

El costo total de cada escenario se calcula mediante:

$$\text{Costo total} = \text{Inversión en buses nuevos} + \text{Multa media proyectada a 5 años}$$

Este criterio permite comparar de manera integrada el efecto económico de aumentar la flota y de disminuir los incumplimientos contractuales. Finalmente, los costos totales de los escenarios evaluados se contrastan entre sí para identificar cuál alternativa resulta más conveniente desde un punto de vista económico.

6.9. Evaluación flota MinCa-18

El objetivo de este análisis es estimar cuántos buses MinCa-18 serían necesarios para garantizar el cumplimiento del mínimo contractual de siete unidades operativas.

Se adopta como referencia una disponibilidad individual de 0,97 para cada bus MinCa-18. Este valor corresponde a la mejor disponibilidad observada entre los buses Volare utilizados actualmente . El supuesto es que un equipo nuevo debiera presentar un comportamiento al menos tan confiable como el mejor desempeño registrado en la flota real, por lo que este valor se utiliza como una disponibilidad de diseño asignada a todos los MinCa considerados en el análisis.

Una vez fijada esta disponibilidad individual $p = 0{,}97$, se modela el número de buses operativos mediante una distribución binomial, asumiendo que cada bus MinCa puede estar operativo

o fuera de servicio de manera independiente. Bajo esta hipótesis, el número de buses operativos K en un instante cualquiera se representa como:

$$K \sim \text{Binomial}(N, p),$$

donde:

- N es el tamaño de la flota MinCa evaluada, y
- $p = 0{,}97$ es la probabilidad de que un bus esté operativo.

El criterio de diseño se basa en calcular, para distintos tamaños de flota N, la probabilidad de disponer de al menos siete buses operativos:

$$P(K \geq 7).$$

Para cada valor de N, esta probabilidad se obtiene sumando las probabilidades binomiales de los estados en que el número de buses fuera de servicio sigue permitiendo contar con siete operativos.

Repitiendo este cálculo para distintos tamaños de flota se obtiene, para cada N, la probabilidad de cumplir el mínimo de siete buses operativos. Finalmente, se compara esa probabilidad con el nivel de servicio deseado y se identifica el número mínimo de buses MinCa-18 que permite alcanzar un nivel de cumplimiento aceptable.

Adicionalmente, se incorpora un análisis económico para cada alternativa evaluada. Considerando un costo unitario estimado de 255 mil USD por cada bus MinCa-18, se calcula el costo

total de inversión asociado a cada configuración de flota. De esta forma, es posible contrastar el nivel de servicio que garantiza cada tamaño de flota con su correspondiente costo de inversión.

7. Resultados

7.1. Indicadores operativos por equipo y flota

Se presentan los resultados del cálculo de MTBF, MTTR y disponibilidad operativa para cada uno de los equipos que componen la flota Volare V8L utilizada en el servicio. Estos indicadores se obtuvieron aplicando la lógica de indisponibilidad descrita en la metodología, donde cada OT correctiva se transforma en horas efectivas de falla.

7.1.1. Resultados por equipo

En la Tabla 4 se resumen los principales indicadores obtenidos para cada activo. Se reportan el número de fallas registradas en el período de estudio, el tiempo medio entre fallas (MTBF), el tiempo medio de reparación (MTTR) y la disponibilidad calculada como $A = \frac{\text{MTBF}}{\text{MTBF}+\text{MTTR}}$.

Tabla 4: Indicadores operativos por equipo

Activo	Inicio servicio	Fin servicio	N_{fallas}	MTBF [h]	MTTR [h]	Disponibilidad
989	2023-01-04	2025-10-25	120	163.99	41.21	0.80
990	2023-01-11	2025-10-25	106	157.13	73.59	0.68
S-01	2023-01-05	2025-10-25	118	162.99	45.48	0.78
S-02	2023-01-07	2025-10-25	95	212.82	45.62	0.82
S-03	2023-03-01	2025-10-25	86	244.69	26.01	0.90
S-04	2023-03-11	2025-10-25	73	295.53	20.09	0.94
S-05	2024-01-10	2025-10-25	66	216.33	21.85	0.91
S-06	2024-01-10	2025-10-25	36	425.04	11.63	0.97
S-07	2024-01-11	2025-10-25	38	376.63	36.42	0.91

(Fuente: Elaboración propia.)

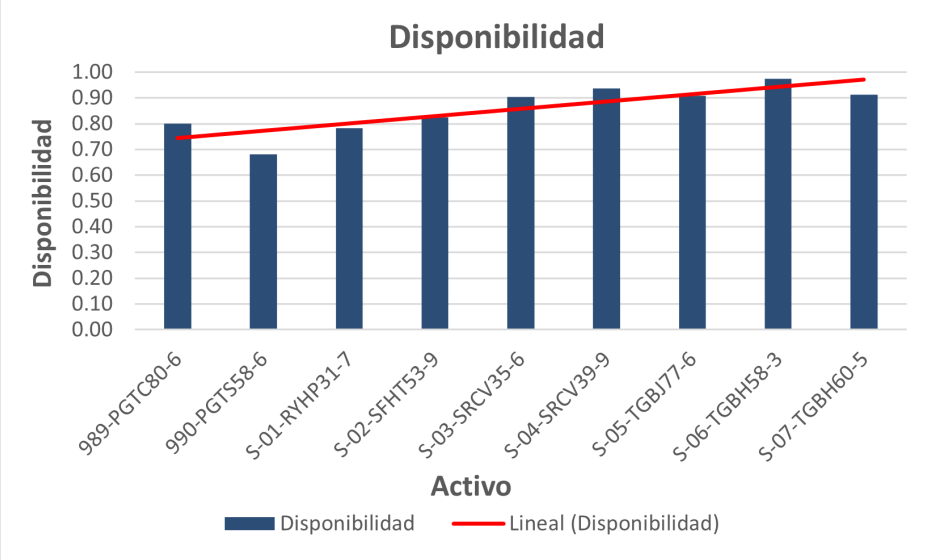


Figura 3: Disponibilidad operativa por equipo y tendencia lineal asociada.
(Fuente: Elaboración propia.)

A partir de estos resultados se observan las siguientes tendencias:

1. Los activos con menor disponibilidad son los más antiguos de la flota, en particular el 989 y el 990, cuyos valores de disponibilidad son 0,80 y 0,68 respectivamente.

2. Los mejores desempeños corresponden a los equipos incorporados más recientemente (S-05, S-06 y S-07), que presentan disponibilidades superiores a 0,90. En particular, el equipo S-06 alcanza una disponibilidad cercana a 0,97, asociada a un MTBF elevado y un MTTR reducido.

3. El activo 990 destaca como el equipo más crítico de la flota, con la menor disponibilidad (0,68) y un MTTR significativamente mayor que el resto, efecto influenciado por la avería mayor que lo mantiene fuera de servicio al final del período de análisis.

7.1.2. Resultados agregados para la flota

A nivel agregado, considerando la totalidad de las OT correctivas del período analizado, se obtienen los siguientes indicadores globales de la flota:

- MTBF flota: 219,91 h.
- MTTR flota: 39,83 h.
- Disponibilidad operativa de la flota: 0,8467.

Estos valores son coherentes con el comportamiento observado a nivel de equipo, donde algunos activos presentan un desempeño cercano al 90–95 % de disponibilidad, mientras otros concentran una proporción importante de las horas de falla. En conjunto, la flota alcanza una disponibilidad del orden de 84,7 %, lo que resulta consistente con la frecuencia de fallas registrada y con la duración de las reparaciones bajo el esquema de trabajo del taller.

7.2. Resultados del ajuste Weibull y confiabilidad

En esta sección se presentan los resultados obtenidos al ajustar una distribución Weibull de dos parámetros a los tiempos entre fallas (TBF) de cada equipo. La siguiente Tabla 5 resume para cada activo, el número de intervalos entre fallas utilizados en el ajuste, los parámetros de la distribución y la confiabilidad calculada para horizontes de 24 y 168 horas.

Tabla 5: Parámetros Weibull y confiabilidad por equipo.

Activo	n_{TBF}	η [h]	β	$R(24\text{h})$	$R(168\text{h})$
989	116	223.20	1.14	0.92	0.49
990	104	223.12	1.36	0.95	0.51
S-01	114	235.31	1.38	0.96	0.53
S-02	89	290.45	1.16	0.95	0.59
S-03	80	293.10	1.07	0.93	0.58
S-04	71	315.77	1.00	0.93	0.59
S-05	62	268.01	1.21	0.95	0.57
S-06	34	425.74	0.88	0.92	0.64
S-07	36	451.30	1.10	0.96	0.71

(Fuente: Elaboración propia.)

En la tabla:

- n_{TBF}: Corresponde al número de intervalos entre fallas utilizados en el ajuste.
- η: Es el parámetro de escala (tiempo característico entre fallas).
- β: Es el parámetro de forma.
- $R(24\text{h})$: la confiabilidad de operar sin fallar durante 24 hrs.
- $R(168\text{h})$: la confiabilidad de operar sin fallar durante 168 hrs.

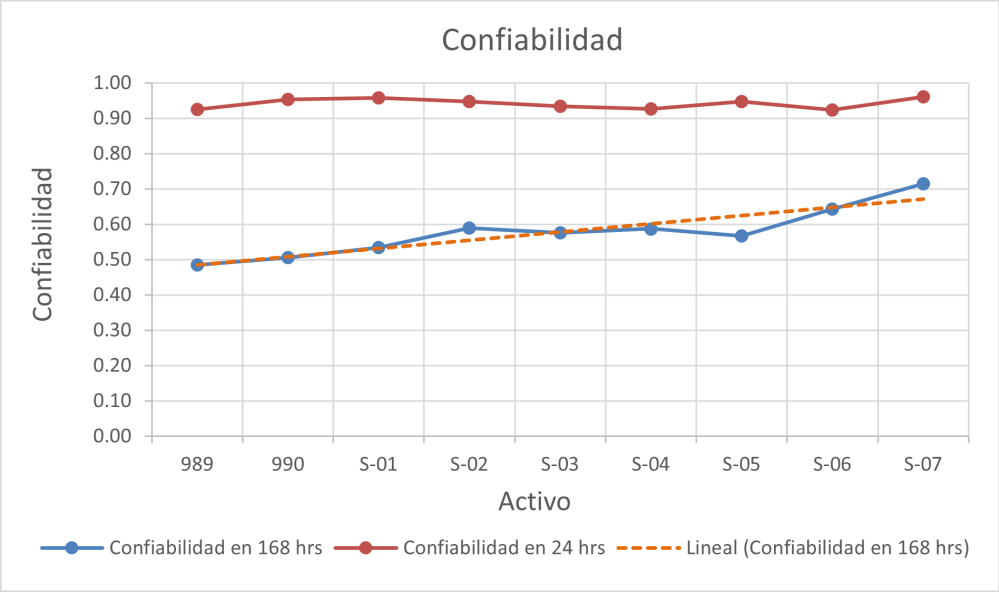


Figura 4: Confiabilidad en 24 y 168 horas.
(Fuente: Elaboración propia.)

7.2.1. Comportamiento general de los tiempos entre fallas

En base a los tiempos entre fallas obtenidos se observa:

- Los equipo más antiguos (989, 990, S-01, S-02, S-03 y S-04) presentan entre 71 y 116 TBF, lo que refleja una base de datos amplia para el ajuste.
- Los equipos incorporados en 2024 (S-05, S-06 y S-07) registran un menor número de intervalos (entre 34 y 62 TBF), por lo que sus parámetros son más sensibles a variaciones, aunque siguen permitiendo un ajuste razonable.

7.2.2. Parámetro de escala η: tiempo característico entre fallas

De acuerdo con este parámetro, se deduce lo siguiente:

- Los equipos 989 y 990 presentan valores de η cercanos a 223 h, lo que indica que sus fallas tienden a ocurrir con mayor frecuencia que en el resto de la flota.

- Los buses S-01 a S-05 exhiben valores de η entre aproximadamente 235 y 315 h, es decir, tiempos característicos de falla más altos.

- Los equipos S-06 y S-07 destacan con los mayores valores de η (425,74 h y 451,30 h respectivamente), lo que sugiere que, en promedio, tardan más tiempo en fallar que el resto de los vehículos.

7.2.3. Parámetro de forma β: tipo de comportamiento de fallas

El parámetro de forma β permite clasificar el tipo de comportamiento de fallas:

- $\beta < 1$: fallas de rodaje (riesgo decreciente).

- $\beta = 1$: comportamiento aproximadamente exponencial (fallas aleatorias).

- $\beta > 1$: desgaste (riesgo creciente).

En la Tabla 5 se observa que la mayoría de los equipos presenta valores de β entre 1,07 y 1,38, es decir, un comportamiento de desgaste creciente. Ejemplos claros de este patrón son los activos 989 ($\beta = 1{,}14$), 990 ($\beta = 1{,}36$), S-01 ($\beta = 1{,}38$) y S-05 ($\beta = 1{,}21$). El Activo S-04 presenta $\beta = 1{,}00$, lo que corresponde prácticamente a un comportamiento exponencial.

El caso particular es el equipo S-06, con $\beta = 0{,}88$, que indica la presencia de fallas infantiles, donde el riesgo de falla es mayor al inicio y tiende a disminuir a medida que el equipo acumula horas de operación.

En términos generales, la flota opera mayoritariamente bajo un régimen de desgaste ($\beta > 1$), con la excepción de S-06, que se encuentra en una etapa más temprana de su curva de vida.

7.2.4. Confiabilidad diaria y semanal

La confiabilidad diaria $R(24\text{h})$ es elevada para todos los equipos, con valores entre 0,92 y 0,96. Esto implica que, en un horizonte de un día de operación, la probabilidad de que un bus funcione sin fallar es superior al 90 % en todos los casos, y las diferencias entre activos no son tan marcadas en este horizonte corto.

En cambio, la confiabilidad semanal $R(168\text{h})$ evidencia diferencias más claras entre equipos. Los valores oscilan entre 0,49 y 0,71. Los buses 989 y 990 presentan las menores confiabilidades semanales, con $R(168\text{h}) = 0{,}49$ y $0{,}51$ respectivamente, lo que implica probabilidades cercanas al 50 % de fallar en una semana de operación continua. En el extremo opuesto, el equipo S-07 alcanza la mayor confiabilidad semanal ($R(168\text{h}) = 0{,}71$), seguido de S-06 ($R(168\text{h}) = 0{,}64$), reflejando un comportamiento más robusto.

7.2.5. Interpretación conjunta de los parámetros

La lectura conjunta de η, β y $R(t)$ permite extraer varias conclusiones:

- Los equipos más antiguos (989 y 990) combinan valores relativamente bajos de η con $\beta > 1$ y confiabilidades semanales reducidas, lo que indica tiempos entre fallas menores y un claro efecto de desgaste.
- Los vehículos incorporados en 2024 (S-05, S-06 y S-07) exhiben mayores valores de η y mejores confiabilidades semanales, lo que sugiere un comportamiento más favorable desde el punto de vista de la confiabilidad. En particular, S-07 presenta el mejor desempeño en términos de $R(168\text{h})$.

- El caso de S-06, con $\beta < 1$, sugiere que el equipo aún se encuentra en una fase de fallas tempranas, pero con un tiempo característico entre fallas elevado, lo que se traduce igualmente en buena confiabilidad semanal.

Estos resultados son coherentes con los indicadores de disponibilidad calculados en la sección anterior y refuerzan que los vehículos más antiguos ejercen una presión significativa sobre la confiabilidad global de la flota, mientras que los equipos más recientes presentan un comportamiento claramente más favorable. Sin embargo, el hecho de que la mayoría de los activos presenten valores de $\beta > 1$ indicativos de un régimen dominado por el desgaste sugiere que incluso los equipos más nuevos evolucionarán hacia un aumento progresivo en la tasa de fallas. Este patrón constituye un aspecto crítico a considerar al evaluar la eventual incorporación de equipos diseñados específicamente para operación en mina subterránea, cuyo diseño y componentes podrían ofrecer un comportamiento de desgaste más controlado bajo las condiciones del ambiente operativo.

7.3. Disponibilidad diaria y cumplimiento del mínimo contractual

Con los resultados obtenidos en la reconstrucción diaria del estado operativo de cada equipo, permitió determinar cuántos equipos estuvieron disponibles por día y evaluar el cumplimiento del requisito contractual de mantener un mínimo de siete equipos desde el 11-01-2024.

7.3.1. Resumen mensual de incumplimientos y déficit máximo diario

En la Tabla 6 se resume, para cada mes, el número de días en que la flota no alcanzó el mínimo de siete equipos operativos y el déficit máximo registrado en el día más crítico de cada mes.

Tabla 6: Días de incumplimiento y déficit máximo diario por mes.

Año–Mes	Días incumplidos	Déficit máximo diario
2024-01	3	3
2024-02	6	4
2024-03	13	3
2024-04	5	3
2024-05	2	1
2024-06	2	3
2024-07	1	1
2024-08	3	1
2024-09	2	2
2024-10	6	3
2024-11	8	2
2024-12	5	2
2025-01	6	3
2025-02	2	2
2025-03	15	4
2025-04	13	2
2025-05	5	1
2025-06	16	4
2025-07	18	3
2025-08	12	3
2025-09	8	3
2025-10	14	3

(Fuente: Elaboración propia.)

7.3.2. Días incumplidos por mes

En la Figura 5 se muestra la evolución mensual de los días incumplidos, junto con una línea de tendencia que permite visualizar el comportamiento general del período.

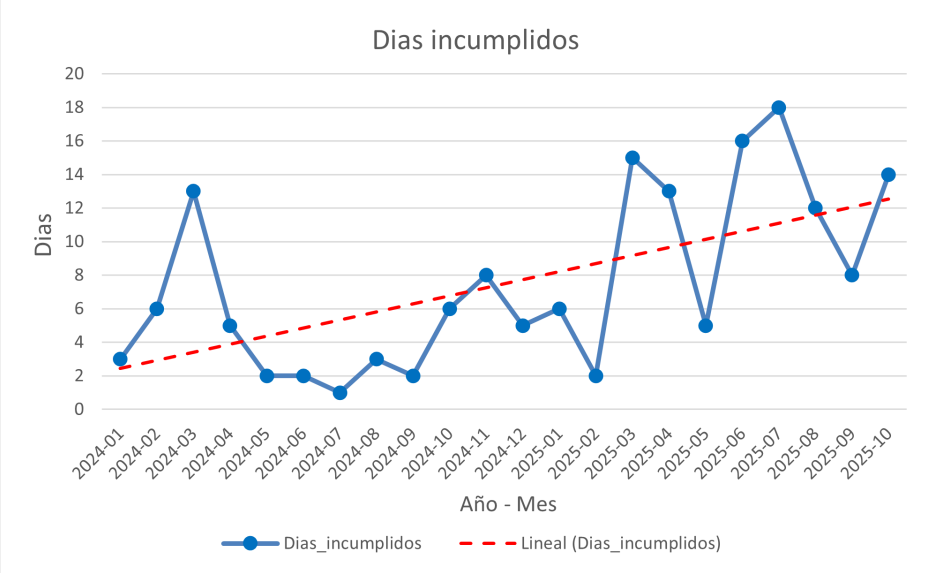


Figura 5: Días incumplidos por mes y tendencia asociada.
(Fuente: Elaboración propia.)

Los resultados indican que durante 2024 los incumplimientos fluctúan entre 1 y 13 días por mes, mientras que en 2025 se observa un aumento sostenido, con meses particularmente críticos como marzo, junio, julio y octubre, donde el número de días incumplidos supera los 14 días.

7.3.3. Déficit máximo diario por mes

La Figura 6 presenta el déficit máximo diario registrado en cada mes, definido como la diferencia entre el mínimo contractual (7 equipos) y el número mínimo de equipos operativos en el peor día del mes.

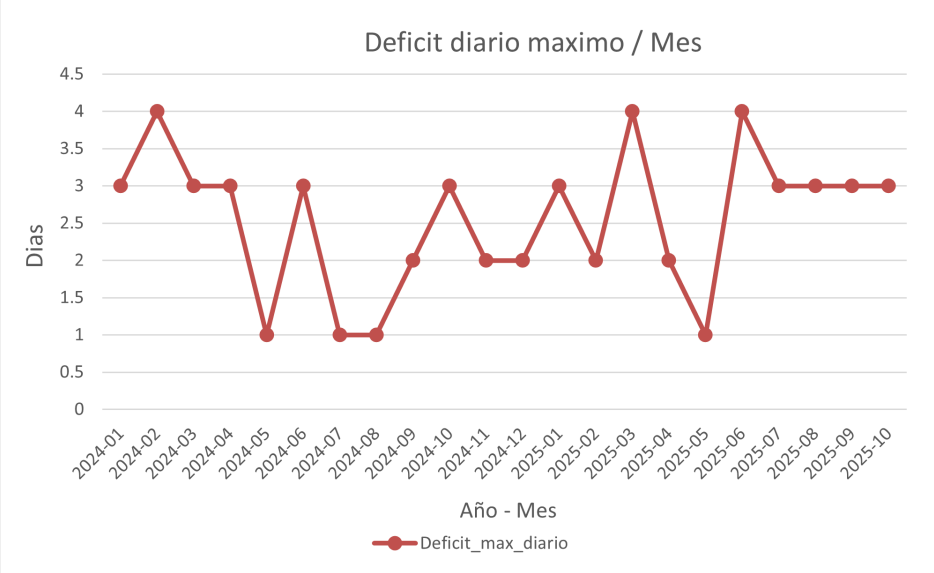


Figura 6: Déficit máximo diario registrado por mes.
(Fuente: Elaboración propia.)

El déficit mensual se mantiene entre uno y cuatro equipos durante todo el período analizado. Los meses con déficit máximo igual a cuatro como febrero 2024, marzo 2025, junio 2025 y julio 2025 revelan escenarios operacionales en los cuales la flota estuvo considerablemente por debajo de la capacidad necesaria para cumplir el contrato.

7.3.4. Identificación de meses críticos

De acuerdo con los resultados presentados, los meses más críticos del período son:

- **2025-03**: 15 días incumplidos y déficit máximo de 4 buses.
- **2025-06**: 16 días incumplidos y déficit máximo de 4 buses.
- **2025-07**: 18 días incumplidos y déficit máximo de 3 buses.
- **2025-10**: 14 días incumplidos y déficit máximo de 3 buses.

Estos meses coinciden con una mayor concentración de fallas, tiempos de reparación prolongados y, especialmente, con la no disponibilidad del activo 990 a partir de junio de 2025.

7.3.5. Implicancias operativas

Los resultados permiten concluir que:

- La flota presenta una tendencia decreciente en su capacidad de cumplir el mínimo contractual a lo largo del período.
- Existen meses con insuficiencia marcada, donde incluso operando todos los demás equipos disponibles el servicio no logra alcanzar los siete equipos requeridos.
- El déficit máximo mensual, situado entre 2 y 4 buses en la mayoría de los meses críticos, constituye un insumo clave para la evaluación de la capacidad mínima necesaria y para el análisis de escenarios con equipos adecuados a la operación.

7.4. Resultados del análisis de componentes y repuestos críticos

En esta sección se presenta el comportamiento de fallas y consumo de repuestos del modelo Volare V8L, a partir de las órdenes de trabajo correctivas y de los repuestos utilizados en el período comprendido entre el 04-01-2023 y el 25-10-2025. El análisis se realiza a nivel de categoría y subsistema, considerando únicamente los nueve activos Volare V8L de la flota del servicio.

7.4.1. Distribución de fallas y costos por categoría

La Tabla 7 resume la distribución de fallas y costos de repuestos por categoría funcional del vehículo.

Tabla 7: Distribución de fallas y costos de repuestos por categoría.

Categoría	Costo total [$]	% de fallas	% del costo
Transmisión	15 069 246	8,16 %	22,96 %
Neumáticos	12 707 674	10,94 %	19,36 %
Motor	6 765 514	13,53 %	10,31 %
Sistema eléctrico	6 307 125	10,47 %	9,61 %
Ejes	5 487 694	19,65 %	8,36 %
Otros	5 314 361	8,25 %	8,10 %
Climatización	4 409 712	3,24 %	6,72 %
Frenos	3 276 161	8,43 %	4,99 %
Suspensión	3 006 650	7,51 %	4,58 %
Dirección	2 129 696	2,87 %	3,24 %
Interior	1 171 971	6,95 %	1,79 %

(Fuente: Elaboración propia.)

Los resultados muestran que las fallas y los costos de repuestos no se distribuyen de manera homogénea entre todas las categorías. La **transmisión** representa solo el 8,16 % de la cantidad de fallas, pero concentra el 22,96 % del costo total de repuestos, lo que indica que, si bien no es la categoría más frecuente, sus intervenciones son particularmente costosas. Algo similar ocurre con los **neumáticos**, que aportan el 10,94 % de las fallas y el 19,36 % del costo total, reflejando un desgaste elevado del rodado.

Las categorías **motor**, **sistema eléctrico** y **ejes** presentan participaciones importantes tanto en frecuencia como en costo: el motor acumula un 13,53 % de las fallas y un 10,31 % del costo, el sistema eléctrico un 10,47 % y 9,61 %, y los ejes lideran en frecuencia con un 19,65 % de las fallas, concentrando un 8,36 % del costo. Otros sistemas como frenos, suspensión, climatización y dirección también muestran contribuciones no despreciables.

En conjunto, transmisión, neumáticos, motor, sistema eléctrico y ejes concentran una fracción significativa de las fallas y más del 70 % del costo de repuestos, lo que es consistente con un uso del Volare V8L en un entorno de operación exigente. Estos sistemas son precisamente los que

más se ven afectados por caminos irregulares, pendientes pronunciadas, maniobras frecuentes y condiciones ambientales agresivas típicas de la mina subterránea.

La Figura 7 muestra la proporción de fallas por categoría, mientras que la Figura 8 presenta la proporción de costos de repuestos por categoría, reforzando la concentración en los sistemas mencionados.

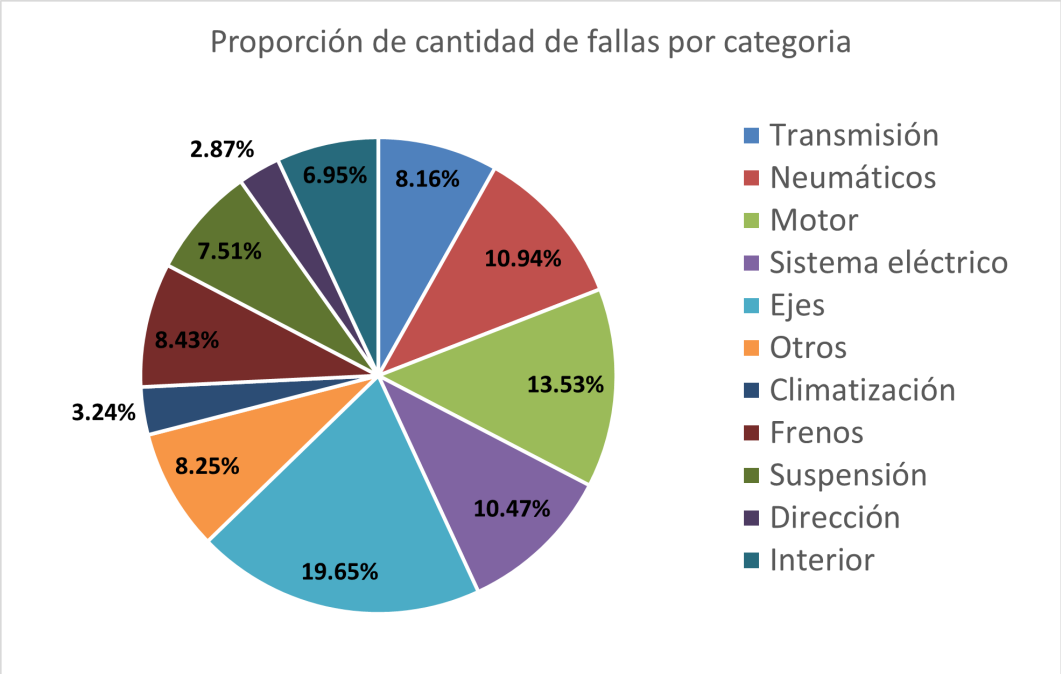


Figura 7: Proporción de cantidad de fallas por categoría.
(Fuente: Elaboración propia.)

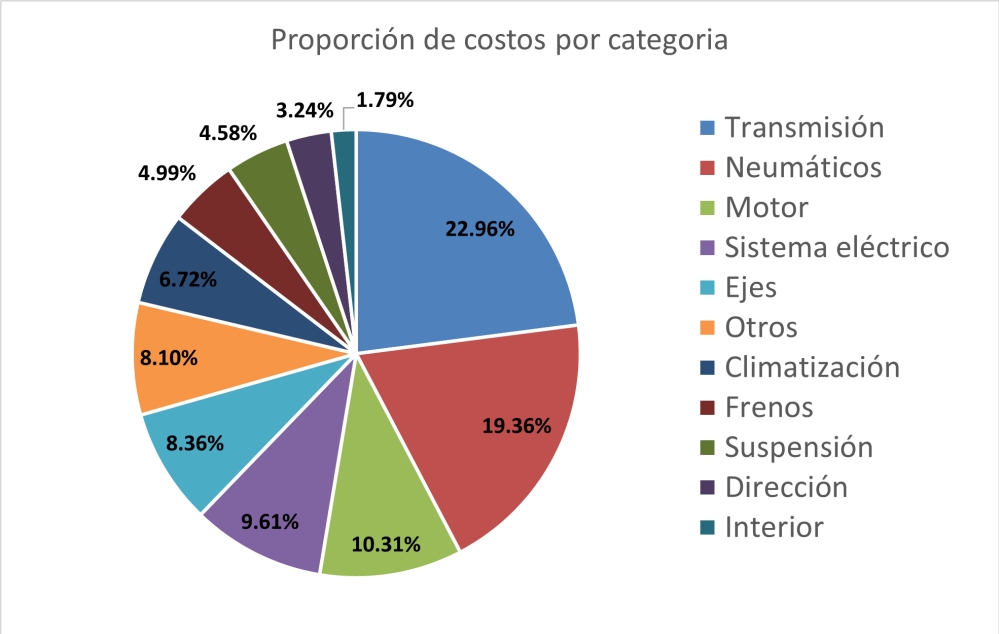


Figura 8: Proporción de costos de repuestos por categoría.
(Fuente: Elaboración propia.)

7.4.2. Distribución de fallas y costos por subsistema

La Tabla 8 detalla la distribución de fallas y costos a nivel de subsistema.

Tabla 8: Distribución de fallas y costos de repuestos por subsistema.

Subsistema	Costo total [$]	% de fallas	% del costo
Neumáticos	12 707 674	10,94 %	19,36 %
Kit Embrague	8 581 889	4,45 %	13,07 %
Baterías	4 696 722	1,20 %	7,15 %
Sistema de tracción	4 663 122	1,39 %	7,10 %
Climatización	4 409 712	3,24 %	6,72 %
Frenos	3 276 161	8,43 %	4,99 %
Suspensión	3 006 650	7,51 %	4,58 %
Dirección	2 129 696	2,87 %	3,24 %
Rodamiento de maza	1 917 518	5,38 %	2,92 %
Retén de maza	1 817 096	7,69 %	2,77 %
Alternador	1 522 213	3,06 %	2,32 %
Caja de cambios	1 120 197	0,93 %	1,71 %
Implementación	836 802	3,71 %	1,27 %
Restante de subsistemas menos relevantes	14 636 676	37,53 %	22,30 %

(Fuente: Elaboración propia.)

A nivel de subsistema, los **neumáticos** vuelven a destacar, concentrando un 10,94 % de las fallas y un 19,36 % del costo total de repuestos. El **kit de embrague** presenta una frecuencia moderada (4,45 % de las fallas), pero un 13,07 % del costo total, lo que refleja intervenciones de alto valor económico. Los subsistemas **baterías** y **sistema de tracción** también muestran participaciones relevantes en costo (7,15 % y 7,10 %, respectivamente), a pesar de su baja frecuencia relativa.

Por su parte, los sistemas de **frenos**, **suspensión** y **dirección** acumulan entre 2,87 % y 8,43 % de las fallas y entre 3,24 % y 4,99 % del costo, reforzando la idea de que el chasis y el tren de rodaje operan en condiciones severas.

La Figura 9 muestra la proporción de fallas por subsistema, mientras que la Figura 10 ilustra la distribución de costos, destacando el peso relativo de neumáticos, kit de embrague, sistema de tracción y baterías.

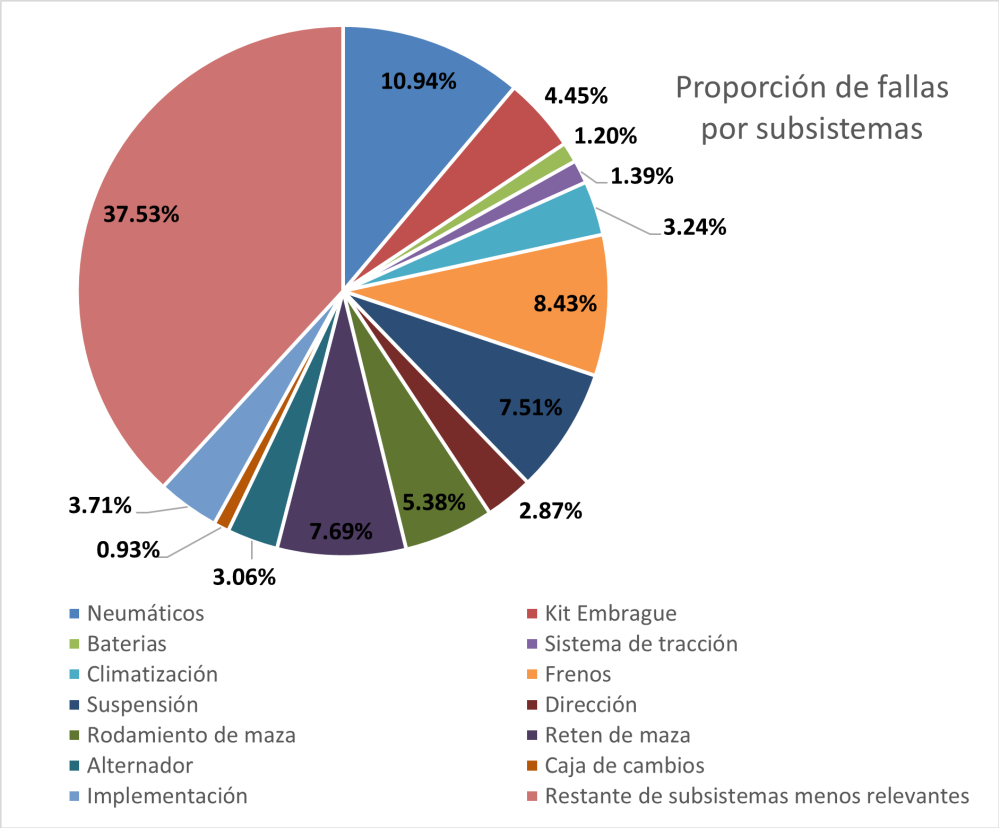


Figura 9: Proporción de fallas por subsistema.

(Fuente: Elaboración propia.)

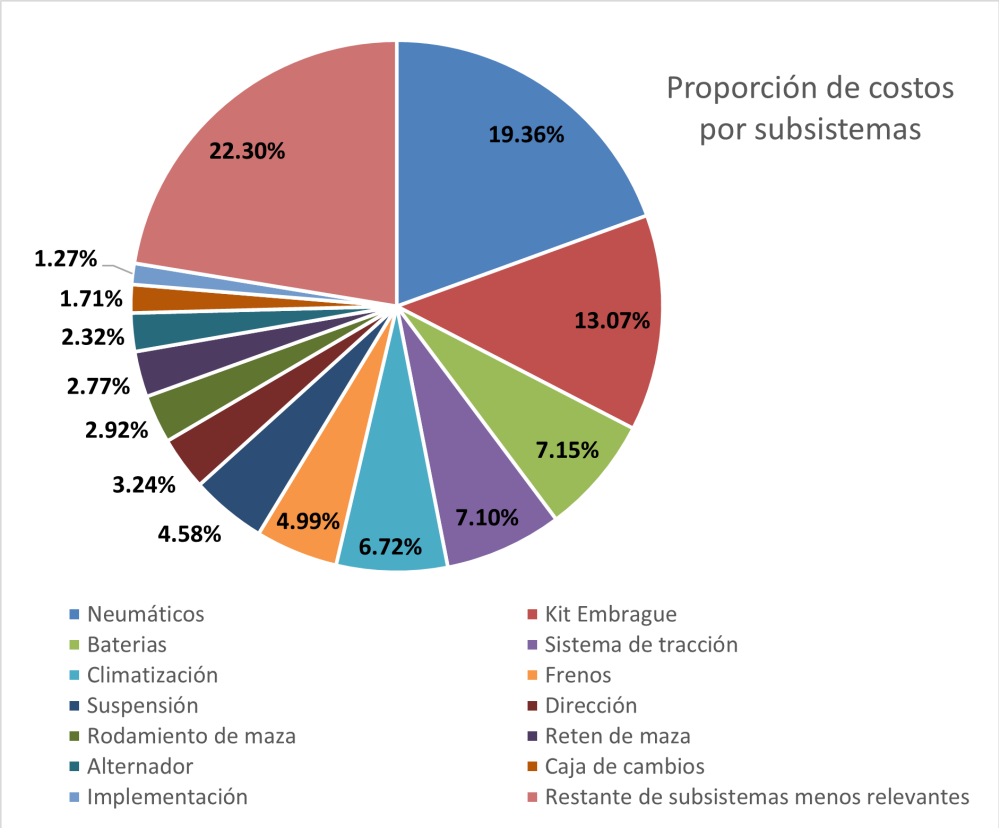


Figura 10: Proporción de costos de repuestos por subsistema.
(Fuente: Elaboración propia.)

7.4.3. Interpretación conjunta

Considerando los resultados por categoría y por subsistema, se observa un patrón claro: el rodado (neumáticos, ejes, rodamientos y retenes de maza) y los sistemas de transmisión y embrague concentran una fracción significativa de las fallas y del costo de repuestos. Además, el sistema eléctrico, las baterías y la climatización también absorben una proporción importante del gasto en repuestos.

Este comportamiento es coherente con la operación del Volare V8L en un entorno de mina subterránea, caracterizado por caminos irregulares, pendientes pronunciadas, maniobras frecuentes, polvo y humedad. En conjunto, los resultados indican que el modelo, diseñado originalmente

para aplicaciones urbanas o de carretera, está sometido a un nivel de exigencia superior al previsto en su concepción, lo que se traduce en:

- Desgaste acelerado en componentes de rodado y transmisión.
- Altos costos de reposición de neumáticos y kit de embrague.
- Mayor demanda sobre sistemas eléctricos y auxiliares.

Esta evidencia respalda la hipótesis de que el Volare V8L no es plenamente adecuado para las condiciones de operación de mina subterránea, y sirve como base para la evaluación posterior de alternativas de buses diseñados específicamente para este tipo de servicio o la implementación de mejoras en su diseño.

7.5. Resultados de la proyección del desempeño futuro de la flota (5 años)

7.5.1. Resultados de la estimación del deterioro de confiabilidad

A partir del ajuste de la regresión lineal descrita previamente, se obtuvo una pendiente b para cada uno de los activos de la flota, la cual refleja cómo evoluciona el intervalo entre fallas a medida que el equipo acumula horas de operación. En la Figura 11 se resumen estos resultados.

Se observa que la mayoría de los vehículos presenta pendientes negativas, lo que indica que sus tiempos entre fallas tienden a disminuir a medida que aumenta la edad. Este efecto es particularmente marcado en los buses S-02 y S-05, mientras que en algunos de los activos más nuevos, como S-06 y S-07. En conjunto, el patrón observado es consistente con un proceso de desgaste progresivo de la flota.

A partir de la pendiente promedio ponderada, se calculó un factor anual de deterioro sobre el TBF esperado. La Figura 12 muestra la evolución relativa del TBF esperado en función de la edad, normalizada respecto al valor inicial. Se aprecia que, bajo el modelo adoptado, el TBF esperado se reduce de manera gradual con los años de operación, alcanzando del orden de un 70 % del valor inicial al cabo de cinco años. Este resultado respalda la inclusión explícita del deterioro de confiabilidad en la proyección de disponibilidad y multas para el horizonte de cinco años considerado en este estudio.

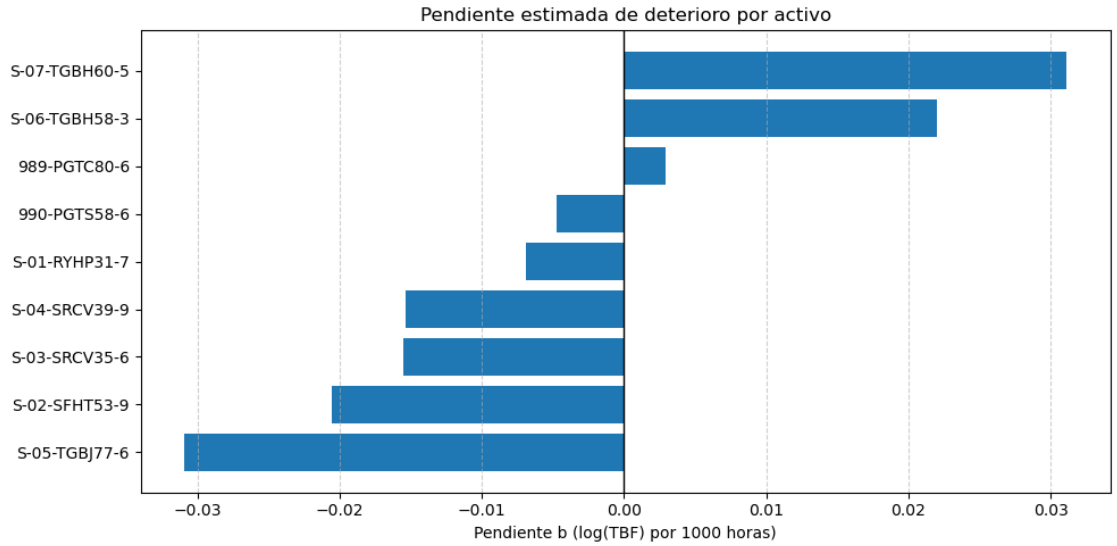


Figura 11: Pendiente estimada de deterioro del TBF en función de la edad para cada activo de la flota.

(Fuente: Elaboración propia.)

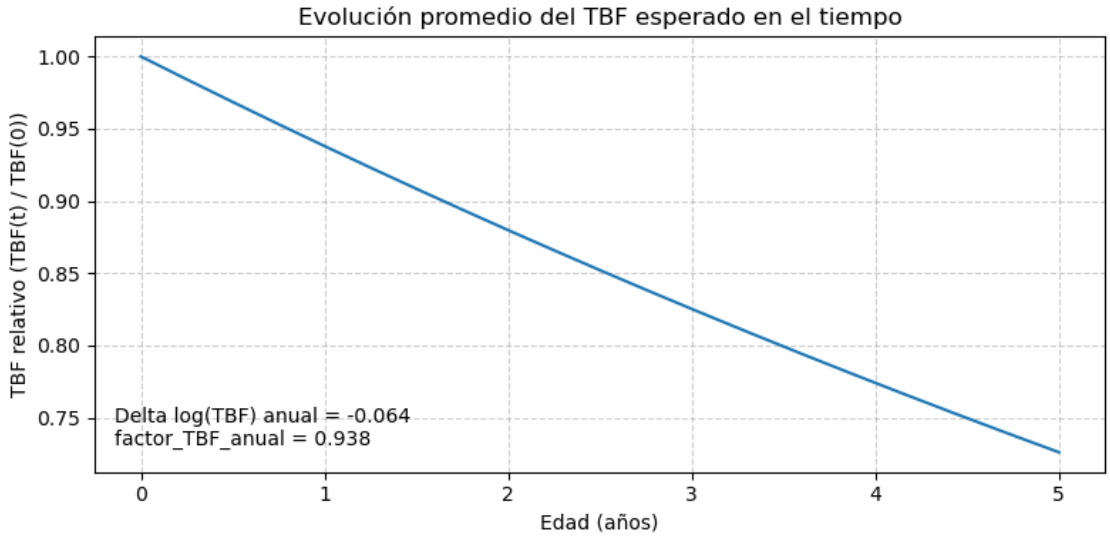


Figura 12: Evolución relativa del TBF esperado en el tiempo a partir de la pendiente promedio estimada.

(Fuente: Elaboración propia.)

7.5.2. Resultados de la proyección Monte Carlo a cinco años

A continuación se presenta el comportamiento de la flota en un horizonte de cinco años, considerando escenarios con distinto número de buses Volare adicionales. Para cada escenario se ejecutaron 5000 réplicas independientes del modelo de fallas y reparaciones, registrando la multa total acumulada en el periodo y el número de días en que el sistema no alcanzó el mínimo contractual de siete buses operativos. La Tabla 9 resume los resultados obtenidos.

Tabla 9: Resultados de la simulación Monte Carlo a cinco años para distintos tamaños de flota.

Buses extra	Total buses	Multa media [UF]	Desv. estándar [UF]	Días inc. medios	Desv. estándar [días]
0	9	5482.3	257.7	565.6	24.4
1	10	1731.8	157.6	191.4	16.4
2	11	400.3	72.7	46.1	8.1
3	12	70.5	29.3	8.3	3.4
4	13	9.4	10.4	1.1	1.2

(Fuente: Elaboración propia.)

En el escenario base, correspondiente a la situación actual con 9 buses, la multa esperada

acumulada en cinco años alcanza aproximadamente 5482 UF, con una desviación estándar cercana a 258 UF. En este mismo horizonte se proyecta en promedio 566 días con algún tipo de incumplimiento del mínimo contractual, lo que implica que alrededor de un tercio de los días del periodo analizado presenta al menos una hora con menos de siete buses disponibles.

Al incorporar un bus adicional (10 buses en total), la multa media proyectada disminuye aproximadamente a 1732 UF, lo que representa una reducción cercana al 68 % respecto del escenario base. De forma consistente, el número medio de días con incumplimiento baja desde aproximadamente 566 a 191 días en cinco años, es decir, una reducción del orden del 66 %. Esto indica que la primera unidad adicional tiene un impacto muy significativo sobre el nivel de riesgo de multa y la frecuencia con que la flota cae por debajo del mínimo exigido.

Con dos buses adicionales (11 en total), la multa esperada se reduce a aproximadamente 400 UF en cinco años, lo que equivale a una disminución cercana al 93 % en comparación con el escenario base. En este caso, el número de días con algún incumplimiento cae a alrededor de 46 días en todo el periodo, de modo que los episodios de déficit pasan a ser eventos poco frecuentes.

Los escenarios con 12 y 13 buses muestran multas prácticamente residuales en el horizonte de cinco años. Para 12 buses, la multa media se sitúa en torno a 71 UF, asociada a un promedio de aproximadamente 8 días con algún incumplimiento. Con 13 buses, la multa baja a cerca de 9 UF, con poco más de 1 día de incumplimiento en cinco años. Estos resultados sugieren que, a partir de cierto tamaño de flota, el efecto marginal de agregar buses adicionales sobre la reducción de multa y de días con déficit se vuelve cada vez menor, dado que el sistema opera la gran mayoría del tiempo sobre el mínimo contractual.

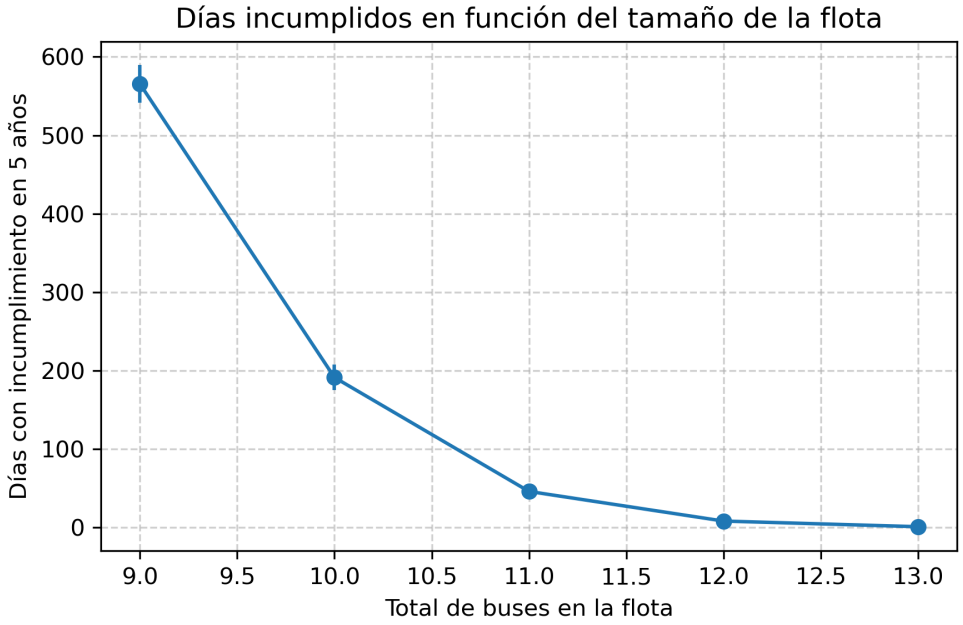


Figura 13: Días con incumplimiento del mínimo contractual proyectados en cinco años en función del tamaño de la flota.

(Fuente: Elaboración propia.)

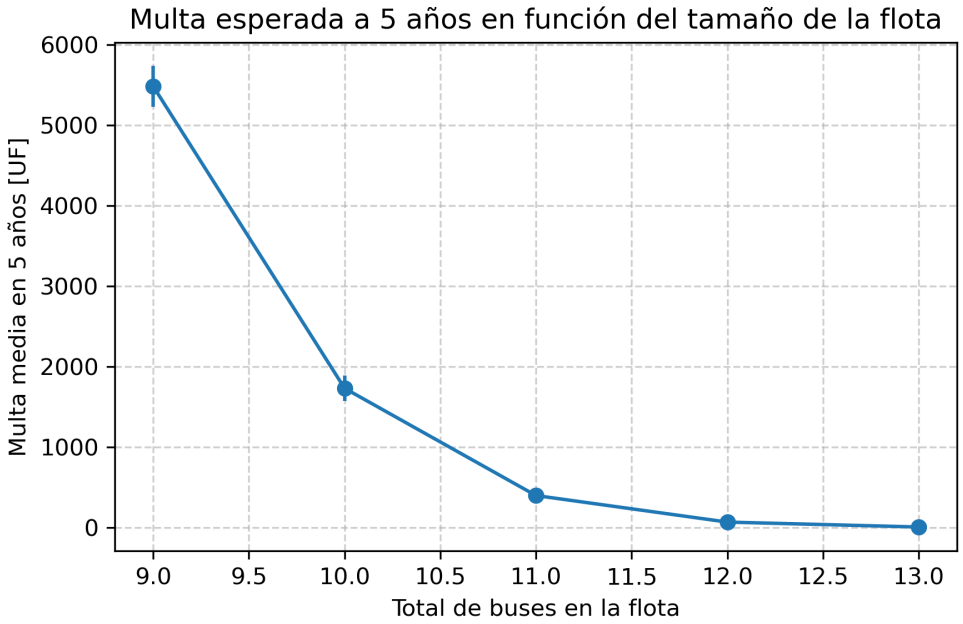


Figura 14: Multa media proyectada a cinco años en función del tamaño de la flota.

(Fuente: Elaboración propia.)

7.5.3. Resultados de holgura operativa

Se evaluó cómo varía la holgura operativa del sistema al incorporar buses adicionales. La Tabla 10 resume los resultados obtenidos para el horizonte de cinco años.

Tabla 10: Horas con holgura en el horizonte de cinco años según número de buses adicionales.

Buses extra	Total buses	Horas con holgura	% del horizonte	Incremento vs. anterior
0	9	25350.1	57.9	–
1	10	37008.0	84.5	11657.9
2	11	42027.3	96.0	5019.4
3	12	43456.9	99.2	1429.5
4	13	43748.6	99.9	291.8

(Fuente: Elaboración propia.)

En el escenario base, correspondiente a la operación actual con 9 buses, la flota dispone de holgura en aproximadamente 25350 horas del horizonte de cinco años, lo que equivale a cerca de un 58 % de las 43800 horas simuladas. Esto implica que el sistema presenta un número elevado de días con algún episodio de déficit.

Al incorporar un bus adicional (10 buses en total), las horas con holgura aumentan a cerca de 37008, correspondientes a aproximadamente un 84,5 % del horizonte. Este aumento representa un incremento del orden de 11658 horas respecto del escenario base, lo que confirma que la primera unidad adicional tiene un impacto especialmente relevante en la capacidad de operar por sobre el mínimo contractual.

Con la adición de un segundo bus extra (11 buses), la holgura asciende a aproximadamente 42027 horas, equivalentes a cerca de un 96 % del horizonte. Si bien el aumento respecto del escenario anterior sigue siendo significativo (en torno a 5019 horas), se observa ya una tendencia a rendimientos decrecientes en términos del beneficio adicional obtenido por cada nueva unidad incorporada.

Los escenarios con 12 y 13 buses evidencian prácticamente una completa holgura a lo largo del horizonte simulado, con aproximadamente un 99,2 % y un 99,9 % de las horas cubiertas. Los incrementos marginales de 1430 y 292 horas indican que, a partir de este punto, el agregar unidades adicionales reduce muy poco, dado que se opera casi siempre por encima del mínimo requerido.

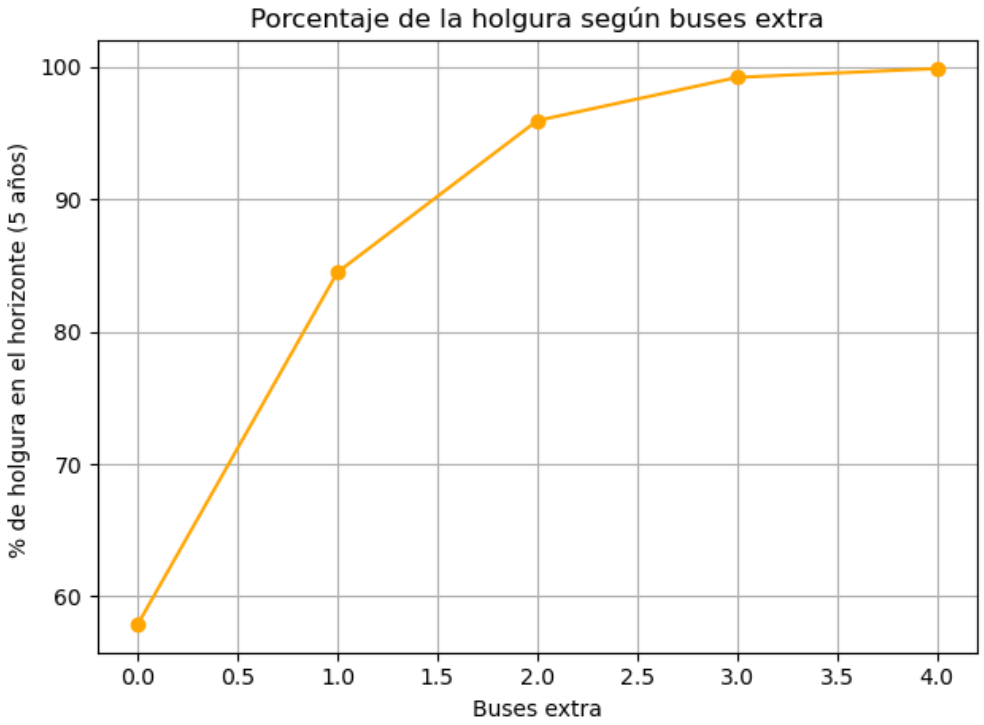


Figura 15: Porcentaje de holgura proyectado en cinco años en función del número de buses extra.
(Fuente: Elaboración propia.)

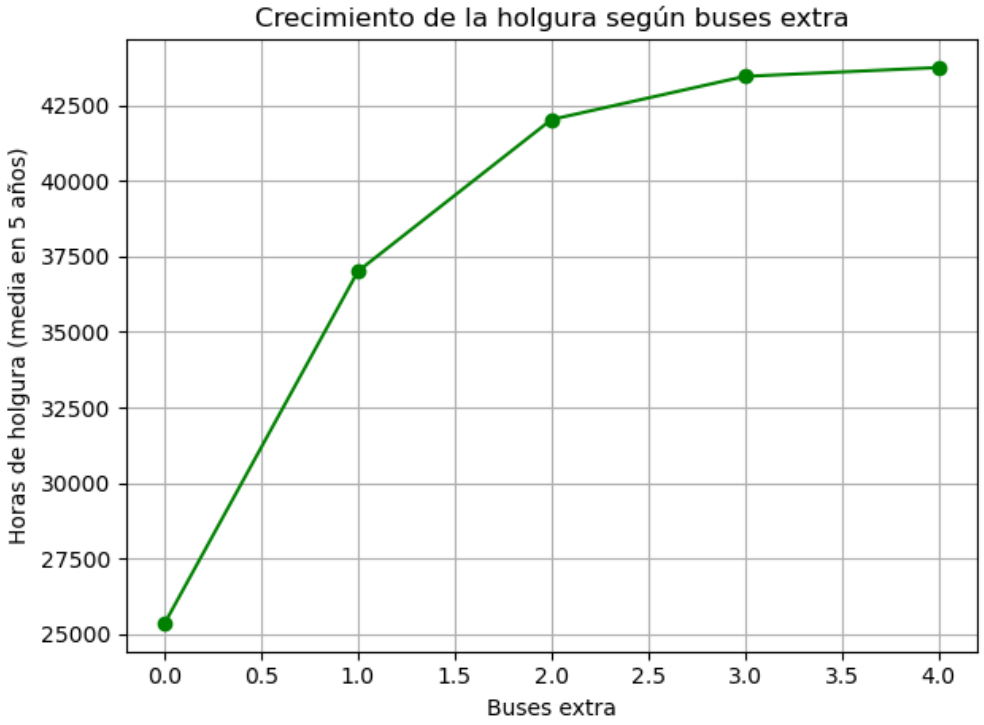


Figura 16: holguras proyectadas en cinco años según el número de buses extra.
(Fuente: Elaboración propia.)

7.6. Resultados de la evaluación económica equipos Volare

En la Tabla 11 se resumen los resultados económicos obtenidos para los distintos escenarios de refuerzo de la flota Volare en un horizonte de cinco años, considerando tanto el costo esperado en multas como la inversión asociada a la incorporación de buses adicionales.

Tabla 11: Evaluación económica de los escenarios de refuerzo de flota Volare en un horizonte de cinco años.

Buses extra	Total buses	Multa [CLP]	Inversión [CLP]	Costo total [CLP]	Diferencia caso base [CLP]
0	9	$217,338,053	$0	$217,338,053	–
1	10	$68,654,769	$145,919,280	$214,574,049	$2,764,004
2	11	$15,869,329	$291,838,560	$307,707,889	-$90,369,836
3	12	$2,794,873	$437,757,840	$440,552,713	-$223,214,660
4	13	$372,650	$583,677,120	$584,049,770	-$366,711,716

(Fuente: Elaboración propia.)

El escenario base con 9 buses Volare implica, en el horizonte de cinco años, un costo en

multas de 217 millones de CLP, sin inversión adicional en flota. Al incorporar un décimo bus, las multas esperadas se reducen de manera importante, desde aproximadamente 217 a 69 millones de CLP, pero a costa de una inversión de 145,9 millones de CLP. El costo total es de 214,6 millones de CLP, es decir, una leve reducción de 2,8 millones de CLP respecto del caso base. En la práctica, el escenario con un bus extra casi empata al caso base en costo total, pero con un nivel de servicio mucho mejor (menos días incumplidos y menor exposición a multas).

A partir de dos buses adicionales la situación cambia: aunque las multas se siguen reduciendo de forma muy marcada (hasta alrededor de 15,9; 2,8 y 0,37 millones de CLP para 11, 12 y 13 buses, respectivamente), el aumento en el costo de inversión domina el resultado. En el escenario con 11 buses, el costo total sube a unos 307,7 millones de CLP, es decir, cerca de 90 millones por sobre el caso base. Con 12 y 13 buses el costo total proyectado alcanza aproximadamente 440,6 y 584,0 millones de CLP, con sobre costos del orden de 223 y 367 millones de CLP, respectivamente. Por lo tanto, desde el punto de vista económico, solo el escenario con un Volare adicional logra un costo comparable al caso base, mientras que configuraciones con dos o más buses extra implican un incremento significativo del costo total a pesar de prácticamente eliminar las multas.

7.7. Resultados de la evaluación flota MinCa-18

En la Tabla 12 se resumen las probabilidades de contar con al menos siete buses operativos para distintos tamaños de flota MinCa-18, junto con el costo de inversión asociado a cada alternativa, considerando un costo unitario de 255 mil USD por bus.

Tabla 12: Probabilidad de contar con al menos 7 buses operativos y costo de inversión para distintas flotas MinCa-18.

Numero de buses N	buses fuera de servicio	$P(K \geq 7)$ [%]	Costo unitario [USD]	Costo total [USD]
7	0	80.80	255,000	1,785,000
8	1	97.77	255,000	2,040,000
9	2	99.80	255,000	2,295,000

(Fuente: Elaboración propia.)

A partir de estos resultados se observa que una flota de 8 buses MinCa-18 permite superar el 97 % de probabilidad de contar con al menos siete unidades operativas, con un costo de inversión intermedio entre las alternativas analizadas.

8. Conclusiones

El estudio desarrollado permitió caracterizar el comportamiento real de la flota Volare V8L 4×4 en el servicio de transporte de personal en Chuquicamata Subterránea, así como proyectar su desempeño futuro bajo distintos escenarios de capacidad y explorar alternativas de renovación de flota. A partir de los resultados obtenidos se concluye lo siguiente:

1. **La flota Volare actual presenta un nivel de riesgo de incumplimiento contractual elevado y creciente.** Los indicadores históricos muestran una disponibilidad global de la flota cercana a 0,85, con equipos antiguos como 989 y 990 con disponibilidades de 0,80 y 0,68, mientras que los buses más nuevos (S-05, S-06, S-07) superan el 0,90. La reconstrucción diaria del estado operativo evidencia un aumento sostenido de los días incumplidos entre 2024 y 2025, con meses críticos que superan los 14–18 días por debajo del mínimo contractual de siete buses operativos. Esto confirma que, en su configuración actual de nueve unidades, la flota no es capaz de sostener consistentemente el nivel de servicio requerido.

2. **El patrón de fallas de la flota está dominado por desgaste, y el deterioro futuro de la confiabilidad es consistente con los datos históricos.** El ajuste Weibull por activo muestra que la mayoría de los buses opera con parámetros de forma β mayores que 1, lo que indica un régimen de desgaste creciente, con tiempos característicos entre fallas (η) más bajos en los equipos antiguos y más altos en los buses recientes. La estimación del deterioro a partir de los TBF históricos indica que el intervalo entre fallas esperado se reduce progresivamente con la edad, alcanzando alrededor de un 70 % del valor inicial tras cinco años. Esto justifica explícitamente la inclusión del deterioro en el modelo de simulación Monte Carlo utilizado para proyectar disponibilidad y multas.

3. **El análisis de componentes y repuestos críticos confirma que el Volare V8L está operando fuera de su contexto de diseño.** La distribución de fallas y costos muestra que transmisión, rodado (neumáticos, ejes, rodamientos y retenes de maza), kit de embrague, sistema de tracción y frenos concentran una fracción relevante de las intervenciones y más del 70 % del costo de repuestos. A esto se suman sistemas como climatización, dirección, baterías y sistema eléctrico. Este patrón es coherente con un vehículo originalmente pensado para aplicaciones urbanas o de carretera que se enfrenta a caminos irregulares, pendientes, polvo y humedad propios de una mina subterránea. En la práctica, el modelo Volare V8L está sometido a un nivel de exigencia mayor al previsto, lo que se traduce en desgaste acelerado y altos costos de mantenimiento en los subsistemas más críticos.

4. **La proyección Monte Carlo a cinco años confirma que la configuración actual de 9 buses es operacional y económicamente frágil.** En el escenario base, el modelo con deterioro proyecta en cinco años una multa acumulada media del orden de 5482 UF y aproximadamente 566 días con algún incumplimiento del mínimo contractual. Esto significa que, en cerca de un tercio del horizonte simulado, existe al menos un día en el que la operación no logra sostener siete buses operativos, lo que confirma que la capacidad actual es insuficiente frente al deterioro esperado de la flota.

5. **La alternativa más conveniente en términos operacionales y económicos es la incorporación de un Volare adicional.** Al pasar de 9 a 10 buses, la multa esperada se reduce desde aproximadamente 5482 a 1732 UF y los días incumplidos bajan desde 566 a cerca de 191 en cinco años. Desde el punto de vista de holgura operativa, las horas con al menos un bus extra sobre el mínimo contractual aumentan desde unas 25.350 a alrededor de 37.008 horas,

es decir, se generan del orden de 11.600 horas adicionales de holgura en el horizonte de cinco años. Económicamente, el escenario con un Volare extra implica una inversión cercana a 145,9 millones de CLP y un costo total (multas + inversión) del orden de 214,6 millones de CLP, prácticamente equivalente al costo del escenario base (217,3 millones de CLP) pero con un nivel de servicio muy superior. Esta combinación de fuerte reducción de multas, aumento importante de holgura y costo total similar al caso base hace que la incorporación de una unidad Volare adicional sea la alternativa más equilibrada.

6. **Las alternativas con más de un Volare adicional mejoran el nivel de servicio, pero no son económicamente justificables bajo las condiciones actuales.** Los escenarios con 11, 12 y 13 buses reducen las multas prácticamente a niveles residuales (del orden de 400, 70 y 9 UF respectivamente) y casi eliminan los días de incumplimiento. Sin embargo, el aumento en inversión domina el resultado: el costo total sube a aproximadamente 307,7; 440,6 y 584,0 millones de CLP, con sobrecostos de 90, 223 y 367 millones respecto al caso base. Desde una perspectiva económica, estos escenarios no resultan convenientes dentro del horizonte evaluado, a pesar de su excelente comportamiento operativo.

7. **La holgura generada por la incorporación de un Volare adicional constituye una oportunidad concreta para mejorar la gestión de mantenimiento sobre los componentes críticos.** El aumento aproximado de 11.600 horas de holgura en cinco años al pasar de 9 a 10 buses implica disponer de más ventanas en las que la flota puede mantener el nivel contractual de siete unidades mientras se intervienen buses con fallas recurrentes en transmisión, rodado, embrague, frenos, suspensión, sistema eléctrico y climatización. En este sentido, la alternativa de un Volare adicional no solo reduce multas y días incumplidos, sino que

también habilita la implementación práctica de estrategias de mantenimiento dirigidas a los subsistemas identificados como más críticos en el análisis de repuestos y fallas.

8. **El MinCa-18 no compite económicamente con los Volare, pero sí constituye una alternativa técnicamente adecuada para un futuro recambio de flota.** Bajo una disponibilidad individual de 0,97, los cálculos muestran que una flota de 7, 8 y 9 MinCa-18 alcanza probabilidades de cumplir el mínimo de siete buses operativos del orden de 80,8 %, 97,8 % y 99,8 %, respectivamente. Sin embargo, los costos de inversión asociados (1,785; 2,04 y 2,295 millones de USD) son significativamente superiores a los escenarios de refuerzo con Volare. Por lo tanto, dentro del horizonte y marco económico de este estudio, la flota MinCa no resulta competitiva frente a la alternativa de incrementar la flota Volare. Aun así, el análisis del MinCa-18 es relevante como escenario de referencia porque muestra cuántas unidades serían necesarias para mantener las mismas condiciones contractuales con equipos diseñados específicamente para operación subterránea. En este sentido, más que una alternativa de reemplazo inmediato, el MinCa aparece como una opción consistente para un proceso de renovación de flota en el largo plazo.

9. **Estrategia recomendada: refuerzo incremental en el corto plazo y renovación gradual en el largo plazo.** Considerando los resultados históricos, la proyección estocástica con deterioro, el análisis de criticidad y la evaluación económica, la estrategia más razonable se puede resumir en dos etapas:

    - En el corto plazo, incorporar un Volare adicional para estabilizar el nivel de servicio, reducir de forma importante las multas y disponer de holgura suficiente para intervenir los componentes críticos sin comprometer el cumplimiento contractual.

- En el mediano y largo plazo, evaluar progresivamente la incorporación de equipos especializados tipo MinCa-18, aprovechando la información obtenida sobre los subsistemas más castigados por el entorno subterráneo para establecer criterios técnicos de recambio y diseño futuro de la flota.

En conjunto, el estudio demuestra que la flota Volare V8L 4×4, en su configuración actual, opera en el límite de su capacidad frente a las exigencias de Chuquicamata Subterránea, pero también que existen caminos concretos para mejorar tanto el nivel de servicio como la sostenibilidad económica del contrato. La combinación de análisis histórico, modelación estocástica con deterioro, identificación de componentes críticos y evaluación económica permite sustentar técnicamente la recomendación de reforzar la flota con una unidad Volare adicional en el corto plazo y considerar equipos especializados como el MinCa-18 en un eventual proceso de renovación de flota.

9. Limitaciones del estudio

La interpretación de los resultados presentados en este trabajo debe considerar una serie de limitaciones inherentes a la información disponible, al alcance del análisis y a las simplificaciones necesarias para la modelación del comportamiento futuro de la flota.

- **Ausencia de datos operacionales del MinCa-18 A PK.** No se dispuso de registros empíricos de confiabilidad, mantenibilidad o disponibilidad del equipo MinCa en condiciones reales de operación subterránea. En consecuencia, la evaluación de la alternativa MinCa se realizó utilizando una disponibilidad referencial basada en el mejor desempeño observado en los Volare (0,97) y un modelo binomial simple. Esto permite dimensionar cuántas unidades serían necesarias para cumplir el mínimo contractual, pero no permite comparar de manera rigurosa su comportamiento real frente al Volare V8L 4×4.

- **El modelo Monte Carlo no incluye costos de ineficiencia operativa.** El análisis económico considera únicamente las multas explícitas definidas en el contrato. No se incorporaron otros impactos asociados a la indisponibilidad del transporte, tales como retrasos en el inicio del turno, tiempos de espera del personal, impactos sobre la continuidad operacional o sobrecostos administrativos. La ausencia de esta información implica que los resultados económicos representan un escenario conservador y acotado, donde solo se modelan las penalizaciones contractuales.

- **El modelo económico no abarca un análisis completo de costo total de propiedad (TCO).** No se evaluaron diferencias entre Volare y MinCa en aspectos como consumo de combustible, vida útil efectiva, provisión de repuestos, disponibilidad de servicio técnico. La compa-

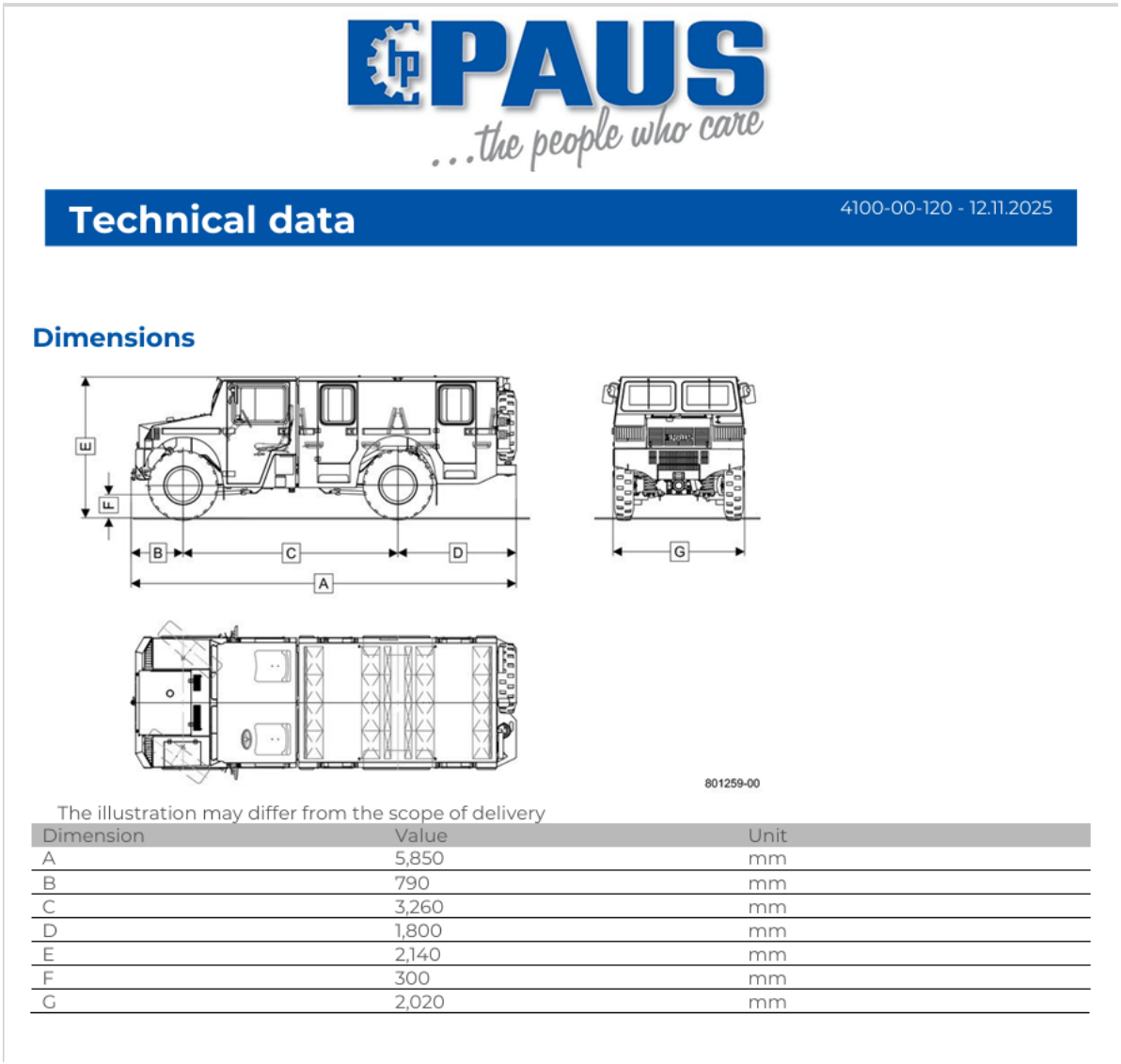
ración económica se limita al costo de inversión y a las multas proyectadas, lo cual no refleja necesariamente los costos reales de operar cada tipo de vehículo en el largo plazo.

- **No se modeló un escenario mixto Volare + MinCa.** La ausencia de parámetros reales del MinCa impidió simular una combinación de ambos equipos bajo un mismo modelo Monte Carlo. Como resultado, el estudio no cuantifica el desempeño de una flota mixta, pese a que esta opción podría ser relevante para una estrategia de transición o renovación progresiva.

Aun considerando estas limitaciones, el estudio proporciona una base sólida para caracterizar la situación actual del servicio, identificar los componentes más críticos, evaluar el impacto de añadir capacidad a la flota Volare y dimensionar preliminarmente alternativas de renovación como el Paus MinCa-18.

10. Anexos

10.1. A.1. Documentación técnica Paus MinCa 18 A PK



PAUS ...the people who care

Technical data 4100-00-120 - 12.11.2025

Dimensions

The illustration may differ from the scope of delivery

Dimension	Value	Unit
A	5,850	mm
B	790	mm
C	3,260	mm
D	1,800	mm
E	2,140	mm
F	300	mm
G	2,020	mm

Figura 17: Vista esquemática del módulo de pasajeros y características generales del MinCa 18.
Fuente: (Hermann Paus Maschinenfabrik, 2025).

PAUS ...the people who care

Technical data

4100-00-120 - 12.11.2025

Definition of option / optional equipment

In the following, the selectable equipment of the machine is identified by the terms "option" or "optional equipment."
The option describes equipment that can be selected in addition to the standard machine.
The optional equipment describes equipment that replaces other equipment on the machine.

Key features of the machine

Compact passenger transporter for use in underground mining

Passengers in driver's cab, maximum	2
Passengers in passenger cabin, maximum	16

Safety

All machines are designed and manufactured in accordance with the applicable legal requirements.
They offer a correspondingly high level of safety for users.
Some safety features at a glance:

- ROPS/FOPS protective canopy
- Battery main switch, lockable
- Emergency stop button: one in the driver's cab, one on the outside
- Automatic shutdown when engine-specific parameters are exceeded *
- Audible reverse signal
- 3-point safety entry
- Emergency exit
- Non-slip and color-contrasting entrances and exits
- Brake test function

The following happens automatically in the case of operator absence:

- Travel drive gear shift in neutral position
- Parking brake is activated

** Depending on the selected diesel engine*

Operating conditions

Permitted ambient temperature *	-20 °C to +40 °C

** Observe the cold start limit temperature of the engine*

Permitted longitudinal inclination, maximum	35 %
Operating height without power reduction, maximum	< 1,500 m

Weights and loads

Operating weight *	7,300 kg
Permitted payload, maximum *	2,000 kg
Permitted front axle load, maximum	3,300 kg
Permitted rear axle load, maximum	6,000 kg

** Depends on selected options and optional equipment*

Chassis

- Chassis with ladder frame
- Suspended axles, front steering axle
- Axle mounts via trailing arms and wishbones
- Vehicle suspension via two coil springs with shock absorbers on each of the front and rear axles
- Front and rear tow rings
- Hood opening via hinges and gas pressure damper
- Protective strips all round to protect against impact
- Front and rear bumpers
- Transport rings for assembly and shaft transport

Engine

DEUTZ BF4M 2012 C diesel engine

Manufacturer	DEUTZ
Type	BF4M 2012 C
Emission standard EU	Stage II
Emission standard USA	EPA Tier 2
Output	93 kW
At speed	2,300 rpm
Alternator	28 V 80 A
Starter motor	24 V 4 kW
Cold start limit temperature	-15 °C

- Catalytic converter with measuring points
- Fuel prefilter and fuel fine filter with water separator

Figura 18: Ficha técnica general del Paus MinCa 18 A PK para minería subterránea.
Fuente: (Hermann Paus Maschinenfabrik, 2025).

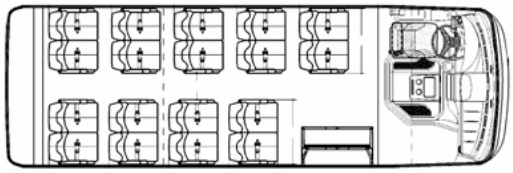


Figura 19: Configuración interna y sistema de ventilación y calefacción del módulo de pasajeros del MinCa 18.

Fuente: (Hermann Paus Maschinenfabrik, 2025).

10.2. A.2. Documentación técnica Volare V8L 4×4

PLANTA V8L 4X4
18 ASIENTOS + CONDUCTOR



DIMENSIONES [mm]	
Entre ejes	3.750
Largo total	6.535
Ancho	2.130
Altura interna	1.900
Altura externa	3.192
MOTOR	
Marca/Modelo	Cummins ISF 3.8
Norma	Euro V
Número de cilindro	4 en línea
Potencia máxima	152 cv - 2.600 rpm
Cilindrada total	3.760 cm^3
Válvulas	16
Sistema de inyección	Common Rail
Alternador	28v/110a
VOLÚMENES DE SUMINISTRO (L)	
Tanque de combustible	150
Cárter con filtro	10.6 litros
Depósito Arla 32	16 litros
Caja de cambio	4.6 litros
Dimensión de neumáticos	"215/75R 17.5"

ITEMS DE SERIE LÍNEA V8L
MOTOR EURO V

- Componentes de bajo costo para su recambio
- Carrocería y chasis Integrados
- Garantía y asistencia técnica total

CARACTERÍSTICAS TÉCNICAS

- Motor Frontal, Marca Cummins MA 900Modelo ISF 3.8
- Turbo aftercooler con sistema de inyección Commonrail
- Sistema de frenos SCAM con tambor asistido electrónicamente en la delantera y trasera accionado a aire (ABS/EBD/ATC)
- Freno de motor electro neumático y Balatas F120 (325x120)
- Dirección Hidráulica ZF 8090
- Embrague hidráulico
- Caja de cambio automatica ALISON
- Tacógrafo diario electrónico
- Sirena de retroceso

BENEFICIOS
MOTOR EURO V

- Mayor tecnología
- Mayor potencia
- Mayor torque
- Mayor economía de combustible
- Menor emisión de contaminantes evitando el óxido de nitrógeno (Nox)
- Mayor durabilidad de componentes de inyección
- Cuatro válvulas por cilindro

Peso Bruto Total: es inferior a la suma de las capacidades de los ejes, por considerar las siguientes situaciones críticas de tránsito: Aceleraciones, desaceleraciones bruscas y mala calidad del pavimento.

Figura 20: Ficha técnica del Volare V8L 4×4: planta de asientos, dimensiones y características principales.

Fuente: (Volare, 2025).



Figura 21: Vista ilustrativa del vehículo Volare V8L 4×4.
Fuente: (Volare, 2025).



OMNIBUS MARCO POLO - VOLARE - V8L

Cotización Nº: [redacted]

[redacted]

Adicionales - Observacion

FECHA DE LLEGADA 120 DIAS APROXIMADA DESPUES
DE RELIZAR EL PAGO DEL 20% CUOTA INICIAL

PLAZO DE ENTREGA

El plazo es de 30 días. Tiempos de entrega indicados son estimados y se consideran contando a partir del pago de la unidad y firma de documentos legales y comerciales. Considere trámite de tarjetas de propiedad y placas de los buses.

SERVICIO DE ATENCIÓN DE EMERGENCIAS (SAE)

Global Bus ofrece sus clientes un servicio de atención rápida para emergencias las 24 horas del día, los 365 días del año llamando al RPM #950480587

PLAZO DE ENTREGA

Serán llevadas a cabo en las instalaciones de Tracto Camiones USA - Global Bus En caso que la unidad sea entregada en otro lugar, el cliente asumirá el total del desplazamiento y viáticos del personal encargado teniendo derecho de hasta un máximo de tres conductores para dicho fin. La entrega técnica es requisito indispensable para la activación de la garantía del vehículo.

GARANTÍA

La carrocería y el chasis son cubiertos con 01 año cada uno de garantía por defecto de material de fabricación o de montaje excluyendo desgaste natural.
Para los modelos V8lL 4X4 La carrocería y el chasis son cubiertos con 06 meses de garantia otros términos de cobertura, condiciones y limitaciones revisar en detalle de poliza de garantia otorgada con el vehículo.

Propuesta Económica

PRECIO UNITARIO		US/. 156,000.00	
UNID	VALOR VENTA	I.G.V. (18%)	TOTAL VENTA
1	US/.	US/.	US/.

Observaciones

Lugar de entrega: En nuestros talleres
Forma de Pago: 100% al contado, financiamiento a través de entidades del sistema financiero.
Validez de la oferta: 30 días calendario.
Se considerará el tipo de cambio a la fecha de desembolso.
Validez del tipo de Cambio: 24 hrs. de la fecha del cotización, se considerará el tipo de cambio a la fecha de desembolso.

[redacted]

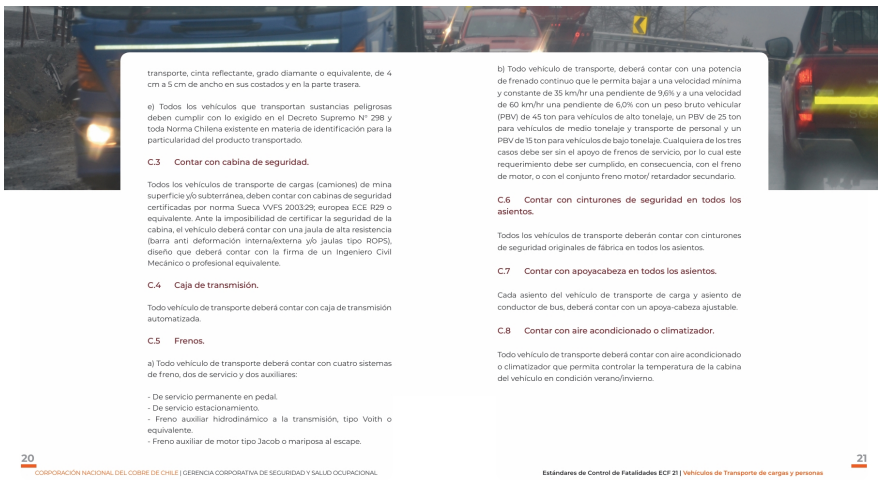
ERENTE CONCESIONARIOS Y SUCURSA
947658972

VºB Gerencia

Cliente

Figura 22: Cotización del vehículo Volare V8L 4×4.
Fuente: (Volare, 2025).

10.3. A.3. Extractos relevantes del estándar ECF-21



transporte, cinta reflectante, grado diamante o equivalente, de 4 cm a 5 cm de ancho en sus costados y en la parte trasera.

e) Todos los vehículos que transportan sustancias peligrosas deben cumplir con lo exigido en el Decreto Supremo N° 298 y toda Norma Chilena existente en materia de identificación para la particularidad del producto transportado.

C.3 Contar con cabina de seguridad.

Todos los vehículos de transporte de cargas (camiones) de mina superficie y/o subterránea, deben contar con cabinas de seguridad certificadas por norma Sueca VVFS 2003:29; europea ECE R29 o equivalente. Ante la imposibilidad de certificar la seguridad de la cabina, el vehículo deberá contar con una jaula de alta resistencia (barra anti deformación interna/externa y/o jaulas tipo ROPS), diseño que deberá contar con la firma de un Ingeniero Civil Mecánico o profesional equivalente.

C.4 Caja de transmisión.

Todo vehículo de transporte deberá contar con caja de transmisión automatizada.

C.5 Frenos.

a) Todo vehículo de transporte deberá contar con cuatro sistemas de freno, dos de servicio y dos auxiliares:

- De servicio permanente en pedal.
- De servicio estacionamiento.
- Freno auxiliar hidrodinámico a la transmisión, tipo Voith o equivalente.
- Freno auxiliar de motor tipo Jacob o mariposa al escape.

20

CORPORACIÓN NACIONAL DEL COBRE DE CHILE | GERENCIA CORPORATIVA DE SEGURIDAD Y SALUD OCUPACIONAL

b) Todo vehículo de transporte, deberá contar con una potencia de frenado continuo que le permita bajar a una velocidad mínima y constante de 35 km/hr una pendiente de 9,6% y a una velocidad de 60 km/hr una pendiente de 6,0% con un peso bruto vehicular (PBV) de 45 ton para vehículos de alto tonelaje, un PBV de 25 ton para vehículos de medio tonelaje y transporte de personal y un PBV de 15 ton para vehículos de bajo tonelaje. Cualquiera de los tres casos debe ser sin el apoyo de frenos de servicio, por lo cual este requerimiento debe ser cumplido, en consecuencia, con el freno de motor, o con el conjunto freno motor/ retardador secundario.

C.6 Contar con cinturones de seguridad en todos los asientos.

Todos los vehículos de transporte deberán contar con cinturones de seguridad originales de fábrica en todos los asientos.

C.7 Contar con apoyacabeza en todos los asientos.

Cada asiento del vehículo de transporte de carga y asiento de conductor de bus, deberá contar con un apoya-cabeza ajustable.

C.8 Contar con aire acondicionado o climatizador.

Todo vehículo de transporte deberá contar con aire acondicionado o climatizador que permita controlar la temperatura de la cabina del vehículo en condición verano/invierno.

21

Estándares de Control de Fatalidades ECF 21 | Vehículos de Transporte de cargas y personas

Figura 23: Requisitos del estándar ECF-21 asociados a desempeño de frenado, sistemas de seguridad de la cabina y equipamiento interior para transporte de personas.
Fuente: (Codelco, 2022).

C. REQUISITOS DE LOS VEHÍCULOS DE TRANSPORTE

C.1 Antigüedad de los vehículos de transportes para transitar en los recintos de CODELCO.

a) Para todo vehículo de transporte la antigüedad no podrá ser superior a 5 años o 600.000 km.
b) La vigencia en años o en kilometraje de los vehículos de transporte, podrá ser extendida hasta 10 años o 1.200.000 km, previa presentación de:

- Evaluación técnica con certificación del fabricante/representante u organismo competente que indique que el vehículo, dado su estado y régimen de mantención, puede ser usado por el tiempo adicional en forma segura.
- El vehículo al cual se le amplía su vigencia, no podrá ser usado en un servicio diferente al del origen de la ampliación.
- Contar con un plan de mantención que garantice que el funcionamiento del vehículo de transporte será de forma segura.

Esta documentación deberá ser presentada cada 2 años al sistema de control de acceso del respectivo Centro de Trabajo.

C.2 Número de identificación de vehículos de transportes y cinta reflectante.

a) Todos los vehículos de transporte de la Corporación (arrendados o propios) deben contar con un número de identificación y logotipo. El número de identificación deberá ser claramente visible a una distancia no menor a 100 m, para permitir su identificación. El código estará sujeto a una identificación alfanumérica, la cual estará constituida por 3 letras indicadas en el requisito E1, seguido de los 3 últimos caracteres de la patente del vehículo. Esta identificación alfanumérica, deberá quedar registrada en los registros de la plataforma de control de acceso corporativa.



b) Todos los vehículos de transporte de propiedad de empresas contratistas, ya sean propios de ella o sub arrendados, deberán contar con un logo y código de identificación único, en puertas laterales y portalón trasero. Esta identificación debe ser claramente visible a una distancia no menor a 100 m.

c) Los números y/o logos deben ser pintados, estampados, adhesivos o magnéticos, de color contrastante con el fondo.

d) Cada Centro de Trabajo de Codelco, de acuerdo a sus características operacionales, podrá colocar en los vehículos de

Figura 24: Requisitos del estándar ECF-21 relativos a identificación, antigüedad y condiciones generales de los vehículos de transporte.

Fuente: (Codelco, 2022).

10.4. A.4. Extractos relevantes del estudio

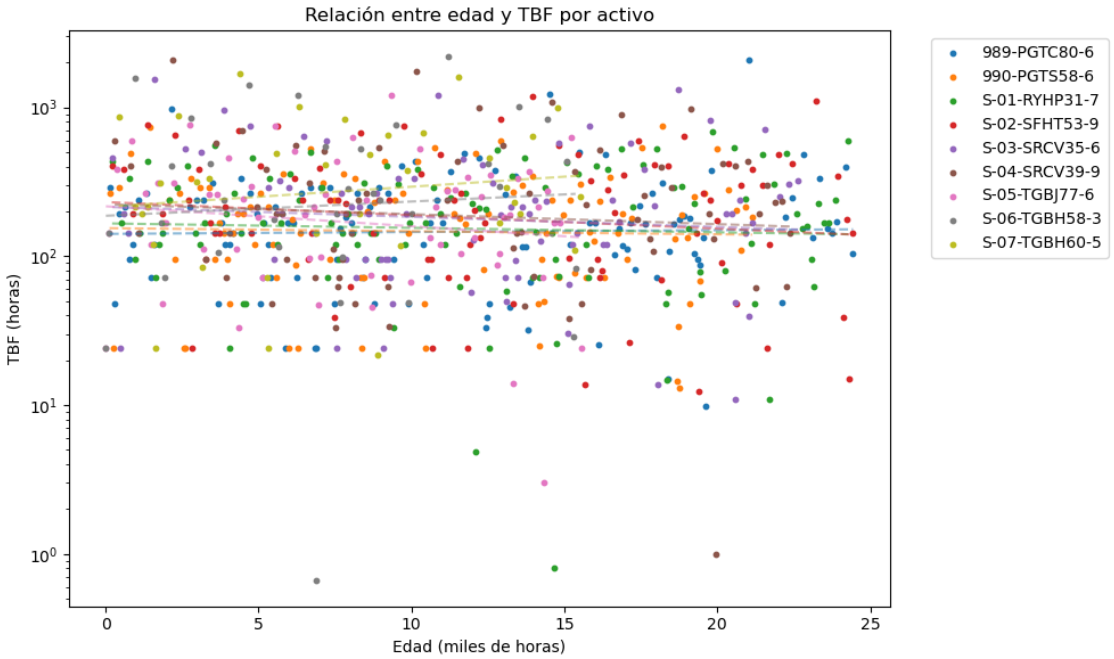


Figura 25: Relación de la edad del activo y TBF.

Fuente: Elaboración propia.

Referencias

Ahmad, R. and Kamaruddin, S. (2012). An overview of time-based and condition-based maintenance in industrial application. *Computers & Industrial Engineering*, 63(1):135–149.

Basten, R. J. I. and Arts, J. J. (2017). Fleet readiness: Stocking spare parts and high-tech assets. *IISE Transactions*, 49(4):1–13.

Codelco (2019). Chuquicamata subterránea: Informe técnico de proyecto. Santiago, Chile. Accedido en 2025.

Codelco (2022). Estándar de control de fatalidades n° 21: Transporte de personas (ecf-21), revisión 02. Documento interno de Codelco, consultado en 2025.

Hermann Paus Maschinenfabrik (2025). *TD 4100-00-120 MinCa 18 A PK: Technical Data*. Ficha técnica del fabricante Paus MinCa 18 A PK.

Hernández, E. and Navarrete, E. (2001). Sistema de cálculo de indicadores para el mantenimiento. *Revista Club de Mantenimiento*, (6).

Mardones, C. A. M. (2011). Mejores prácticas de mantenimiento y políticas de mantenimiento. caso aplicado. Profesor guía: Raúl Stegmaier.

Márquez, A. C. (2007). *The Maintenance Management Framework: Models and Methods for Complex Systems*. Springer, London, UK.

Rausand, M., Barros, A., and yland, A. H. (2020). *System Reliability Theory: Models, Statistical Methods, and Applications*. Wiley, Hoboken, NJ, 3rd edition.

Teniente, J., Morales, R., and Contreras, L. (2018). Diseño y planificación de la mina chuquicamata subterránea. *Revista de Ingeniería de Minas*, 23(2):1059–1072.

Viveros, P., Stegmaier, R., Kristjanpoller, F., Barberá, L., and Crespo, A. (2013). Propuesta de un modelo de gestión de mantenimiento y sus principales herramientas de apoyo. *Ingeniare. Revista Chilena de Ingeniería*, 21(1):125–138.

Volare (2018). *Manual del usuario V8L 4x4*. Documento técnico del fabricante. Transmisión Eaton FSO 4505 C, Atlas 2 Speed, sistemas y capacidades.

Volare (2025). Ficha técnica volare v8l 4x4. Documento comercial del fabricante. Planta de asientos y dimensiones externas.

Zio, E. (2013). Evaluating maintenance policies by quantitative modelling and analysis. *Reliability Engineering & System Safety*, 109:53–65.