

UNIVERSIDAD TÉCNICA FEDERICO SANTA MARÍA
SEDE VIÑA DEL MAR – JOSÉ MIGUEL CARRERA

**PROPUESTA DE PLAN DE MANTENIMIENTO CENTRADO EN LA
CONFIABILIDAD A BUSES ELÉCTRICOS DE LA REGIÓN DE VALPARAÍSO**

Trabajo de Titulación para optar al
Título de Ingeniero en
MANTENIMIENTO INDUSTRIAL.

Alumno:

Sr. Andrés Ignacio Olivares Córdova

Profesor Guía:

Mg. Ing. Carlos Baldi González.



CONSTANCIA DE VALIDACIÓN Y CONFIDENCIALIDAD DE MONOGRAFÍA A REPOSITORIO ACADÉMICO

1.- IDENTIFICACIÓN DEL TRABAJO ACADÉMICO

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

Título del trabajo: PROPUESTA DE PLAN DE MANTENIMIENTO CENTRADO EN LA CONFIABILIDAD A BUSES ELÉCTRICOS DE LA REGIÓN DE VALPARAÍSO

Nombre del candidato(a): Andrés Ignacio Olivares Córdova

Carrera / Grado: Ingeniería en Mantenimiento Industrial

Campus: Viña del Mar Departamento: Mecánica

2.- VALIDACIÓN DEL PROFESOR GUÍA/DIRECTOR DE TESIS

Yo, Carlos Andrés Baldi González, en mi calidad de profesor(a) guía/director(a) del trabajo académico mencionado anteriormente **DEJO CONSTANCIA** que:

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

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

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

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

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

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

4.- FIRMAS

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

Fecha: 23-06-2026 Firma: 

Estudiante o Candidato(a):—

Fecha: 23-06-2026 Firma: 

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

RESUMEN

KEYWORKDS: Mantenimiento centrado en la confiabilidad (RCM), FMECA, buses eléctricos, sistema de baterías, disponibilidad, mantenimiento basado en condición.

El presente trabajo de título se desarrolla en la empresa Trolebuses de Chile S.A., en el contexto de la operación de una flota de buses eléctricos King Long XMQ6900G en la ciudad de Valparaíso. Si bien estos buses representan un avance en la modernización del transporte público, durante su operación se han evidenciado fallas recurrentes asociadas al sistema de baterías de alta tensión, afectando la disponibilidad operacional y la continuidad del servicio.

El objetivo del estudio fue analizar los modos de falla del sistema crítico y desarrollar un plan de mantenimiento basado en confiabilidad que permita mejorar el desempeño de la flota. Para ello, se aplicó la metodología de Mantenimiento Centrado en la Confiabilidad (RCM), junto con el método de criticidad Jack-Knife y el análisis FMECA.

A partir del diagnóstico, se identificó que el sistema de refrigeración de baterías corresponde al subsistema más crítico, debido a su impacto en la temperatura de operación, la seguridad y la eficiencia del bus. Se determinaron modos de falla relevantes como fugas de refrigerante, obstrucciones, fallas en la bomba de circulación y problemas en el sistema de control térmico (BMS).

En base a estos resultados, se desarrolló un plan de mantenimiento que incorpora actividades preventivas y basadas en condición, orientadas a mitigar dichas fallas. Este plan incluye control de nivel de refrigerante, purga del sistema, diagnóstico del BMS y monitoreo de variables críticas.

Desde el punto de vista técnico, la propuesta permite reducir las fallas anuales de 44 a 24 eventos y disminuir los tiempos de detención, mejorando la disponibilidad del sistema. Desde el punto de vista económico, el costo del plan (18.758 USD/año) es considerablemente menor que los costos asociados a fallas críticas, que pueden superar los 2.100 USD por hora de detención.

En conclusión, la aplicación de la metodología RCM permite mejorar la confiabilidad del sistema de baterías y optimizar los costos operacionales, contribuyendo a una operación más eficiente del transporte público eléctrico.

ÍNDICE.

Contenido

RESUMEN.....2

INTRODUCCIÓN 9

 OBJETIVO GENERAL: 11

 OBJETIVOS ESPECÍFICOS:.....11

CAPÍTULO 1: ANTECEDENTES GENERALES E IDENTIFICACION DEL EQUIPO MAS CRÍTICO 12

 1.1. ANTECEDENTES GENERALES 13

 ANTECEDENTES DE LA EMPRESA.....13

 UBICACIÓN 14

 1.2. ENTIDAD.....16

 1.3. CONTEXTO OPERACIONAL 18

 Perfil del negocio e historia: 18

 Ubicación geográfica: 19

 Proceso operacional: 19

 Condiciones laborales: 20

 Factores ambientales: 20

 Políticas y normativa de mantenimiento: 20

 1.4. DESCRIPCIÓN DE LA FLOTA Y SISTEMAS PRINCIPALES 21

 Sistema de propulsión eléctrica.....21

 Sistema de almacenamiento de energía (alta tensión).....22

 Sistema térmico 22

 Sistema eléctrico de baja tensión 22

 Sistema de control electrónico 22

 Sistema de frenado 22

 Sistema neumático 23

 Sistema de suspensión.....23

 Sistema de dirección 23

 Sistema estructural (chasis y carrocería).....23

Sistema de seguridad.....	23
Sistema de rodadura	23
1.5. SISTEMA DE CARGA E INFRAESTRUCTURA ENERGÉTICA	25
1.6. SELECCIÓN DEL SISTEMA CRÍTICO MEDIANTE ANÁLISIS DE CRITICIDAD JACK-KNIFE.....	26
CAPÍTULO 2: ANÁLISIS DE CONFIABILIDAD DEL SISTEMA DE BATERÍAS MEDIANTE METODOLOGÍA FMECA	30
2.1. ANÁLISIS DE MODOS DE FALLA	31
2.2. CLASIFICACIÓN DE COMPONENTES CRÍTICOS SEGÚN VALOR DEL ÍNDICE DE CRITICIDAD (IC)	35
2.3. DESCRIPCIÓN DEL SISTEMA CRÍTICO.....	38
2.4. ANÁLISIS FMECA DEL SISTEMA.....	41
2.4.1. METODOLOGIA RCM	41
2.4.2. DEFINICIÓN DE FUNCIÓN.....	42
2.4.3. FALLAS FUNCIONALES	43
2.4.4. MODOS DE FALLAS.....	44
2.4.5. EFECTOS DE FALLAS.....	45
2.4.6. CUANTIFICACIÓN DEL RIESGO.....	46
2.5. DEFINICIÓN DE ACTIVIDADES DE MANTENIMIENTO Y CUANTIFICACIÓN DE ESFUERZOS.....	51
2.6. LISTA DE TAREAS A REALIZAR SEGÚN PROPUESTA DE RCM	57
CAPÍTULO 3: EVALUACIÓN TÉCNICA Y ECONÓMICA DEL ENFOQUE RCM.....	60
3.1. ANÁLISIS DE LAS RECOMENDACIONES RCM.....	61
3.2. PLAN DE MANTENIMIENTO ACTUAL.....	63
3.3. PLAN DE MANTENIMIENTO MEJORADO	66
3.4. DESCRIPCIÓN DE LAS MEJORAS PROPUESTAS	71
3.5. IMPACTO EN LA DISPONIBILIDAD.....	73
3.6. FACTIBILIDAD TÉCNICA Y ECONÓMICA	74
Plan mejorado con RCM enfocado en componentes críticos.....	77
3.7. EVALUACIÓN DE COSTOS OPERACIONALES	79
CONCLUSIÓN	81

RECOMENDACIONES	83
Bibliografía	84
Anexos	85

Índice de Figuras

Figura 1-1. Vista Centro de Carga Trolebuses de Chile S.A.	12
Figura 1-2. Vista Satelital Carga Trolebuses de Chile S.A.	13
Figura 1-3. Presentación de buses eléctricos con autoridades regionales, Trolebuses de Chile S.A.	15
Figura 1-4. Daño estructural en módulo de batería de alta tensión.	17
Figura 1-5. Configuración interna de módulos de batería LiFePO ₄ .	20
Figura 1-6. Vista general del sistema de baterías de alta tensión del bus eléctrico.	22
Figura 1-7. Sistema de carga Triton.	23
Figura 2-1. Matriz de criticidad (Frecuencia x Consecuencia)	32
Figura 2-2. Sistema de baterías y refrigeración del bus eléctrico.	37
Figura 2-3. Diagrama de decisión RCM	49
Figura 2-4. Diagrama de ruta crítica de actividades de mantenimiento.	56
Figura 3-1. Programa de mantenimiento actual bus eléctrico XMQ6900G	62

Índice de Tablas

Tabla 1-1. Número de fallas y tiempos de detención por sistema.	25
Tabla 2-1. Escala de frecuencia de fallas (FF).	30
Tabla 2-2. Escala de Tiempo de Reparación (TR).	30
Tabla 2-3. Escala de Impacto en Seguridad, Higiene y Medio Ambiente (SHA).	31
Tabla 2-4. Escala de Costo de Reparación (CR).	31
Tabla 2-5. Escala de Impacto en la Función (IF).	31
Tabla 2-6. Índice de criticidad de componentes del bus eléctrico.	34
Tabla 2-7. Componentes más críticos del sistema de baterías.	35
Tabla 2-8. Características del sistema de baterías de alta tensión.	37
Tabla 2-9. Análisis FMECA del sistema de baterías de alta tensión.	45
Tabla 2-10. Actividades de mantenimiento empleando Diagrama de decisión RCM.	51
Tabla 2-11. Hoja de decisión RCM.	52
Tabla 2-12. Actividades de mantenimiento RCM	54
Tabla 2-13. Secuencia de tareas de mantenimiento basada en RCM.	55
Tabla 3-1. Propuesta plan de mantenimiento mejorado.	65
Tabla 3-2. Propuesta de plan de mantenimiento mejorado para componentes críticos.	66
Tabla 3-3. Descripción de siglas de periodicidad.	70
Tabla 3-4. Resultados de simulación Monte Carlo	73
Tabla 3-5. Comparativo técnico–económica del plan de mantenimiento	73
Tabla 3-6. Actividad de mantenimiento	76
Tabla 3-7. Comparación de indicadores de confiabilidad y disponibilidad del sistema de baterías	77

Índice de Gráficos

Gráfico 1-1. Diagrama Jack-Knife de criticidad de sistemas del bus eléctrico.	26
---	----

INTRODUCCIÓN

Trolebuses de Chile S.A., empresa emblemática del transporte eléctrico en la ciudad de Valparaíso, incorporó en septiembre de 2024 una flota de treinta y ocho buses eléctricos modelo King Long XMQ6900G, los cuales constituyen el principal objeto de estudio del presente trabajo. Esta incorporación representa un avance significativo en la modernización del transporte público regional y en la implementación de la estrategia nacional de electromovilidad (Ministerio de Transportes y Telecomunicaciones, 2024); (Espacio T, 2023) orientada a mejorar la eficiencia energética, reducir las emisiones contaminantes y fortalecer la sostenibilidad del sistema de transporte urbano.

Durante su primer año de operación, la flota ha operado bajo condiciones exigentes, con jornadas promedio de ocho horas diarias por turno, evidenciando la ocurrencia de fallas operacionales que han generado detenciones no programadas. Estas fallas han impactado directamente la continuidad del servicio, afectando la disponibilidad de los buses y generando costos asociados a mantenimiento correctivo y pérdidas operacionales.

En particular, se ha identificado que una proporción significativa de estas fallas se concentra en el sistema de baterías, específicamente en su sistema de refrigeración, el cual resulta crítico debido a su influencia directa en la temperatura de operación, seguridad y desempeño del bus eléctrico (King Long United Automotive Industry Co. Ltd., 2023). La ocurrencia de fallas en este sistema puede provocar sobrecalentamiento, degradación prematura de las celdas y, en casos extremos, la detención total del vehículo.

A pesar de contar con un plan de mantenimiento preventivo definido por el fabricante, basado principalmente en inspecciones periódicas por kilometraje, este no ha logrado prevenir eficazmente las fallas bajo las condiciones reales de operación en la ciudad de Valparaíso. Factores como la topografía con pendientes pronunciadas, la humedad, la salinidad ambiental y un régimen de operación intensivo generan una mayor exigencia sobre los componentes, evidenciando una brecha entre el mantenimiento teórico recomendado y el comportamiento real de los sistemas en servicio (Rodríguez Hidalgo, 2023).

En este contexto, la problemática central radica en la insuficiente efectividad del plan de mantenimiento actual para anticipar y controlar las fallas críticas del sistema de baterías, lo que repercute directamente en la confiabilidad y disponibilidad de la flota. Esta situación evidencia la necesidad de implementar un enfoque de mantenimiento más robusto, sistemático y adaptado al contexto operacional.

Frente a esta problemática, el presente trabajo propone la aplicación de la metodología de Mantenimiento Centrado en la Confiabilidad (RCM), entendida como un proceso sistemático orientado a asegurar que los activos continúen cumpliendo sus funciones en su contexto operacional (SAE International, 2009)(Moubray, 1997). El objetivo es analizar los sistemas críticos de la flota, identificar sus modos de falla y establecer estrategias de mantenimiento alineadas con las condiciones reales de operación.

De esta manera, el estudio busca contribuir a la mejora de la disponibilidad operacional de los buses, optimizar la gestión del mantenimiento y fortalecer la continuidad y confiabilidad del servicio de transporte público en la ciudad de Valparaíso, abordando de forma estructurada la brecha existente entre el mantenimiento basado en recomendaciones del fabricante y las exigencias reales de operación.

OBJETIVO GENERAL:

Proponer un plan de mantenimiento basado en la metodología de Mantenimiento Centrado en la Confiabilidad (RCM) para la flota de buses eléctricos King Long XMQ6900G de la empresa Trolebuses de Chile S.A., orientado a la mejora de la confiabilidad y continuidad operacional del sistema de transporte, mediante la identificación del sistema crítico, el análisis de modos de falla y la evaluación técnica–económica de las tareas de mantenimiento propuestas

OBJETIVOS ESPECÍFICOS:

1°Objetivo: Diagnosticar el proceso del sistema de transporte de buses eléctricos de la empresa Trolebuses de Chile S.A., mediante la identificación de sus etapas y equipos involucrados, determinando el elemento crítico a través del análisis de criticidad Jack-Knife, como base técnica para evidenciar su relevancia operacional.

2°Objetivo: Analizar los modos de falla del equipo crítico seleccionado, aplicando la metodología de Mantenimiento Centrado en Confiabilidad (RCM) y la herramienta FMECA, para la identificación de funciones críticas y sus efectos sobre la operación.

3° Objetivo: Evaluar las tareas de mantenimiento asociadas al sistema crítico, a partir de los resultados del análisis RCM, en relación con la confiabilidad del equipo y la continuidad del proceso productivo.

CAPÍTULO 1: ANTECEDENTES GENERALES E IDENTIFICACION DEL
EQUIPO MAS CRÍTICO

1.1.ANTECEDENTES GENERALES

ANTECEDENTES DE LA EMPRESA

Trolebuses de Chile S.A. es la empresa responsable de operar el sistema de transporte eléctrico de la ciudad de Valparaíso, siendo la única de su tipo en Chile y una de las más representativas de Sudamérica. Fundada el 14 de abril de 1952, tiene su sede en calle Carlos Van Buren N° 2526 y, desde el año 2007, administra la Unidad 8 del Transporte Metropolitano de Valparaíso, como parte del sistema de transporte público regional, operando los recorridos 801, 802 y los servicios eléctricos “E” (Trolebuses de Chile S.A., 2025).

El origen de este sistema se remonta a la década de 1940, cuando surgió la necesidad de reemplazar los antiguos tranvías eléctricos que habían prestado servicio desde 1903. En 1945, la Empresa Nacional de Transportes impulsó la modernización del transporte urbano mediante la incorporación de trolebuses fabricados por Pullman Standard con tecnología General Electric. Gracias al financiamiento de la CORFO, Valparaíso logró implementar su propia red, iniciando oficialmente sus operaciones el 2 de noviembre de 1952 con las primeras unidades del modelo TC-48 y la correspondiente infraestructura de tendido eléctrico (Trolebuses de Chile S.A., 2025); (Espacio T, 2023).

Desde entonces, la empresa ha mantenido la continuidad de este sistema, el cual posee un importante valor patrimonial, histórico y operativo para la ciudad. En este sentido, Trolebuses de Chile S.A. no solo representa un medio de transporte público, sino también un referente nacional en movilidad eléctrica urbana, integrando tradición, identidad local y servicio a la comunidad.

En el año 2024, la empresa dio un paso relevante en su proceso de modernización al incorporar una flota de 38 buses eléctricos modelo King Long XMQ6900G, los cuales constituyen la base del presente estudio. Estas unidades, 100 % eléctricas, comenzaron a operar en los recorridos E01, E02, E03, E04 y E05, fortaleciendo la cobertura del sistema y contribuyendo a la reducción de emisiones contaminantes, al mejoramiento de la eficiencia energética y al fortalecimiento del transporte sustentable en la ciudad de Valparaíso (Ministerio de Transportes y Telecomunicaciones, 2024).

Además, estos buses incorporan estándares modernos de servicio, tales como climatización, conectividad Wi-Fi, cargadores USB y accesibilidad universal, elevando la calidad del servicio entregado a los usuarios (King Long United Automotive Industry Co. Ltd., 2023).

De esta manera, Trolebuses de Chile S.A. combina su legado histórico con una estrategia de modernización orientada a la innovación, la sostenibilidad y la confiabilidad operacional, respondiendo a las exigencias actuales del transporte público eléctrico en la Región de Valparaíso.

Figura 1-1. Vista Centro de Carga Trolebuses de Chile S.A.



Fuente: Elaboración propia, fotografía tomada el 01 de septiembre de 2025.

UBICACIÓN

La operación de esta nueva flota se encuentra respaldada por el Centro de Carga ubicado en Av. Ojos del Salado LT SP 3, Parque Industrial Placilla, comuna de Valparaíso. Esta ubicación presenta como principal ventaja su emplazamiento en un sector industrial, lo que permite contar con conexión directa a la red de alta tensión, asegurando el suministro energético requerido para la operación, además de disponer de espacio adecuado para la maniobrabilidad de los buses.

Sin embargo, se identifica una desventaja operativa relevante, asociada a la distancia entre el centro de carga y la postura principal en Estación Barón, la cual corresponde aproximadamente a 15 kilómetros por tramo. Esto implica un recorrido adicional cercano a 30 km diarios por unidad, generando desgaste innecesario en los vehículos.

Adicionalmente, el trayecto incluye el ascenso por el sector de Santo Ossa, lo que incrementa la exigencia energética y el estrés térmico del sistema de baterías.

Figura 1-2. Vista satelital Centro de Carga Trolebuses de Chile S.A.



Fuente: Google Maps (2025), elaboración propia.

1.2. ENTIDAD

El funcionamiento del sistema de transporte público eléctrico en la ciudad de Valparaíso se encuentra regulado por el Ministerio de Transportes y Telecomunicaciones de Chile, entidad encargada de establecer las condiciones técnicas, operacionales y de seguridad que deben cumplir los vehículos y operadores del sistema (Ministerio de Transportes y Telecomunicaciones, 2024).

En este contexto, el marco normativo vigente está compuesto por diversos decretos y disposiciones legales que regulan tanto la operación como las características técnicas de los buses destinados al transporte público urbano. Entre las principales normativas aplicables se encuentra el Decreto N° 22 del año 2023, el cual establece las condiciones operacionales del sistema de transporte público, definiendo exigencias relacionadas con la continuidad del servicio, frecuencia, estándares de operación y cumplimiento de indicadores de desempeño (Ministerio de Transportes y Telecomunicaciones, 2023).

Asimismo, el Decreto Supremo N° 122 de 1991 establece los requisitos técnicos que deben cumplir los vehículos de locomoción colectiva, incluyendo aspectos relacionados con ventilación, accesibilidad, seguridad, sistemas de frenado, dirección y condiciones estructurales. Esta normativa constituye una base fundamental para garantizar la seguridad de los usuarios y la correcta operación de los vehículos en servicio (Ministerio de Transportes y Telecomunicaciones, 1991).

Por su parte, el Decreto Supremo N° 130 del año 2001 regula las condiciones ambientales aplicables a los vehículos de transporte, estableciendo límites máximos de emisión de contaminantes. En el caso de los buses eléctricos, esta normativa se cumple ampliamente al no generar emisiones directas durante su operación, contribuyendo significativamente a la reducción del impacto ambiental del sistema de transporte (Ministerio de Transportes y Telecomunicaciones, 2001).

Adicionalmente, en el ámbito de la gestión de la seguridad vial, la norma ISO 39001:2012 establece los requisitos para implementar un sistema de gestión de la seguridad del tránsito, orientado a reducir y prevenir accidentes de tráfico, así como a mejorar el desempeño de las organizaciones vinculadas al transporte (International Organization for Standardization, 2012). En este contexto, su aplicación permite fortalecer la gestión operacional de la empresa, integrando aspectos de seguridad, control de riesgos y mejora continua, los cuales son coherentes con los principios del mantenimiento centrado en la confiabilidad.

En conjunto, estas normativas configuran el marco regulatorio bajo el cual opera la flota de buses eléctricos de Trolebuses de Chile S.A., estableciendo exigencias que deben ser consideradas en la gestión del mantenimiento, en la planificación operacional y en la continuidad del servicio. En este sentido, el cumplimiento normativo no solo asegura condiciones adecuadas de seguridad y operación, sino que también condiciona las estrategias de mantenimiento que deben implementarse para garantizar la disponibilidad y confiabilidad del sistema de transporte público.

Figura 1-3. Presentación de buses eléctricos con autoridades regionales, Trolebuses de Chile S.A.



Fuente: Ministerio de Transportes y Telecomunicaciones (2024)

1.3.CONTEXTO OPERACIONAL

El contexto operacional, de acuerdo con los lineamientos establecidos en la norma SAE International JA1011 y complementado por las directrices de la norma SAE JA1012, se define como el conjunto de condiciones bajo las cuales se espera que opere un activo físico o sistema. Estas normas establecen los principios y criterios para la correcta aplicación del Mantenimiento Centrado en la Confiabilidad (RCM), considerando factores técnicos, ambientales, operacionales y humanos que influyen directamente en el desempeño y confiabilidad de los equipos (SAE International, 2009); (Moubray, 1997).

En este caso, la operación de la flota de buses eléctricos King Long XMQ6900G de la empresa Trolebuses de Chile S.A. se desarrolla en la ciudad de Valparaíso, la cual presenta características geográficas y ambientales particulares que difieren significativamente de las condiciones estándar consideradas por el fabricante. La ciudad se caracteriza por una topografía irregular, con pendientes pronunciadas, curvas cerradas y calles de geometría compleja, lo que genera mayores exigencias sobre los sistemas de tracción, frenado, suspensión y dirección de los vehículos (Rodríguez Hidalgo, 2023).

Adicionalmente, el entorno climático costero presenta altos niveles de humedad y presencia de salinidad, factores que aceleran los procesos de corrosión y afectan componentes eléctricos, electrónicos y estructurales. A esto se suman condiciones de operación intensiva, asociadas a un servicio de transporte público urbano continuo, lo que incrementa el desgaste de los sistemas y reduce los márgenes de operación segura respecto de condiciones ideales.

De acuerdo con los principios de RCM II, el contexto operacional puede descomponerse en los siguientes elementos:

Perfil del negocio e historia:

Trolebuses de Chile S.A. es una empresa de transporte público eléctrico que opera bajo los lineamientos del Ministerio de Transportes y Telecomunicaciones, cumpliendo con los estándares exigidos por el Decreto N° 22 (2023), lo que implica altos niveles de exigencia en disponibilidad y continuidad del servicio (Ministerio de Transportes y Telecomunicaciones, 2023).

Ubicación geográfica:

La operación se desarrolla en la ciudad de Valparaíso, caracterizada por su geografía compleja, clima costero, alta humedad y presencia de salinidad, factores que influyen directamente en la degradación de componentes y en la frecuencia de fallas.

Proceso operacional:

El servicio corresponde al transporte urbano de pasajeros en recorridos con pendientes que pueden alcanzar hasta un 25 %, lo que exige un alto desempeño de los sistemas de tracción y frenado, así como una adecuada gestión térmica de los componentes eléctricos.

Figura 1-4. Daño estructural en módulo de batería de alta tensión.



Fuente: Registros de Vivipra, elaboración propia.

El bus eléctrico King Long XMQ6900G eTech (8,9 metros) posee una capacidad nominal aproximada de 22 pasajeros sentados, un espacio destinado a personas con movilidad reducida, tres asientos abatibles y una capacidad de 26 pasajeros de pie. No obstante, bajo condiciones reales de operación, se ha observado que los buses operan frecuentemente a plena carga e incluso en condiciones de sobreocupación, alcanzando entre 50 y 55 pasajeros por unidad.

Si bien el vehículo está diseñado para operar bajo condiciones de carga máxima, en el contexto particular de la ciudad de Valparaíso, caracterizado por pendientes pronunciadas y operación continua, esta condición genera un aumento significativo en las exigencias sobre los sistemas de tracción, suspensión y frenado. Asimismo, se produce un incremento del estrés térmico en componentes críticos como las baterías de tracción y el motor eléctrico, lo que puede afectar su desempeño, acelerar su degradación y aumentar la probabilidad de fallas en condiciones de operación exigente (King Long United Automotive Industry Co. Ltd., 2023).

Condiciones laborales:

La operación de la flota se desarrolla en turnos extendidos y bajo condiciones de alta demanda, lo que exige mantener niveles de disponibilidad mecánica cercanos al 100 %. Asimismo, el personal conductor debe cumplir con requisitos normativos específicos, siendo obligatorio contar con licencia de conducir profesional clase A2 vigente y una antigüedad mínima de dos años, lo que asegura un nivel adecuado de experiencia y competencias para la operación segura de buses eléctricos en condiciones exigentes de circulación urbana.

Factores ambientales:

Se consideran variables como la presencia de salitre, la humedad, las variaciones térmicas y las vibraciones producto de la irregularidad de la calzada, las cuales afectan la autonomía de los buses y aceleran el deterioro de sistemas mecánicos y eléctricos.

Políticas y normativa de mantenimiento:

El plan de mantenimiento definido por el fabricante se basa principalmente en criterios de kilometraje y condiciones estándar de operación, lo cual no representa completamente las exigencias reales del entorno de Valparaíso. Esta situación genera la necesidad de adaptar las estrategias de mantenimiento mediante metodologías basadas en confiabilidad, como RCM (SAE International, 2009).

En términos de desempeño, se ha observado que las baterías presentan una degradación estimada entre un 1 % y un 2 % anual, lo cual se encuentra dentro de rangos aceptables y permite proyectar una vida útil entre 10 y 15 años. Sin embargo, el principal desafío operacional radica en mejorar el tiempo medio entre fallas (MTBF) y reducir la ocurrencia de fallas no planificadas en sistemas críticos, con el fin de asegurar la continuidad del servicio y optimizar los costos de mantenimiento.

En este contexto, resulta fundamental comprender que las condiciones reales de operación difieren significativamente de los supuestos de diseño del fabricante, lo que impacta directamente en la confiabilidad del sistema. Por lo tanto, la correcta caracterización del contexto operacional constituye una etapa clave para la aplicación del Mantenimiento Centrado en la Confiabilidad, permitiendo definir estrategias de mantenimiento alineadas con las condiciones reales de servicio.

1.4.DESCRIPCIÓN DE LA FLOTA Y SISTEMAS PRINCIPALES

La flota analizada en el presente estudio corresponde a 38 buses eléctricos modelo XMQ6900G, fabricados por la empresa King Long y operados por Trolebuses de Chile S.A. en la ciudad de Valparaíso. Estos vehículos constituyen el activo principal del sistema de transporte eléctrico urbano y representan el foco del análisis para la aplicación de la metodología de Mantenimiento Centrado en la Confiabilidad (RCM).

Los buses poseen una longitud aproximada de 8,99 metros y un ancho de 2,45 metros, con un peso bruto cercano a los 14.000 kg. Están equipados con baterías de litio-ferrofosfato (LiFePO_4) con una capacidad de 228,9 kWh, lo que les permite alcanzar una autonomía aproximada de 100 km en condiciones estándar de operación. Asimismo, cuentan con un motor síncrono de imán permanente, capaz de entregar un alto torque desde bajas revoluciones, característica fundamental para enfrentar las exigencias topográficas propias de la ciudad de Valparaíso (King Long United Automotive Industry Co. Ltd., 2023).

Desde el punto de vista funcional, los buses eléctricos deben ser comprendidos como sistemas complejos compuestos por múltiples subsistemas interrelacionados, cuyo desempeño conjunto determina la confiabilidad global del vehículo. En este contexto, la correcta identificación y clasificación de estos sistemas resulta fundamental para el desarrollo del análisis de confiabilidad, ya que permite establecer los límites del sistema, definir sus funciones y facilitar la posterior identificación de fallas funcionales y modos de falla en el marco de la metodología RCM (SAE International, 2009).

Estos sistemas interactúan de manera integrada, donde la falla de uno puede afectar el desempeño global del vehículo, lo que refuerza la necesidad de un enfoque de mantenimiento basado en confiabilidad.

A continuación, se presentan los principales sistemas que componen el bus eléctrico King Long XMQ6900G:

Sistema de propulsión eléctrica

Encargado de transformar la energía eléctrica en energía mecánica para el desplazamiento del vehículo. Incluye el motor eléctrico, el inversor de potencia y los elementos de transmisión.

Sistema de almacenamiento de energía (alta tensión)

Responsable de almacenar la energía eléctrica necesaria para la operación del bus. Está compuesto por módulos de baterías de litio-ferrofosfato (LiFePO_4), el sistema de gestión de baterías (BMS) y el cableado de alta tensión.

Figura 1-5. Configuración interna de módulos de batería LiFePO_4 .



Fuente: Registros de Vivipra, elaboración propia.

Sistema térmico

Encargado de regular la temperatura de los componentes críticos, tales como baterías, motor e inversor, evitando sobrecalentamientos y asegurando condiciones óptimas de operación.

Sistema eléctrico de baja tensión

Sistema encargado de alimentar los dispositivos auxiliares del bus, tales como iluminación, sistemas de control, climatización y otros equipos, mediante el uso de un convertidor DC/DC.

Sistema de control electrónico

Compuesto por la unidad de control del vehículo (VCU), sensores y la red de comunicación CAN bus, permitiendo la supervisión, control y diagnóstico en tiempo real de los distintos sistemas del vehículo.

Sistema de frenado

Integrado por frenos neumáticos, freno regenerativo y freno de estacionamiento, contribuyendo tanto a la seguridad del vehículo como a la eficiencia energética mediante la recuperación de energía.

Sistema neumático

Sistema encargado de generar y distribuir aire comprimido para la operación de distintos subsistemas del vehículo, tales como frenos y suspensión. Su correcto funcionamiento es fundamental para garantizar la seguridad y estabilidad del bus.

Sistema de suspensión

Sistema de suspensión neumática controlada electrónicamente (ECAS), cuya función es mantener la estabilidad del vehículo, absorber irregularidades del terreno y mejorar el confort de los pasajeros.

Sistema de dirección

Sistema de dirección asistida electrohidráulica que permite facilitar la maniobrabilidad del vehículo en condiciones de operación urbana exigente.

Sistema estructural (chasis y carrocería)

Incluye la estructura principal del vehículo, la carrocería, los sistemas de acceso, puertas y elementos estructurales, los cuales garantizan la integridad física del bus y la seguridad de los pasajeros.

Sistema de seguridad

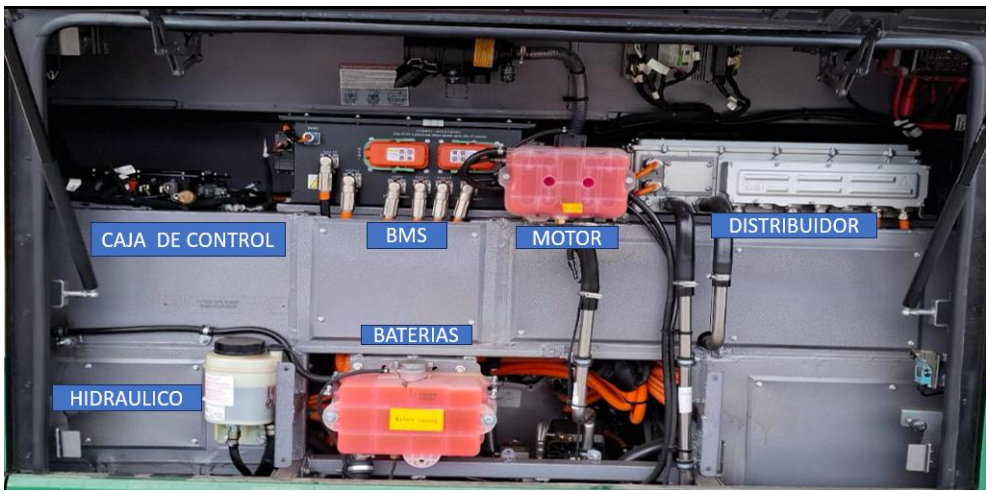
Comprende los dispositivos destinados a la protección de los pasajeros y del vehículo, tales como cámaras de vigilancia, sistemas de protección contra incendios y otros elementos de seguridad operativa.

Sistema de rodadura

Incluye ruedas, neumáticos y ejes, siendo responsable del contacto con la calzada y de soportar las cargas operacionales del vehículo.

La identificación y clasificación de estos sistemas permite establecer una base estructurada para el análisis de criticidad que se desarrollará en los capítulos siguientes, considerando al bus eléctrico como un sistema complejo compuesto por subsistemas interdependientes. En este sentido, cada uno de estos sistemas presenta distintos niveles de impacto en la operación, seguridad y costos, lo que hace necesario evaluarlos bajo criterios de confiabilidad para determinar aquellos que requieren un análisis detallado mediante la metodología RCM.

Figura 1-6. Vista general del sistema de baterías de alta tensión del bus eléctrico.



Fuente: Registros de Vivipra, elaboración propia.

1.5.SISTEMA DE CARGA E INFRAESTRUCTURA ENERGÉTICA

La operación de la flota de buses eléctricos de Trolebuses de Chile S.A. se encuentra respaldada por la infraestructura de carga ubicada en el Centro de Carga de Placilla, la cual permite el abastecimiento energético de los vehículos y la continuidad del servicio.

El sistema de carga corresponde a una configuración de carga rápida tipo *split*, compuesta por tres gabinetes de potencia (*Power Cabinet*), cada uno con una capacidad de 360 kW, conectados a dispensadores de carga tipo StarCharger modelo Triton, totalizando múltiples puntos de carga para la flota.

Este sistema permite la distribución dinámica de la potencia entre los buses conectados, de modo que cada unidad puede recibir una potencia variable en función de la demanda simultánea, lo que influye directamente en los tiempos de carga y en la planificación operacional del sistema.

Desde el punto de vista operativo, la infraestructura de carga constituye un elemento fundamental para el funcionamiento del sistema de transporte eléctrico, ya que permite asegurar la disponibilidad energética de los buses durante la jornada de operación, siendo un factor crítico para la continuidad del servicio (Ministerio de Transportes y Telecomunicaciones, 2023).

No obstante, para efectos del presente estudio, el análisis de confiabilidad y la aplicación de la metodología de Mantenimiento Centrado en la Confiabilidad (RCM) se enfocarán exclusivamente en los sistemas del bus eléctrico King Long XMQ6900G, considerando la infraestructura de carga únicamente como parte del contexto operacional del sistema.

Figura 1-7. Sistema de carga Triton.



Fuente: Elaboración propia, registro fotográfico en terreno.

1.6. SELECCIÓN DEL SISTEMA CRÍTICO MEDIANTE ANÁLISIS DE CRITICIDAD JACK-KNIFE

Existen diversas herramientas que permiten visualizar de manera gráfica dónde se concentran los problemas más relevantes dentro de un sistema. Estas herramientas sirven como apoyo para identificar en qué elementos es necesario concentrar los recursos de mantenimiento, facilitando la toma de decisiones orientadas a mejorar la confiabilidad y disponibilidad operacional (Moubray, 1997).

Esta perspectiva, utilizada para jerarquizar sistemas, subsistemas o componentes dentro de un activo, considera el impacto directo sobre la operación en términos de disponibilidad esperada y tiempos de detención. Existen distintos métodos de jerarquización basados en indicadores de confiabilidad y mantenibilidad, los cuales permiten establecer prioridades tanto a nivel de sistemas como de modos de falla (SAE International, 2009).

Una de las estrategias más utilizadas en la industria para el diseño de planes de mantenimiento es el Mantenimiento Centrado en la Confiabilidad (RCM). Esta metodología permite determinar las necesidades reales de mantenimiento de un activo físico en su contexto operacional, identificando sus funciones, las formas en que estas pueden fallar y estableciendo tareas de mantenimiento preventivo efectivas. El enfoque RCM se basa en un proceso sistemático que permite definir actividades específicas de mantenimiento y sus frecuencias de ejecución, mediante el análisis de los modos de falla y su impacto en la operación (SAE International, 2009); (Moubray, 1997).

Como herramienta complementaria para la priorización de sistemas, se utiliza el método de análisis de criticidad Jack-Knife, el cual corresponde a un estudio multicriterio que considera variables como la frecuencia de fallas, el tiempo fuera de servicio y el tiempo medio de reparación (MTTR). Este método se representa mediante un diagrama de dispersión, donde cada eje corresponde a una variable de análisis. En el caso del presente estudio, el eje X representa la frecuencia de fallas, mientras que el eje Y corresponde al tiempo medio de reparación.

El diagrama Jack-Knife se construye a partir de valores promedio de las variables analizadas, generando cuatro cuadrantes que permiten clasificar los sistemas en función de su comportamiento:

- Sistemas con fallas agudas, caracterizados por altos tiempos de reparación.
- Sistemas con fallas crónicas, que presentan alta frecuencia, pero bajo impacto.
- Sistemas agudos/crónicos, que combinan alta frecuencia y alto tiempo de reparación.
- Sistemas bajo control, con baja frecuencia y bajo impacto operacional.

En el presente estudio, el análisis se aplica a los sistemas que componen el bus eléctrico King Long XMQ6900G, operado por Trolebuses de Chile S.A., utilizando como base el historial de fallas de la flota.

Tabla 1-1: Número de fallas y tiempos de detención por sistema.

Sistemas Bus Eléctrico	FALLAS	TIEMPO DE PARADA DE SERVICIO (horas)	MTTR
Sistema estructural (chasis y carrocería)	21	115,5	5,50
Sistema de Suspensión	20	150	7,50
Sistema Frenos	4	37	9,25
Sistema de Propulsión eléctrica	1	16	16,00
Sistema de Baterías (Alta tensión)	40	644	16,10
Sistema Eléctrico baja tensión	11	17,5	1,59
Sistema de control electrónico	1	16	16,00
Sistema Neumático	21	122,5	5,83
Sistema Térmico	38	95	2,50
Sistema de seguridad	3	17	5,67
Sistema de rodadura	228	450	1,97
Sistema de dirección	2	12	6,00

Fuente: Elaboración propia a partir del historial 2025.

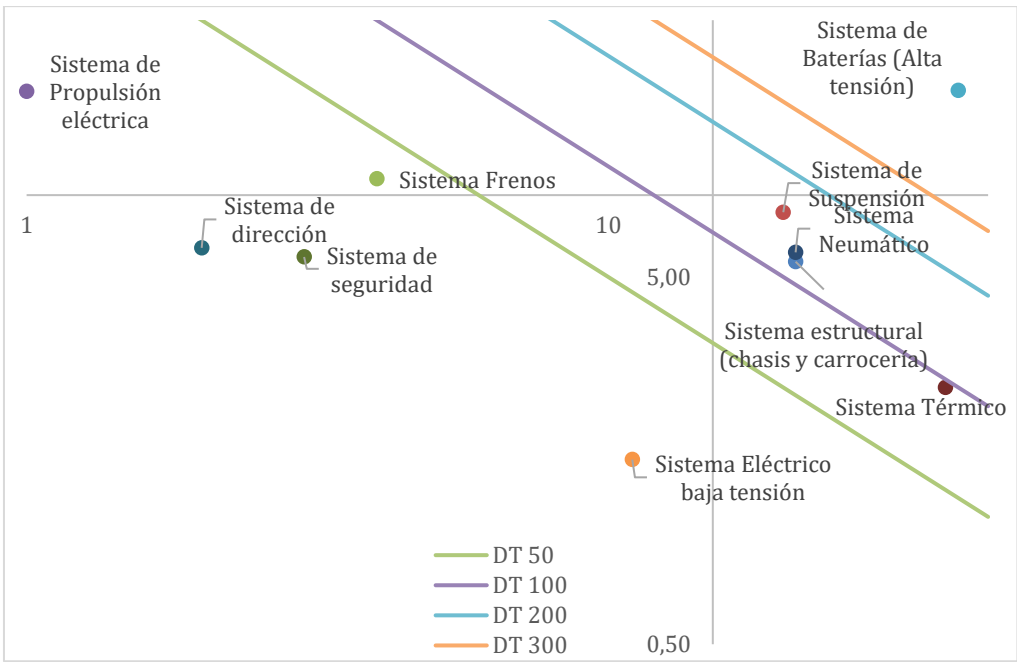
En la Tabla 1-1 se presentan los sistemas del bus eléctrico junto con el número de fallas registradas, el tiempo total de detención y el tiempo medio de reparación (MTTR). Este último indicador representa el tiempo promedio requerido para restablecer el sistema a condiciones normales de operación, incluyendo actividades de diagnóstico, reparación y puesta en servicio.

Desde el punto de vista de la gestión del mantenimiento, se busca que el MTTR sea lo más bajo posible, ya que valores elevados implican una mayor indisponibilidad del sistema. Este indicador puede verse influenciado por factores como la complejidad del

sistema, la disponibilidad de repuestos, la experiencia del personal técnico y las condiciones operacionales en las que se realizan las intervenciones.

A partir de estos datos, se construye el diagrama de criticidad Jack-Knife, el cual permite analizar conjuntamente la frecuencia de fallas y el tiempo medio de reparación, facilitando la identificación de los sistemas que presentan mayor impacto en la operación.

Gráfico 1-1. Diagrama Jack-Knife de criticidad de sistemas del bus eléctrico.



Fuente: Elaboración propia.

Del análisis del diagrama Jack-Knife se observa que el sistema de baterías de alta tensión se ubica en el cuadrante de mayor criticidad, caracterizado por presentar una alta frecuencia de fallas y un elevado tiempo medio de reparación. Esta condición lo clasifica como un sistema de comportamiento agudo/crónico, debido a su impacto directo en la disponibilidad del bus y en la continuidad operacional del servicio.

Por otra parte, sistemas como la suspensión y el sistema neumático presentan una frecuencia de fallas relevante junto con tiempos de reparación moderados, lo que indica la necesidad de una adecuada gestión de mantenimiento preventivo.

En contraste, el sistema de rodadura, si bien presenta la mayor cantidad de fallas registradas, posee un bajo tiempo medio de reparación, lo que reduce significativamente su impacto en la indisponibilidad del sistema. Esta condición permite clasificarlo como un sistema de comportamiento frecuente, pero de bajo impacto operacional.

En función de lo anterior, se selecciona el sistema de baterías de alta tensión como el sistema crítico del bus eléctrico, el cual será objeto de análisis detallado mediante la

metodología de Mantenimiento Centrado en la Confiabilidad (RCM) en los capítulos siguientes.

Esta selección se fundamenta en criterios técnicos y operacionales, asegurando que los esfuerzos de mantenimiento se enfoquen en el sistema de mayor impacto en la confiabilidad del bus.

CAPÍTULO 2: ANÁLISIS DE CONFIABILIDAD DEL SISTEMA DE BATERÍAS
MEDIANTE METODOLOGÍA FMECA

2.1. ANÁLISIS DE MODOS DE FALLA

Una vez identificado el sistema crítico en el capítulo anterior, correspondiente al sistema de baterías de alta tensión del bus eléctrico, se procede a analizar los componentes que lo conforman, con el objetivo de evaluar su impacto en la confiabilidad y disponibilidad operacional del sistema.

El sistema de baterías corresponde a uno de los subsistemas más relevantes del bus eléctrico King Long XMQ6900G, operado por Trolebuses de Chile S.A., ya que es el encargado de almacenar y suministrar la energía necesaria para la operación del sistema de propulsión. Su correcto funcionamiento resulta fundamental para garantizar la autonomía del vehículo y la continuidad del servicio (King Long United Automotive Industry Co. Ltd., 2023).

Para el desarrollo del análisis, se realiza una descomposición estructurada del sistema, identificando sus principales componentes, tales como módulos de baterías, sistema de gestión de baterías (BMS), sistema de refrigeración, conexiones de alta tensión y sistemas de protección eléctrica.

Dentro de estos componentes, el sistema de refrigeración adquiere especial relevancia, debido a su influencia directa en el control térmico de las baterías, siendo un factor determinante en la ocurrencia de fallas críticas observadas en la operación de la flota.

Esta descomposición permite establecer una base técnica adecuada para la aplicación de la metodología FMECA.

Con el fin de analizar los modos de falla y sus efectos sobre la operación, se emplea la metodología de Mantenimiento Centrado en la Confiabilidad (RCM), la cual corresponde a un proceso sistemático orientado a asegurar que los activos continúen cumpliendo sus funciones en su contexto operacional (SAE International, 2009); (Moubray, 1997). En este contexto, el análisis FMECA permite identificar los modos de falla, sus causas y consecuencias, facilitando la priorización de acciones de mantenimiento en función del riesgo asociado.

Para la evaluación de los componentes del sistema de baterías, se consideran los siguientes criterios:

- Frecuencia de fallas (FF)
- Tiempo de reparación (TR)
- Impacto en la función (IF)
- Impacto en seguridad, higiene y medio ambiente (SHA)
- Costo de reparación (CR)

A partir de estos criterios, se determina un Índice de Criticidad (IC), el cual permite establecer un orden jerárquico de importancia entre los componentes del sistema, identificando aquellos que presentan mayor impacto en la operación.

Ecuación 2.1. Índice de criticidad

$$IC = FF \times (TR + SHA + CR + IF)$$

Este índice permite integrar la probabilidad de ocurrencia de la falla con la severidad de sus consecuencias, constituyendo un criterio fundamental para la priorización de componentes dentro del análisis de confiabilidad.

Para la cuantificación del índice de criticidad, se establecen escalas de evaluación para cada uno de los criterios considerados, las cuales permiten asignar valores numéricos en función de la severidad y frecuencia de las fallas observadas.

Tabla 2-1. Escala de frecuencia de fallas (FF).

Escala	Frecuencia de Fallas (FF)
5	≥ 30 eventos en el período analizado de la flota.
4	10-29 eventos en el período analizado de la flota.
3	4-9 eventos en el período analizado de la flota.
2	1-3 eventos en el período analizado de la flota.
1	0 eventos en el período analizado de la flota.

Fuente: Elaboración propia.

Tabla 2-2. Escala de Tiempo de Reparación (TR).

Escala	TR (Tiempo de Reparación)
5	Más de 24 horas de intervención o inmovilización prolongada del bus.
4	Entre 8 y 24 horas de intervención.
3	Entre 4 y 8 horas de intervención.
2	Entre 1 y 4 horas de intervención.
1	Menor a 1 hora de intervención.

Fuente: Elaboración propia.

Tabla 2-3. Escala de Impacto en Seguridad, Higiene y Medio Ambiente (SHA).

Escala	Impacto en Seguridad, Higiene y Medio Ambiente (SHA)
5	La falla puede provocar accidente grave o fatal, incendio, electrocución, pérdida total de control del bus o daño ambiental severo. Implica alto riesgo para pasajeros, conductor, terceros o medio ambiente.
4	La falla genera un riesgo significativo para la seguridad operacional, con alta probabilidad de incidente, lesión importante o incumplimiento normativo relevante.
3	La falla produce una condición insegura controlable, con posibilidad de incidente menor, afectación operativa con riesgo acotado o impacto ambiental limitado.
2	La falla tiene bajo impacto en seguridad, higiene o ambiente. No compromete gravemente a las personas ni genera consecuencias ambientales importantes.
1	La falla no presenta impacto apreciable en seguridad, higiene ni ambiente.

Fuente: Elaboración propia.

Tabla 2-4. Escala de Costo de Reparación (CR).

Escala	COSTO DE REPARACIÓN (CR)
5	Mayor a US\$ 1.500
4	Entre US\$ 500 y US\$ 1.500
3	Entre US\$ 150 y US\$ 500
2	Entre US\$ 50 y US\$ 150
1	Menor a US\$ 50

Fuente: Elaboración propia.

Tabla 2-5. Escala de Impacto en la Función (IF).

Escala	Impacto en la Función (IF)
5	La falla impide totalmente la operación del bus y provoca salida inmediata de servicio.
4	La falla permite operación muy limitada o condicionada, con alta probabilidad de retiro de servicio.
3	La falla reduce la capacidad operativa del bus, pero permite continuar operando de forma parcial.
2	La falla afecta funciones secundarias o de confort, sin impedir la operación normal del bus.
1	La falla no genera impacto relevante en la operación ni en la función principal del bus

Fuente: Elaboración propia.

Estas escalas permiten estandarizar la evaluación de los componentes del sistema, facilitando la comparación entre ellos y asegurando un criterio homogéneo en la determinación del índice de criticidad.

A partir de la aplicación de estas escalas, se obtiene el Índice de Criticidad para cada componente del sistema de baterías, lo cual permite clasificar su nivel de riesgo y priorizar aquellos elementos que requieren un análisis más detallado.

Este proceso constituye la etapa inicial del análisis FMECA, ya que permite focalizar los esfuerzos de mantenimiento en los componentes que presentan mayor probabilidad de falla y mayores consecuencias asociadas, asegurando así una adecuada gestión del mantenimiento.

Una vez obtenido el valor del Índice de Criticidad (IC), se procede a su clasificación mediante una matriz de criticidad basada en la relación entre la frecuencia de fallas y la consecuencia de estas.

En este contexto, la consecuencia de la falla está determinada por la suma de los criterios de tiempo de reparación (TR), impacto en seguridad, higiene y medio ambiente (SHA), costo de reparación (CR) e impacto en la función (IF), mientras que la frecuencia de fallas (FF) corresponde a la ocurrencia registrada en el período analizado.

La matriz de criticidad se construye a partir de la combinación entre la frecuencia de fallas y la consecuencia asociada, permitiendo clasificar los componentes en distintos niveles de riesgo.

En función de esta matriz, los componentes se clasifican en los siguientes niveles:

- Bajo (B)
- Medio (M)
- Alto (A)
- Muy Alto (MA)

Esta clasificación permite identificar los componentes más críticos del sistema de baterías, facilitando la toma de decisiones en la etapa posterior del análisis FMECA, donde se profundizará en los modos de falla de los elementos de mayor impacto operacional y se establecerán estrategias de mantenimiento orientadas a mejorar la confiabilidad del sistema.

Figura 2-1. Matriz de criticidad (Frecuencia de fallas vs. consecuencia).

Frecuencia	5	A	A	MA	MA	MA
	4	M	M	A	A	MA
	3	M	M	M	A	MA
	2	B	B	B	M	A
	1	B	B	B	M	A
		1	2	3	4	5
		Consecuencias				

Fuente: Elaboración propia en base a matriz de criticidad adaptada al sistema de baterías de la flota KingLong XMQ6900G.

2.2. CLASIFICACIÓN DE COMPONENTES CRÍTICOS SEGÚN VALOR DEL ÍNDICE DE CRITICIDAD (IC)

Una vez identificados los componentes que conforman los distintos sistemas del bus eléctrico, se procede a su evaluación mediante el cálculo del Índice de Criticidad (IC), con el objetivo de determinar aquellos elementos que presentan mayor impacto en la confiabilidad y disponibilidad operacional del sistema.

Si bien el análisis considera todos los sistemas del bus eléctrico, se pone especial énfasis en el sistema de baterías de alta tensión, identificado previamente como el sistema crítico del estudio.

Para ello, se realizó una identificación detallada de los componentes asociados a cada sistema del bus eléctrico KingLong XMQ6900G, calculando el valor del IC en función de los criterios definidos previamente. Posteriormente, los componentes fueron clasificados según su nivel de criticidad, permitiendo establecer una jerarquización técnica de los elementos más relevantes.

A continuación, se presenta la Tabla 2-6, la cual muestra los valores de Índice de Criticidad obtenidos para los distintos componentes del bus eléctrico, agrupados por sistema.

Esta descomposición permite establecer una base técnica adecuada para la aplicación de la metodología FMECA.

Con el fin de analizar los modos de falla y sus efectos sobre la operación, se emplea la metodología de Mantenimiento Centrado en la Confiabilidad (RCM), la cual corresponde a un proceso sistemático orientado a asegurar que los activos continúen cumpliendo sus funciones en su contexto operacional (SAE International, 2009); (Moubray, 1997). En este contexto, el análisis FMECA permite identificar los modos de falla, sus causas y consecuencias, facilitando la priorización de acciones de mantenimiento en función del riesgo asociado.

Para la evaluación de los componentes del sistema de baterías, se consideran los siguientes criterios:

Tabla 2-6. Extracto de Índice de criticidad de componentes del bus eléctrico

Sistemas	Componentes de Bus Eléctrico XMQ6900G	IC
Sistema de Suspensión	Bujes de goma	44
	Rótulas	42
	Sistema modulo ECAS	34
	fuelle de suspensión neumática	26
	Barra estabilizadora	24
	Brazos de suspensión	16
	Válvulas niveladoras	14
	Tuberías neumáticas de suspensión	12
	Racores y conexiones	12
	Amortiguadores	11
Sistema de Baterías (Alta tensión)	Sistema de refrigeración de baterías	90
	Pack de baterías	40
	Módulos de batería	20
	Celdas	20
	BMS (Battery Management System)	18
	Cableado de alta tensión	18
	Conectores HV	16
	Sensores de temperatura	12
SISTEMA DE RODADURA	Neumáticos Triangular	75
Sistema Térmico	tapa de depósito de expansión	50
	Bombas de refrigeración	14
	Intercambiadores de calor	14
	Radiadores	13
	Compresor de aire acondicionado	13
	Sistema HVAC	12
	Ventiladores	10

Fuente: Elaboración propia en base a la identificación y evaluación de componentes del bus eléctrico KingLong XMQ6900G.

Del análisis de los resultados obtenidos, se observa que los componentes con mayor Índice de Criticidad se concentran principalmente en el sistema de baterías de alta tensión, destacando particularmente el sistema de refrigeración de baterías, el cual presenta el valor más alto de criticidad (IC = 90).

Este resultado confirma lo observado en el análisis de criticidad del Capítulo 1, donde el sistema de baterías fue identificado como el subsistema de mayor impacto operacional.

Con el fin de profundizar el análisis, se seleccionan los componentes más críticos del sistema de baterías, los cuales serán objeto de estudio detallado en la etapa posterior del análisis FMECA.

Tabla 2-7. Componentes más críticos del sistema de baterías

Sistemas	Componentes de Bus Eléctrico XMQ6900G	IC
Sistema de Baterías (Alta tensión)	Sistema de refrigeración de baterías	90
	Pack de baterías	40
	Módulos de batería	20
	Celdas	20
	BMS (Battery Management System)	18
	Cableado de alta tensión	18
	Conectores HV	16
	Sensores de temperatura	12

Fuente: Elaboración propia.

En función de estos resultados, se determina que los componentes críticos pertenecen principalmente al sistema de baterías, específicamente aquellos asociados a la gestión térmica y almacenamiento de energía.

El sistema de refrigeración de baterías cumple un rol fundamental en el control de temperatura de las celdas, evitando condiciones de sobrecalentamiento que pueden generar degradación acelerada, pérdida de capacidad, fallas operacionales e incluso riesgos de seguridad. Por esta razón, su alto valor de criticidad lo posiciona como un elemento clave dentro del análisis de confiabilidad.

En este contexto, el desarrollo de la metodología RCM (Reliability Centered Maintenance) y el análisis FMECA (Failure Modes, Effects and Criticality Analysis) se enfocarán en el sistema de baterías de alta tensión, con especial énfasis en el sistema de refrigeración, con el fin de identificar los modos de falla más relevantes, evaluar sus efectos sobre la operación y definir estrategias de mantenimiento orientadas a mejorar la confiabilidad, reducir fallas críticas y asegurar la continuidad del servicio.

2.3.DESCRIPCIÓN DEL SISTEMA CRÍTICO

El sistema de baterías de alta tensión del bus eléctrico King Long XMQ6900G, operado por Trolebuses de Chile S.A., constituye el núcleo principal del sistema de almacenamiento de energía del vehículo, siendo el encargado de suministrar la energía eléctrica necesaria para la operación del sistema de propulsión.

Su principio de funcionamiento se basa en el almacenamiento y liberación de energía mediante baterías de litio-ferrofosfato (LiFePO_4), las cuales permiten alimentar el motor eléctrico a través de un sistema de conversión y control. Este tipo de tecnología presenta ventajas en términos de seguridad, estabilidad térmica y vida útil, siendo ampliamente utilizada en aplicaciones de transporte eléctrico (King Long United Automotive Industry Co. Ltd., 2023).

El sistema está compuesto principalmente por módulos de baterías, celdas individuales, sistema de gestión de baterías (BMS), cableado de alta tensión, conectores eléctricos y un sistema de refrigeración, el cual cumple un rol fundamental en el control térmico del conjunto.

Dentro de estos componentes, el sistema de refrigeración de baterías corresponde al elemento más crítico, siendo el encargado de mantener la temperatura de operación dentro de rangos seguros, evitando condiciones de sobrecalentamiento que puedan afectar el desempeño, la vida útil o la seguridad del sistema. Este comportamiento es consistente con los resultados obtenidos en el análisis de criticidad desarrollado previamente, donde este componente presentó el mayor Índice de Criticidad.

Este sistema utiliza un circuito cerrado de refrigeración con líquido tipo coolant 50/50 de la marca Mobil, con un volumen aproximado de 10 litros, el cual circula a través de intercambiadores de calor y conductos internos, permitiendo disipar la energía térmica generada durante la operación.

Durante condiciones normales de funcionamiento, la temperatura de operación de las baterías se mantiene bajo los 29 °C. Sin embargo, al superar este umbral, el sistema comienza a detectar condiciones de sobrecalentamiento, lo que puede derivar en reducción del rendimiento, activación de protecciones o detención del vehículo.

Figura 2-2. Sistema de baterías y refrigeración del bus eléctrico.



Fuente: Elaboración propia.

Tabla 2-8. Características del sistema de baterías de alta tensión.

Parámetro	Valor	Unidad	Observación técnica
Tipo de batería	Litio-ferrofosfato (LiFePO ₄)	—	Alta estabilidad térmica
Fabricante de baterías	CATL	—	Líder en baterías para electromovilidad
Capacidad energética total	228,91	KWh	Energía total del sistema
Configuración de baterías	8 packs (2 series de 4)	—	Distribución del sistema
Voltaje por celda	3,22	V	Valor nominal
Número de celdas	38	—	Por módulo
Voltaje grupo de baterías	502	V	Sistema de alta tensión
Capacidad del grupo	456	Ah	Capacidad total del sistema
Capacidad por batería	125,5 V – 228 Ah	—	Especificación por unidad
Tipo de refrigerante	Coolant 50/50 Mobil	—	Fluido de transferencia térmica
Volumen de refrigerante	10	L	Circuito de enfriamiento
Temperatura máxima de operación	29	°C	Límite antes de sobrecalentamiento

Fuente: Elaboración propia en base a especificaciones técnicas del sistema.

Durante la operación del bus, el sistema de baterías trabaja en condiciones exigentes debido a factores como pendientes pronunciadas, alta carga de pasajeros y ciclos continuos de aceleración y frenado, lo que genera una elevada demanda energética y, consecuentemente, un aumento en la generación de calor.

En condiciones de falla, particularmente asociadas al sistema de refrigeración, pueden producirse incrementos de temperatura no controlados, impactando directamente en el rendimiento del sistema. Esto puede provocar degradación acelerada de las baterías, reducción de autonomía e incluso la detención total del vehículo por activación de sistemas de protección.

Adicionalmente, este tipo de fallas puede representar riesgos relevantes para la seguridad, tales como eventos térmicos críticos, afectando tanto la operación como la integridad del sistema.

En este contexto, el sistema de baterías, y en particular su sistema de refrigeración se posiciona como uno de los elementos más relevantes en la operación del bus eléctrico, ya que su correcto funcionamiento impacta directamente en la disponibilidad operacional, la seguridad y la continuidad del servicio, justificando su análisis detallado mediante la metodología FMECA en las secciones siguientes.

2.4. ANÁLISIS FMECA DEL SISTEMA

2.4.1. METODOLOGIA RCM

El proceso de Mantenimiento Centrado en la Confiabilidad (RCM) propone responder siete preguntas básicas acerca de los activos o sistemas que se analizarán (SAE International, 2009); (Moubray, 1997):

- ¿Cuáles son las funciones y los parámetros de funcionamiento asociados al activo en su actual contexto operacional?
- ¿De qué manera falla en satisfacer dichas funciones?
- ¿Cuál es la causa de cada falla funcional?
- ¿Qué sucede cuando ocurre una falla?
- ¿En qué sentido es importante cada falla?
- ¿Qué puede hacerse para prevenir o predecir cada falla?
- ¿Qué debe hacerse si no se encuentra una tarea proactiva adecuada?

A medida que se desarrolla el análisis RCM, se utilizan distintas técnicas para responder estas preguntas de manera estructurada. Para dar respuesta a las primeras cinco preguntas, se emplea el FMECA (Failure Modes, Effects and Criticality Analysis) o Análisis de Modos de Falla, Efectos y Criticidad, el cual se aplicará al sistema crítico seleccionado, correspondiente al sistema de baterías de alta tensión del bus eléctrico King Long XMQ6900G, con especial énfasis en su sistema de refrigeración.

Sin embargo, para comprender adecuadamente la aplicación del FMECA, es necesario definir previamente algunos conceptos fundamentales que permitan desarrollar el análisis de forma correcta y consistente.

2.4.2. DEFINICIÓN DE FUNCIÓN

Para definir un mantenimiento coherente con los requerimientos de la organización respecto de sus activos, es necesario comprender qué se espera que el activo realice y cómo preservar ese objetivo en condiciones reales de operación. En este contexto, una función corresponde al propósito o rol que un activo desempeña dentro de un sistema, definido en términos de lo que debe hacer y bajo qué condiciones de desempeño debe operar.

Por ello, las funciones del sistema deben describirse considerando no solo su propósito nominal, sino también los parámetros de operación y el contexto operacional en el cual se desempeña. Si bien las definiciones de función generalmente comienzan con un verbo, en el marco del RCM también es necesario precisar el nivel de desempeño requerido según las condiciones reales de servicio.

En el presente estudio, la definición de funciones se aplicará al sistema de baterías de alta tensión y a su sistema de refrigeración, considerando las exigencias operacionales propias de la flota de buses eléctricos de Trolebuses de Chile S.A., tales como pendientes pronunciadas, operación continua, sobrecarga de pasajeros y condiciones ambientales costeras.

En este contexto, se definen las siguientes funciones del sistema de baterías y su sistema de refrigeración:

- Almacenar energía eléctrica en condiciones seguras para la operación del bus.
- Suministrar energía eléctrica de manera continua al sistema de propulsión.
- Mantener la temperatura de operación del sistema de baterías dentro de rangos seguros ($\leq 29^{\circ}\text{C}$).
- Disipar el calor generado durante la operación mediante el sistema de refrigeración.
- Monitorear y controlar las variables térmicas a través del sistema BMS.

2.4.3. FALLAS FUNCIONALES

El límite entre una falla y un funcionamiento aceptable está definido por el estándar de desempeño que la organización haya establecido para el activo.

En este contexto, una falla funcional se define como la incapacidad de un activo o sistema para cumplir una función dentro de un parámetro de funcionamiento aceptable para el usuario u operador. Por lo tanto, una falla funcional no necesariamente implica la detención total del sistema, sino también cualquier condición en la que este no cumpla de forma adecuada con su propósito.

Las fallas funcionales dependen directamente del contexto operacional. En consecuencia, no deben generalizarse de igual forma para activos idénticos que operan en condiciones distintas. En el caso de la flota analizada, las fallas funcionales del sistema de baterías y de su sistema de refrigeración deben evaluarse de acuerdo con las exigencias reales de operación de los buses eléctricos en la ciudad de Valparaíso.

En este estudio, las fallas funcionales estarán asociadas principalmente a:

- Pérdida de capacidad de almacenamiento de energía.
- Suministro insuficiente de energía al sistema de propulsión.
- Incapacidad de mantener la temperatura dentro de rangos seguros.
- Disminución en la eficiencia del sistema de refrigeración.

2.4.4. MODOS DE FALLAS

El modo de falla se define como cualquier evento que causa una falla funcional. Para desarrollar un análisis adecuado, es necesario identificar y registrar todas las fallas funcionales del sistema y, a su vez, todos los modos de falla que pueden originarlas.

La importancia de determinar los modos de falla radica en que permite desarrollar un mantenimiento proactivo. Tratar las fallas una vez ocurridas corresponde a un enfoque reactivo; en cambio, identificar los eventos que pueden originarlas antes de que ocurran permite anticiparse a sus consecuencias y definir tareas de mantenimiento más efectivas.

En este sentido, las tareas de mantenimiento se gestionan a nivel de modo de falla, por lo que estos deben ser definidos con el suficiente nivel de detalle para establecer una adecuada política de mantenimiento.

En el presente trabajo, los modos de falla se identifican en relación con los componentes del sistema de baterías de alta tensión, considerando especialmente aquellos asociados al sistema de refrigeración, el cual presenta el mayor valor de criticidad dentro del sistema analizado.

En este contexto, se identifican los siguientes modos de falla principales:

- Deterioro o ruptura de mangueras del sistema de refrigeración.
- Desgaste o falla de la bomba de circulación de refrigerante.
- Obstrucciones en el circuito de refrigeración.
- Fallas en sensores de temperatura.
- Fallas en el sistema de control térmico (BMS).
- Fallas en ventiladores o elementos de disipación térmica.

2.4.5. EFFECTOS DE FALLAS

El siguiente paso dentro del proceso RCM consiste en describir lo que ocurre en el activo o sistema cuando se presenta un modo de falla. A esto se le denomina efecto de falla.

El efecto de falla debe describir con precisión las consecuencias inmediatas del evento, incluyendo toda la información necesaria para posteriormente evaluar su importancia. Entre estos antecedentes se puede incluir la evidencia de la falla, la forma en que afecta a la operación, los riesgos que puede generar para las personas o el medio ambiente, los daños físicos asociados y las acciones correctivas necesarias para restablecer el funcionamiento.

En el caso del sistema de baterías, los efectos de falla pueden manifestarse como aumento anormal de temperatura, reducción de autonomía, activación de protecciones, limitación de potencia o detención total del bus, dependiendo del componente afectado y de la severidad del evento.

Estos efectos permiten dimensionar el impacto operacional de cada modo de falla, constituyendo la base para la evaluación de criticidad dentro del análisis FMECA.

2.4.6. CUANTIFICACIÓN DEL RIESGO

Una vez identificados los componentes que conforman los distintos sistemas del bus eléctrico, se procede a su evaluación mediante el cálculo del Índice de Criticidad (IC), con el objetivo de determinar aquellos elementos que presentan mayor impacto en la confiabilidad y disponibilidad operacional del sistema.

- **FREC. FALLAS:** Frecuencia anual.
- **MTTR:** Incluye tiempo logístico, de ejecución y puesta en marcha (todo aquel tiempo que no se encuentra operativo).
- **IMP. PROD:** Costos de ineficiencia por hora (pérdida de costos por producción).
- **Costos directos por falla:** Costos de reparar la falla (hh, insumos, repuestos, logística, confinamiento, etc.).
- **RIESGO CUANTITATIVO:** $FREC. FALLAS \times (MTTR \times IMP. PROD + COSTOS DIRECTOS POR FALLAS)$.
- **RIESGO CUALITATIVO:** Cualificación del riesgo ($IMP. SEG, IMP. AMB$).
- **GRÁFICO:** Cuantificación de riesgo cualitativo.

Tabla 2-9. Análisis FMECA del sistema de baterías de alta tensión.

Sistema de Baterías (Alta tensión)										
Mantener la temperatura de operación de las baterías dentro de rangos seguros, asegurando que esta no supere los 29 °C, mediante la circulación de refrigerante, disipación térmica y monitoreo continuo.										
#	Falla Funcional	#	Modo de falla	Frecuencia de eventos por fallas/año	Efecto de Falla	Tiempo promedio de reparación (h)	Impacto en producción (USD/h)	Costo directo por falla (USD/falla)	Impacto SHA (USD/falla)	Riesgo económico (USD/año)
1.1	No mantiene la temperatura de operación dentro del rango seguro	1.1.1	Deterioro o ruptura de mangueras o conexiones del sistema de refrigeración	4	Evidente: Sí (presencia de líquido refrigerante, goteo o humedad en conexiones). Afecta SHA: Sí (riesgo de contacto con fluido, posible contaminación y riesgo de resbalón). Efecto operacional: aumento progresivo de temperatura, reducción de eficiencia térmica, posible detención del bus. Efecto en el sistema: pérdida de capacidad de enfriamiento, ingreso de aire al circuito, sobrecalentamiento de baterías. Acción correctiva: detener bus, identificar fuga, reemplazar manguera o conexión, rellenar refrigerante, purgar sistema.	4	\$ 550	\$ 120	\$ 120	\$ 8.660
		1.1.2	Bajo nivel de refrigerante en el sistema	15	Evidente: Sí (nivel bajo en depósito, alerta en sistema). Afecta SHA: Sí (riesgo térmico si continúa operación). Efecto operacional: aumento de temperatura, pérdida de autonomía, activación de protecciones. Efecto en el sistema: disminución de transferencia térmica, sobrecalentamiento de módulos. Acción correctiva: detener bus, revisar fugas, rellenar refrigerante, verificar circuito.	1,5	\$ 2.100	\$ 40	\$ 150	\$ 50.100
		1.1.3	Obstrucción en líneas de refrigeración	1	Evidente: No siempre evidente (detectado por aumento de temperatura). Afecta SHA: Sí (riesgo de sobrecalentamiento). Efecto operacional: disminución del enfriamiento, operación limitada. Efecto en el sistema: restricción del flujo, puntos calientes en baterías. Acción correctiva: inspeccionar líneas, limpiar o reemplazar conductos.	4,0	\$ 550	\$ 180	\$ 180	\$ 2.560

		1.1.4	Falla de la bomba de refrigeración	1	Evidente: Sí (alarma, ausencia de flujo). Afecta SHA: Sí (alto riesgo térmico). Efecto operacional: detención del bus por sobre temperatura. Efecto en el sistema: pérdida total de circulación de refrigerante. Acción correctiva: detener bus, reemplazar bomba, verificar sistema completo.	8,0	\$ 2.100	\$ 900	\$ 350	\$ 18.050
1.2	No disipa adecuadamente el calor generado en las baterías	1.2.1	Acumulación de suciedad o partículas en el radiador	4	Evidente: No (requiere inspección). Afecta SHA: Sí (riesgo térmico). Efecto operacional: aumento gradual de temperatura. Efecto en el sistema: baja disipación de calor. Acción correctiva: limpieza o reemplazo del intercambiador.	4,5	\$ 550	\$ 220	\$ 150	\$ 11.380
		1.2.2	Falla de ventiladores de enfriamiento	1	Evidente: Sí (no hay flujo de aire). Afecta SHA: Sí. Efecto operacional: sobrecalentamiento en operación exigente. Efecto en el sistema: acumulación de calor en radiador. Acción correctiva: reemplazar ventilador, revisar sistema eléctrico.	5,0	\$ 2.100	\$ 300	\$ 220	\$ 11.020
		1.2.3	Degradación del refrigerante (coolant)	1	Evidente: No (requiere análisis). Afecta SHA: Bajo-medio. Efecto operacional: pérdida de eficiencia térmica. Efecto en el sistema: menor capacidad de disipación. Acción correctiva: cambio de refrigerante, limpieza del sistema.	3,0	\$ 550	\$ 120	\$ 80	\$ 1.850
1.3	No entrega información térmica confiable al sistema de control	1.3.1	Falla total del sensor de temperatura	1	Evidente: Sí (alarma o sin señal). Afecta SHA: Sí (riesgo de operación sin control térmico). Efecto operacional: detención preventiva del bus. Efecto en el sistema: pérdida de monitoreo térmico. Acción correctiva: reemplazar sensor.	2,5	\$ 2.100	\$ 150	\$ 220	\$ 5.620
		1.3.2	Señal errática o intermitente del sensor	2	Evidente: No (lecturas inestables). Afecta SHA: Sí. Efecto operacional: comportamiento irregular del sistema. Efecto en el sistema: errores de control térmico.	2,0	\$ 550	\$ 80	\$ 120	\$ 2.600

					Acción correctiva: revisar conexiones, reemplazar sensor.					
		1.3.3	Sensor de temperatura descalibrado	1	Evidente: No. Afecta SHA: Sí. Efecto operacional: medición incorrecta de temperatura. Efecto en el sistema: activación incorrecta de protecciones. Acción correctiva: calibración o reemplazo.	2,0	\$ 550	\$ 100	\$ 120	\$ 1.320
1.4	No ejecuta correctamente la protección térmica del sistema	1.4.1	Falla del BMS en detección de sobretemperatura	2	Evidente: No. Afecta SHA: Sí (alto riesgo). Efecto operacional: no se detiene el bus ante sobrecalentamiento. Efecto en el sistema: daño en baterías. Acción correctiva: diagnóstico BMS, actualización o reemplazo.	8,0	\$ 2.100	\$ 1.200	\$ 500	\$ 37.000
		1.4.2	Error de comunicación BMS – sensores	2	Evidente: Sí (alarma CAN). Afecta SHA: Sí. Efecto operacional: pérdida de control del sistema. Efecto en el sistema: información errónea. Acción correctiva: revisar red CAN, conexiones.	3,0	\$ 550	\$ 150	\$ 180	\$ 3.960
		1.4.3	Activación tardía de protecciones térmicas	1	Evidente: No. Afecta SHA: Sí. Efecto operacional: operación fuera de rango seguro. Efecto en el sistema: estrés térmico en baterías. Acción correctiva: ajuste de parámetros en BMS.	2,5	\$ 2.100	\$ 200	\$ 300	\$ 5.750
1.5	No mantiene la integridad del sistema de refrigeración	1.5.1	Deterioro de sellos o juntas	2	Evidente: Sí (fugas menores). Afecta SHA: Sí. Efecto operacional: pérdida progresiva de refrigerante. Efecto en el sistema: pérdida de estanqueidad. Acción correctiva: reemplazo de sellos.	2,5	\$ 550	\$ 80	\$ 100	\$ 3.110

		1.5.2	Fisura o daño mecánico en ductos o depósito	2	Evidente: Sí (fuga visible). Afecta SHA: Sí. Efecto operacional: detención del bus. Efecto en el sistema: pérdida total de refrigerante. Acción correctiva: reemplazo del componente dañado.	6,0	\$ 2.100	\$ 600	\$ 250	\$ 26.900
Costo total										\$ 189.880

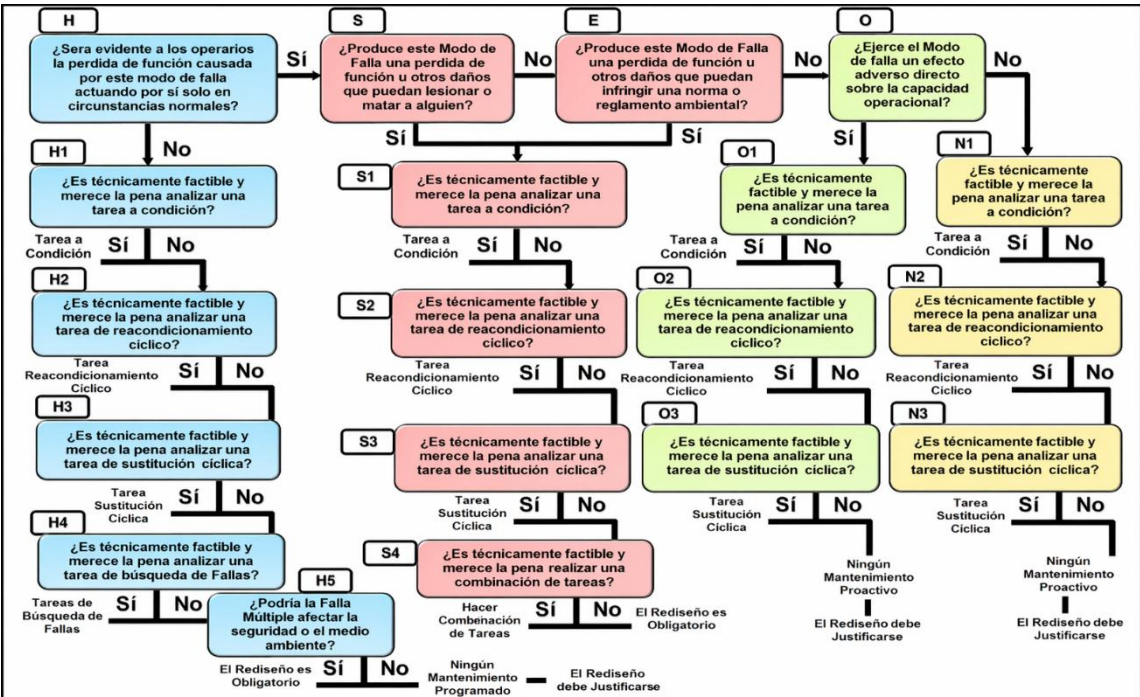
Fuente: Elaboración Propia por método de jerarquización de riesgo de FMECA.

2.5.DEFINICIÓN DE ACTIVIDADES DE MANTENIMIENTO Y CUANTIFICACIÓN DE ESFUERZOS

Para la definición de las actividades de mantenimiento del sistema de baterías (alta tensión), específicamente del sistema de refrigeración, se utiliza el diagrama de decisión de la metodología RCM II propuesto por John Moubray (2004), el cual permite establecer de manera sistemática las tareas de mantenimiento más adecuadas en función de los modos de falla identificados previamente.

Este diagrama de decisión constituye una herramienta fundamental dentro del proceso de Mantenimiento Centrado en la Confiabilidad (RCM), ya que permite analizar cada modo de falla en función de su detectabilidad, consecuencias y criticidad, facilitando la selección de tareas de mantenimiento técnicamente justificadas y económicamente viables.

Figura 2-3. Diagrama de decisión RCM



Fuente: (Moubray, 1997)

La hoja de decisión RCM corresponde a una herramienta estructurada que permite organizar la información obtenida del análisis FMECA, integrando fallas funcionales, modos de falla, efectos y consecuencias, con el fin de definir las acciones de mantenimiento más adecuadas para cada caso.

Para la construcción de esta hoja de decisión, se utiliza la información previamente analizada, la cual es evaluada paso a paso mediante el árbol lógico del RCM. En este proceso, cada modo de falla es analizado individualmente, considerando en primera instancia si la falla es evidente o no para la operación del sistema.

Posteriormente, se evalúan las consecuencias del modo de falla en términos de:

- Seguridad de las personas
- Impacto en el medio ambiente
- Impacto operacional (continuidad del servicio)

En función de estos criterios, el diagrama de decisión permite determinar el tipo de tarea de mantenimiento más adecuada, tales como:

- Mantenimiento preventivo basado en condición
- Mantenimiento preventivo programado
- Rediseño del sistema
- Acciones correctivas planificadas
- Estrategias de monitoreo

En el contexto del sistema de refrigeración de baterías de la flota de buses eléctricos, este análisis resulta fundamental, ya que permite identificar tareas orientadas a prevenir fallas que puedan generar sobre temperatura en las baterías, condición que representa uno de los principales riesgos operacionales y de seguridad del sistema.

Tabla 2-10. Hoja de decisión RCM

Hoja de Decisión RCM				Sistema/Activo								Sistema N°	Facilitador	Fecha
				Sub-Sistema/Componente								Sub-Sistema N°	Auditor	
Referencia de Información				Evaluación de las Actividades				Evaluación según árbol lógico RCM				Tarea Propuestas	Frecuencia	A Realizar por
F	FF	MF		H	S	E	O	H1	H2	H3	S1			
1	4	1.1.1		No	Sí	Sí	Sí	No	No	No	Sí	Inspección de posibles fugas en mangueras y conexiones	Diario (turno noche)	Operador
2	15	1.1.2		No	Sí	Sí	Sí	No	No	No	Sí	Control de nivel de refrigerante y registro	Diario (turno noche)	Operador
3	1	1.1.3		Sí	Sí	No	Sí	No	No	No	No	Limpieza e inspección de líneas de refrigeración	Mensual	Mantenición
4	1	1.1.4		No	Sí	Sí	Sí	No	No	No	No	Revisión funcional de bomba de refrigeración	Mensual	Técnico
5	4	1.2.1		Sí	Sí	No	Sí	No	No	No	No	Limpieza de radiador / intercambiador	Mensual	Mantenición
6	1	1.2.2		No	Sí	Sí	Sí	No	No	No	No	Revisión de ventiladores de enfriamiento	Mensual	Técnico
7	1	1.2.3		Sí	No	Sí	Sí	No	No	No	No	Cambio programado de refrigerante (coolant)	Semestral	Mantenición
8	1	1.3.1		No	Sí	No	Sí	No	No	No	Sí	Revisión y reemplazo de sensor de temperatura	Según condición	Técnico
9	2	1.3.2		Sí	Sí	No	Sí	No	No	No	No	Revisión de conexiones y señal del sensor	Mensual	Técnico
10	1	1.3.3		Sí	Sí	No	Sí	No	No	No	No	Calibración de sensor de temperatura	Anual	Técnico
11	2	1.4.1		Sí	Sí	Sí	Sí	No	No	No	No	Diagnóstico funcional del BMS	Trimestral	Especialista
12	2	1.4.2		No	Sí	Sí	Sí	No	No	No	Sí	Revisión de red CAN y comunicación BMS-sensores	Mensual	Técnico
13	1	1.4.3		Sí	Sí	Sí	Sí	No	No	No	Sí	Ajuste de parámetros y setpoints del BMS	Semestral	Ingeniería
14	2	1.5.1		No	Sí	Sí	Sí	No	No	No	Sí	Revisión de sellos y juntas	Mensual	Mantenición
15	2	1.5.2		No	Sí	Sí	Sí	No	No	No	No	Inspección estructural de ductos y depósito	Mensual	Mantenición

Fuente: Elaboración propia en base a los modos de falla del equipo

Tabla 2-11. Actividades de mantenimiento empleando Diagrama de decisión RCM.

Plan de mantenimiento general basado en RCM.		
Modo de falla	Actividad de mantenimiento utilizando el árbol lógico de decisión del MCC	Acción de mantenimiento a ejecutar
Deterioro o ruptura de mangueras o conexiones del sistema de refrigeración	MPT a condición (falla evidente, impacto operacional)	Inspección visual, detección de fugas, reapriete, purga
Bajo nivel de refrigerante en el sistema	MPT a condición (falla evidente, impacto crítico)	Verificación nivel, relleno, registro
Obstrucción en líneas de refrigeración	MPT a condición (falla no evidente, degradación progresiva)	Limpieza de ductos, inspección flujo
Falla de la bomba de refrigeración	MP cíclico + MPT (falla funcional crítica)	Monitoreo + reemplazo programado
Radiador obstruido	MPT a condición	Limpieza e inspección térmica
Falla de ventiladores	MP cíclico + MPT (impacto térmico directo)	Revisión eléctrica, reemplazo
Degradación del refrigerante	MP sustitución cíclica (vida útil conocida)	Cambio de coolant
Falla sensor temperatura	MPT a condición	Diagnóstico y reemplazo
Señal errática sensor	MPT a condición	Limpieza conexiones
Sensor descalibrado	MP cíclico (calibración)	Calibración anual
Falla BMS	Búsqueda de fallas + MP predictivo (impacto seguridad)	Diagnóstico CAN, actualización
Error comunicación BMS	Búsqueda de fallas (procedimiento)	Revisión red CAN
Activación tardía	Rediseño justificable + Búsqueda de fallas	Ajuste parámetros
Deterioro de sellos	MP cíclico	Reemplazo de sellos
Fisura ductos	MP cíclico + MPT	Inspección estructural

Fuente: Elaboración propia empleando Diagrama de decisión RCM.

Una vez evaluado cada uno de los modos de falla identificados en el sistema de refrigeración de baterías, se procede a la definición de las tareas de mantenimiento más adecuadas, así como a la asignación de los responsables para su correcta ejecución dentro del contexto operacional de la flota.

A partir de la aplicación del árbol lógico de decisión RCM, se logra establecer un conjunto de actividades orientadas principalmente al mantenimiento basado en condición (MPT), mantenimiento preventivo y actividades de diagnóstico, las cuales permiten controlar las variables críticas del sistema, tales como el nivel de refrigerante, la eficiencia de disipación térmica y la correcta operación del sistema de control (BMS).

Una vez definidas las tareas de mantenimiento propuestas, se realiza una evaluación de estas con el objetivo de determinar su impacto sobre la confiabilidad del sistema, la disponibilidad operativa de los buses y la reducción del riesgo asociado a fallas críticas. En este sentido, el plan propuesto busca disminuir la probabilidad de ocurrencia de eventos que puedan generar sobrecalentamiento de baterías, detención de buses en operación y costos asociados por indisponibilidad del servicio.

Tal como se muestra en la Tabla 2-10, donde se presenta la hoja de decisión RCM para cada uno de los modos de falla identificados, la programación de las actividades ha sido definida considerando tanto la criticidad de cada falla como las condiciones reales de operación de la flota. En particular, se ha incorporado la estrategia operativa de la empresa, donde los buses se encuentran en servicio durante el día y en proceso de carga durante la noche, permitiendo asignar actividades de inspección y control al turno nocturno, mientras que las intervenciones de mantenimiento programado se ejecutan en función de los planes por kilometraje establecidos por el área de mantenimiento.

De esta manera, el plan de mantenimiento propuesto no solo se basa en criterios teóricos de confiabilidad, sino que también se ajusta a la realidad operacional del sistema de transporte, asegurando su viabilidad de implementación y contribuyendo directamente a la continuidad del servicio y a la seguridad de la operación.

Tabla 2-12. Actividades de mantenimiento RCM

Modo de falla	Acción para ejecutar	Frecuencia (veces/año)	Pers.	HH (h-h/intervención)	Tarifa USD/h	Insumos / Mat. USD	PPTO ANUAL USD
1.1.1 Deterioro o ruptura de mangueras	Inspección visual fugas	365	1	0,3	USD\$15	USD\$5	USD\$3.468
1.1.2 Bajo nivel refrigerante	Control nivel + registro	365	1	0,2	USD\$15	USD\$10	USD\$4.745
1.1.3 Obstrucción líneas	Limpiezas líneas	12	2	2,0	USD\$20	USD\$30	USD\$1.320
1.1.4 Falla bomba	Revisión funcional bomba	12	1	2,0	USD\$25	USD\$50	USD\$1.200
1.2.1 Acumulación de suciedad en radiador/intercambiador	Limpieza radiador	12	2	3,0	USD\$20	USD\$40	USD\$1.920
1.2.2 Falla ventiladores	Revisión ventiladores	12	1	2,0	USD\$25	USD\$30	USD\$960
1.2.3 Degradación coolant	Cambio refrigerante	2	2	4,0	USD\$20	USD\$180	USD\$680
1.3.1 Falla sensor temperatura	Revisión/reemplazo sensor	1	1	1,0	USD\$25	USD\$80	USD\$105
1.3.2 Señal errática	Revisión conexiones	12	1	1,5	USD\$20	USD\$20	USD\$600
1.3.3 Sensor descalibrado	Calibración	1	1	2,0	USD\$25	USD\$10	USD\$60
1.4.1 Falla BMS	Diagnóstico BMS	4	1	3,0	USD\$45	USD\$50	USD\$740
1.4.2 Error comunicación	Revisión red CAN	12	1	2,0	USD\$25	USD\$20	USD\$840
1.4.3 Protección tardía	Ajuste parámetros BMS	2	1	2,0	USD\$35	USD\$0	USD\$140
1.5.1 Deterioro sellos	Revisión sellos	12	1	1,5	USD\$20	USD\$25	USD\$660
1.5.2 Fisura ductos	Inspección estructural	12	2	2,0	USD\$20	USD\$30	USD\$1.320
Total anual estimado							USD 18.758

Fuente: Elaboración propia en base a propuesta de RCM

2.6.LISTA DE TAREAS A REALIZAR SEGÚN PROPUESTA DE RCM

A partir de la propuesta de mantenimiento obtenida mediante la aplicación de la metodología RCM al sistema de refrigeración de baterías del bus eléctrico King Long XMQ6900G, se estructura una secuencia lógica de tareas para la ejecución de las actividades definidas.

La secuencia fue construida considerando las dependencias técnicas entre tareas, la necesidad de ejecutar procedimientos de seguridad previos a la intervención y la posibilidad de desarrollar actividades en paralelo sin afectar el tiempo total de intervención. En este sentido, la programación propuesta permite ordenar las acciones de mantenimiento orientadas a verificar el estado del sistema de refrigeración, controlar el nivel de refrigerante, inspeccionar componentes críticos, validar el funcionamiento del sistema de control térmico y asegurar una correcta puesta en servicio del bus.

Tabla 2-13. Secuencia de tareas de mantenimiento basada en RCM.

N° Código	Nombre de tarea	Duración	Predecesoras	N° Código	Nombre de tarea	Duración	Predecesoras
1 – A	Preparar personal y EPP (charla 5 min , reparto)	0:12:00	—	13 – M	Muestreo de aceite y, o filtrado puntual	0:16:00	12
2 – B	Estacionar el equipo en zona segura	0:05:00	—	14 – N	Prueba funcional de sensor de presión mas limpieza de conectores	0:16:00	10
3 – C	Señalizar área y delimitar (conos, letreros)	0:06:00	2	15 – O	Calibración de sensor (con patrón) y registro en PLC	0:12:00	14
4 – D	Revisión documental: OT, PTS, permisos	0:08:00	2	16 – P	Prueba de apertura y limpieza de válvula de alivio	0:18:00	12
5 – E	Preparar insumos, herramientas, repuestos	0:15:00	2	17 – Q	Auditoría de setpoint y sello antimanipulación válvula	0:10:00	16
6 – F	Bloqueo y etiquetado (LOTO) eléctrico e hidráulico	0:10:00	3,4	18 – R	Cambio de neumático delantero izquierdo	0:45:00	5
7 – G	Verificación de ausencia de tensión (eléctrico)	0:07:00	6	19 – S	Revisión de apriete de pernos críticos (estructura)	0:11:00	9,18,8
8 – H	Cambio de bomba de lubricación central	0:32:00	1,5,6	20 – T	Alineación acople motorbomba (verificación torque)	0:20:00	8
9 – I	Lubricación de puntos manuales	0:18:00	8	21 – U	Prueba de caudal presión hidráulica mas purga de aire	0:20:00	12,15,16,20
10 – J	Revisión de elementos eléctricos (tablero, bornes, bobinas)	0:30:00	7	22 – V	Limpieza general del equipo y del área de trabajo	0:15:00	11,19,21,10
11 – K	Revisión visual estructural (soldaduras, guardas)	0:22:00	3	23 – W	Eliminación y registro de residuos e insumos	0:10:00	22
12 – L	Cambio de cartucho de filtro hidráulico	0:14:00	5,6	24 – X	Cierre: de s-LOTO, marcha de prueba 5 min, checklist y cierre de OT en CMMS	0:15:00	21,22,23

Fuente: Elaboración propia en base a propuesta de RCM

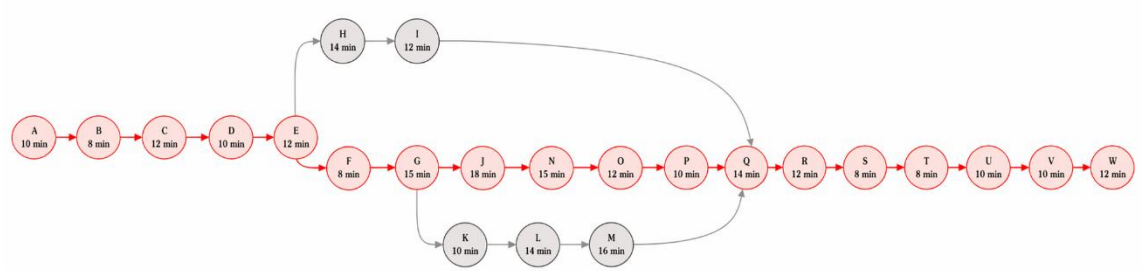
El tiempo mínimo total estimado, considerando dependencias entre actividades y permitiendo la ejecución en paralelo de tareas complementarias, es de 204 minutos (3 horas y 24 minutos).

Las tareas que pueden ejecutarse en paralelo corresponden principalmente a aquellas que no pertenecen a la ruta crítica, tales como la revisión de radiador/intercambiador, inspección y verificación de ventiladores de enfriamiento, y el diagnóstico de comunicación entre el sistema BMS y los sensores. Estas actividades pueden realizarse de manera simultánea con otras tareas de la secuencia principal, sin afectar la duración total del proceso de mantenimiento.

El método de la ruta crítica fue desarrollado a finales de la década de 1950 por James E. Kelley y Morgan R. Walker. El método de la ruta crítica (CPM, Critical Path Method) se utiliza en la gestión de proyectos para estimar la duración mínima de un proceso y determinar el grado de flexibilidad del cronograma mediante la identificación de aquellas actividades que condicionan directamente el tiempo total de ejecución.

De acuerdo con la red de actividades definida, la ruta crítica corresponde a la secuencia de tareas que determina la duración mínima total de la intervención, estando compuesta por aquellas actividades que no presentan holgura y cuya ejecución condiciona directamente el tiempo total del proceso:

Figura 2-4. Diagrama de ruta crítica de actividades de mantenimiento.



Fuente: Elaboración propia en base a hoja de decisión RCM.

A → B → C → D → E → F → G → J → N → O → P → Q → R → S → T → U → V → W

La secuencia anterior corresponde a:

(Estacionar bus y asegurar área de trabajo → Revisión documental e historial de fallas → Aplicación de bloqueo y etiquetado (LOTO) → Verificación de ausencia de tensión en sistema HV → Inspección visual general del sistema de refrigeración → Verificación de nivel de refrigerante → Inspección de mangueras, conexiones y fugas → Revisión de bomba de refrigeración → Limpieza de líneas o componentes con suciedad → Purga del sistema de refrigeración → Relleno o reposición de coolant → Prueba funcional de circulación del refrigerante → Verificación de temperatura en operación controlada → Limpieza general del área intervenida → Gestión de residuos y materiales contaminados → Retiro de bloqueo LOTO y cierre de intervención → Puesta en servicio del bus → Marcha de prueba y validación final)

La suma de las duraciones asociadas a esta secuencia determina el tiempo mínimo total de intervención, mientras que las demás actividades, como la revisión de radiador, ventiladores y diagnóstico de comunicación BMS–sensores, pueden ejecutarse en paralelo sin extender la duración total del proceso. Esto permite optimizar los tiempos de mantenimiento y reducir la indisponibilidad del bus.

Se observa que la ruta crítica está dominada por actividades asociadas al sistema de refrigeración, particularmente aquellas relacionadas con la purga, reposición y validación térmica del sistema. Esto confirma que dicho subsistema es crítico para la continuidad operativa del bus eléctrico, ya que concentra las tareas que determinan el tiempo total de intervención y, por ende, la disponibilidad del equipo.

A continuación, se presenta el diagrama general de actividades y posteriormente la ruta crítica destacada, correspondiente a la secuencia de tareas que determina la duración mínima de la intervención.

CAPÍTULO 3: EVALUACIÓN TÉCNICA Y ECONÓMICA DEL ENFOQUE

RCM

3.1. ANÁLISIS DE LAS RECOMENDACIONES RCM

En el presente apartado se evalúa el plan de mantenimiento propuesto, con el objetivo de reducir la ocurrencia de fallas críticas en el sistema de baterías de alta tensión, específicamente en el subsistema de refrigeración, el cual fue identificado como crítico en el análisis FMECA desarrollado en el capítulo anterior.

Asimismo, se presenta un análisis técnico–económico de la propuesta, evaluando su impacto en la continuidad operacional de la flota y en la reducción de los costos asociados a fallas e indisponibilidad de los buses.

Se establece una comparación entre el plan de mantenimiento actual y el plan propuesto basado en la metodología de Mantenimiento Centrado en la Confiabilidad (RCM), destacando sus principales ventajas en términos de confiabilidad, disponibilidad y eficiencia operativa. Además, se analizan los resultados esperados tras la implementación de este enfoque, considerando el contexto real de operación de los buses, los cuales operan de forma continua durante el día y concentran sus actividades de mantenimiento durante el turno nocturno.

Los resultados obtenidos en el análisis FMECA evidenciaron que los modos de falla más críticos se concentran en el sistema de refrigeración de baterías, particularmente aquellos asociados al bajo nivel de refrigerante, fallas en la bomba de circulación y errores en el sistema de control térmico (BMS), lo cual fundamenta la necesidad de intervenir estos componentes mediante un enfoque de mantenimiento basado en confiabilidad.

El Mantenimiento Centrado en la Confiabilidad (RCM) corresponde a una metodología estructurada que permite definir estrategias de mantenimiento en función del comportamiento real de los sistemas, considerando sus funciones, fallas funcionales, modos de falla y consecuencias asociadas (SAE International, 2009); (Moubray, 1997).

En este contexto, el enfoque RCM permite priorizar el mantenimiento proactivo por sobre el reactivo, mediante la implementación de tareas preventivas, predictivas y basadas en condición, orientadas a intervenir directamente las causas raíz de las fallas identificadas. Esto resulta especialmente relevante en sistemas críticos como el de refrigeración de baterías, donde una falla puede derivar en la detención total del bus y en pérdidas económicas significativas.

Los principales beneficios de la aplicación de la metodología RCM en el sistema analizado se presentan a continuación:

- Claridad en las tareas de mantenimiento: Se logra una definición precisa de las actividades a ejecutar, facilitando su correcta implementación por parte del personal técnico y asegurando la confiabilidad del sistema de baterías.
- Enfoque preventivo de las fallas: Las tareas propuestas están orientadas a evitar la ocurrencia de fallas críticas, particularmente aquellas asociadas al sobrecalentamiento de baterías, reduciendo detenciones no programadas.
- Optimización de los recursos: Se mejora el uso de mano de obra, repuestos y tiempo, evitando intervenciones innecesarias y focalizando los esfuerzos en los componentes más críticos del sistema.
- Mejora en la seguridad operativa: La implementación de tareas asociadas al control térmico y al sistema de refrigeración reduce significativamente los riesgos asociados a fallas en baterías de alta tensión.
- Reducción de costos operacionales: Al disminuir la frecuencia de fallas y los tiempos de detención, se reducen las pérdidas económicas asociadas a la indisponibilidad de buses y a posibles sanciones por incumplimiento operacional.
- Soporte a la mejora continua: El plan propuesto permite realizar seguimiento y evaluación continua, facilitando la identificación de oportunidades de mejora en la gestión del mantenimiento.

La implementación de un plan de mantenimiento basado en RCM representa una mejora significativa para la operación de la flota, ya que permite reducir tiempos de detención, optimizar recursos y minimizar pérdidas económicas asociadas a fallas del sistema de baterías.

Desde un punto de vista técnico y económico, la propuesta resulta viable, lo cual será validado mediante el análisis comparativo entre el plan de mantenimiento actual y el plan propuesto en los apartados siguientes, con el objetivo de evidenciar los beneficios asociados a su implementación.

3.2.PLAN DE MANTENIMIENTO ACTUAL

El plan de mantenimiento actualmente aplicado a la flota de buses eléctricos King Long XMQ6900G de Trolebuses de Chile S.A. se basa principalmente en un programa de mantenimiento preventivo estructurado por intervalos de kilometraje, complementado con intervenciones correctivas ante la ocurrencia de fallas durante la operación.

Este programa considera distintas pautas de mantenimiento definidas por el fabricante, las cuales establecen inspecciones y tareas periódicas sobre diferentes sistemas del bus, incluyendo el sistema de baterías, sistema eléctrico, sistema de refrigeración, sistema neumático, sistema de frenos, dirección, ejes, neumáticos y componentes mecánicos. Estas actividades se ejecutan en función del kilometraje acumulado del vehículo, lo que permite mantener un control general sobre el desgaste de los componentes.

Figura 3-1. Programa de mantenimiento actual bus eléctrico XMQ6900G

	REVISION 1 Modelos: XMQ 6900G eTech	F-AS-VVP-13
REVISIÓN I		30/08/2024
INSPECCIÓN		V00
		Pag 1 de 1

NÚMERO DE OT:	FECHA:
CLIENTE:	MODELO:
PLACA PATENTE:	Nº CHASIS:
KILOMETRAJE:	HORA INICIO: HORA TERMINO:
Nº INTERNO:	Nº CARRO:

BMS - ADMINISTRADOR DE BATERÍAS		✓
1	LIMPIEZA CON AIRE COMPRIMIDO Y PAÑO SECO	
DISTRIBUIDOR		
2	ESTADO Y SUJECIÓN DE CONEXIONES	✓
3	ESTADO DE MANGUERAS Y REAPRETE DE ABRAZADERAS	
4	LIMPIEZA	
MCU - CONTROLADOR DE MOTOR		✓
5	ESTADO Y SUJECIÓN DE CONEXIONES ELECTRICAS TRIFASICAS	
6	ESTADO DE MANGUERAS Y REAPRETE DE ABRAZADERAS	
MOTOR		✓
7	ESTADO Y SUJECIÓN DE CONEXIONES ELECTRICAS Y LINEA DE TIERRA	
8	ESTADO DE MANGUERAS Y REAPRETE DE ABRAZADERAS	
SISTEMA REFRIGERACIÓN		✓
9	NIVEL DE REFRIGERANTE DE HV AGREGAR SI ES NECESARIO	
10	NIVEL DE REFRIGERANTE DE BATERIA HV Y AGREGAR SI ES NECESARIO	
11	REVISION DE MANGUERAS Y REAPRIETE DE ABRAZADERAS	
12	LIMPIEZA AIRE ACONDICIONADO DEL SALON	
COMPRESOR DE AIRE		✓
13	REVISAR FUGAS DE AIRE	
BATERÍAS DE ALTO VOLTAJE (HV)		✓
14	LIMPIEZA CON AIRE COMPRIMIDO Y PAÑO SECO	
15	ESTADO Y SUJECIÓN DE CONEXIONES ELECTRICAS Y LINEA DE TIERRA.	
SISTEMA DE DIRECCIÓN HIDRAULICA		✓
16	REVISAR NIVELES Y FUGAS	
SISTEMA ELECTRICO BAJO VOLTAJE		✓
17	LIMPIAR COMPARTIMIENTO DE BATERIAS CON AIRE COMPRIMIDO	
18	REVISAR CONEXIONES DE BATERIA (BORNES)	

EJE TRASERO		✓
19	EXISTENCIA PERDIDA DE LUBRICANTE POR RETEN Y CUBOS	
EJE DELANTERO		✓
20	INSPECION EXTERIOR DE GRASA DE CUBOS DELANTERO	
SISTEMA DE FRENO		✓
21	DRENAR PRESENCIA DE HUMEDAD EN ACUMULADORES DE AIRE	
22	REVISAR FUGAS	
NEUMATICOS		✓
23	PRESION DE NEUMATICOS 110 PSI	
AIRE ACONDICIONADO Y CALEFACCIÓN		✓
24	Limpieza de filtro salon (lavar con agua)	
ENGRASE		✓
25	ENGRASE MUÑONES	
26	ENGRASE CRUCETAS DE CARDAN Y BRIDA DESLIZANTE	
27	ENGRASE TERMINALES DE DIRECCIÓN	
28	ENGRASE ARTICULACIÓN DE PUERTAS	
29	ENGRASE CHICHARRAS DE FRENO	

Fuente: Elaboración propia en base a pautas de mantenimiento proporcionadas por la empresa.

A partir de la pauta presentada, se observa que el mantenimiento actual está orientado principalmente a inspecciones visuales, limpieza, revisión de conexiones, verificación de niveles, reapriete de abrazaderas, revisión de fugas y engrase de componentes mecánicos. Esto evidencia que el plan posee una estructura preventiva general, enfocada en controlar condiciones básicas de funcionamiento de los distintos sistemas del bus.

En relación con el sistema de baterías de alta tensión y su sistema de refrigeración, la pauta considera actividades como la limpieza con aire comprimido y paño seco del BMS, la revisión del nivel de refrigerante de alta tensión, la verificación del nivel de refrigerante de batería HV, la revisión de mangueras, el reapriete de abrazaderas y la limpieza de componentes asociados. Estas tareas permiten detectar condiciones visibles o evidentes, tales como bajo nivel de refrigerante, conexiones sueltas o deterioro externo de mangueras.

Sin embargo, se evidencia que el plan actual no incorpora de manera explícita actividades orientadas al análisis de modos de falla críticos identificados en el FMECA, tales como diagnóstico funcional del BMS, monitoreo de señales de sensores de temperatura, verificación del desempeño térmico en operación, evaluación de flujo del refrigerante, inspección del comportamiento de la bomba de circulación o análisis de obstrucciones internas del circuito de refrigeración.

Por lo tanto, si bien la pauta actual cumple una función preventiva básica y permite mantener un control general sobre el estado del bus, presenta limitaciones para anticiparse a fallas críticas asociadas al sistema de refrigeración de baterías. Esta condición justifica la necesidad de complementar el mantenimiento actual con un plan basado en RCM, orientado a intervenir los componentes críticos, reducir fallas no programadas y mejorar la disponibilidad operacional del sistema.

3.3.PLAN DE MANTENIMIENTO MEJORADO

A partir de los resultados obtenidos en el análisis de criticidad, el desarrollo del FMECA y la aplicación de la metodología RCM II (Moubray, 1997), se propone un plan de mantenimiento mejorado orientado a aumentar la confiabilidad del sistema de baterías de alta tensión del bus eléctrico King Long XMQ6900G.

Los resultados del análisis FMECA evidenciaron que los modos de falla más críticos se concentran en el sistema de refrigeración, particularmente aquellos asociados a bajo nivel de refrigerante, fallas en la bomba de circulación y errores en el sistema de control térmico, lo cual fundamenta el enfoque del plan propuesto.

El plan propuesto se enfoca en intervenir los modos de falla críticos identificados, especialmente aquellos asociados al sistema de refrigeración, el cual ha demostrado ser determinante en la continuidad operativa del bus.

La propuesta integra tareas de mantenimiento preventivo, predictivo y basado en condición, orientadas a minimizar la ocurrencia de fallas, reducir detenciones no programadas y optimizar el uso de los recursos de mantenimiento.

A diferencia del plan actual basado en kilometraje, este enfoque prioriza los componentes críticos según su impacto operacional, de seguridad y económico, permitiendo una gestión más eficiente del mantenimiento.

A continuación, se presenta el plan de mantenimiento mejorado estructurado a partir de la metodología RCM, considerando las tareas, frecuencias, responsables y tiempos de intervención definidos para cada componente crítico del sistema.

Tabla 3-1. Propuesta plan de mantenimiento mejorado.

PROPUESTA DE PLAN DE MANTENIMIENTO TROLEBUSES DE CHILE S. A											Nro 1.	
NOMBRE DEL EQUIPO: Bus Eléctrico King Long			MODELO: XMQ6900G		ULTIMO MTTO: Según registro empresa		PROMEDIO DE HORAS: 16 h/día operación				REALIZO:	
2025												
SUBCONJUNTO	ELEMENTO	TAREAS DE MANTENIMIENTO	ESTADO MÁQUINA	VALORES LÍMITES	EJECUTOR	HERRAMIENTAS	TIEMPO PREVISTO	PERIODICIDAD	TIEMPO 2026	TIEMPO 2027	TIEMPO 2028	TIEMPO 2029
Refrigeración	Mangueras y conexiones	Inspección de fugas	MEP	Sin fugas visibles	Operador	Visual	00:10:00	Diario	Diario	Diario	Diario	Diario
Refrigeración	Nivel de refrigerante	Control y registro	MEP	Nivel correcto	Operador	Visual	00:05:00	Diario	Diario	Diario	Diario	Diario
Refrigeración	Líneas de refrigeración	Limpieza interna	AHT	Flujo libre	Mantención	Aire/agua	00:20:00	Mensual	Mensual	Mensual	Mensual	Mensual
Refrigeración	Bomba de refrigeración	Revisión funcional	AHT	Flujo continuo	Técnico	Multímetro	00:30:00	Mensual	Mensual	Mensual	Mensual	Mensual
Refrigeración	Radiador/intercambiador	Limpieza y verificación	AHT	Sin obstrucción	Mantención	Aire comprimido	00:30:00	Mensual	Mensual	Mensual	Mensual	Mensual
Refrigeración	Ventiladores	Revisión de funcionamiento	MEP	Flujo de aire correcto	Técnico	Multímetro	00:20:00	Mensual	Mensual	Mensual	Mensual	Mensual
Refrigeración	Refrigerante (coolant)	Cambio programado	AHT	Según fabricante	Mantención	Equipo drenaje	01:00:00	Semestral	Semestral	Semestral	Semestral	Semestral
Control	Sensor temperatura	Verificación señal	MEP	Señal estable	Técnico	Multímetro / scanner	00:20:00	Mensual	Mensual	Mensual	Mensual	Mensual
Control	Sensor temperatura	Calibración	AHT	Error mínimo	Técnico	Multímetro / scanner	00:30:00	Anual	Anual	Anual	Anual	Anual
Control	BMS	Diagnóstico funcional	AHT	Operativo	Especialista	Software diagnóstico	00:45:00	Trimestral	Trimestral	Trimestral	Trimestral	Trimestral
Control	Comunicación CAN	Revisión red	MEP	Sin errores	Técnico	Scanner CAN / laptop	00:30:00	Mensual	Mensual	Mensual	Mensual	Mensual
Estructura	Sellos y juntas	Inspección desgaste	MEP	Sin fugas	Mantención	Visual + herramientas	00:15:00	Mensual	Mensual	Mensual	Mensual	Mensual
Estructura	Ductos y depósito	Inspección estructural	AHT	Sin fisuras	Mantención	Visual + herramientas	00:30:00	Mensual	Mensual	Mensual	Mensual	Mensual

Fuente: Elaboración propia

Tabla 3-2. Propuesta de plan de mantenimiento mejorado para componentes críticos.

PROPUESTA DE PLAN DE MANTENIMIENTO TROLEBUSES DE CHILE S.A									
NOMBRE DEL EQUIPO: Bus Eléctrico King Long		MODELO: XMQ6900G		ULTIMO MTTO: Según registro empresa			PROMEDIO DE HORAS: 16 h/día operación		
2025									
SUBCONJUNTO	ELEMENTO	TAREAS DE MANTENIMIENTO	ESTADO MÁQUINA	VALORES LÍMITES	EJECUTOR	HERRAMIENTAS	TIEMPO PREVISTO	PERIODICIDAD	2026
Arranque operativo	Sistema de refrigeración	Verificar nivel de refrigerante previo a operación	MEP	Nivel correcto	Operador	Visual	00:05:00	Diario (turno noche)	00:05:00
Arranque operativo	Mangueras y conexiones	Inspección de fugas y estado general	MEP	Sin fugas visibles	Operador	Visual	00:10:00	Diario (turno noche)	00:10:00
Arranque operativo	Sistema térmico baterías	Verificar temperatura inicial del sistema	MEP	Rango seguro operación	Técnico	Scanner / BMS	00:10:00	Diario	00:10:00
Operación	Líneas de refrigeración	Limpieza e inspección de obstrucciones	AHT	Flujo libre	Mantenición	Aire / agua	00:20:00	Mensual	00:20:00
Operación	Bomba de refrigeración	Revisión funcional y caudal	AHT	Flujo continuo	Técnico	Multímetro	00:30:00	Mensual	00:30:00
Operación	Radiador/intercambiador	Limpieza y verificación térmica	AHT	Sin obstrucción	Mantenición	Aire comprimido	00:30:00	Mensual	00:30:00
Operación	Ventiladores	Verificación de funcionamiento	MEP	Flujo de aire correcto	Técnico	Multímetro	00:20:00	Mensual	00:20:00
Operación	Refrigerante (coolant)	Cambio programado	AHT	Según fabricante	Mantenición	Equipo drenaje	01:00:00	Semestral	01:00:00
Control	Sensor de temperatura	Verificación de señal	MEP	Señal estable	Técnico	Multímetro	00:20:00	Mensual	00:20:00
Control	Sensor de temperatura	Calibración	AHT	Error mínimo	Técnico	Software / equipo	00:30:00	Anual	00:30:00
Control	BMS	Diagnóstico funcional completo	AHT	Sistema operativo	Especialista	Software BMS	00:45:00	Trimestral	00:45:00
Control	Comunicación CAN	Revisión red y comunicación	MEP	Sin errores	Técnico	Scanner CAN	00:30:00	Mensual	00:30:00

Seguridad	Sistema eléctrico HV	Verificación de desconexión segura y protecciones	AHT	Sistema operativo sin falla	MC	—	00:15:00	Mensual	00:15:00
Seguridad	Sistema eléctrico HV	Verificación de alarmas y sistemas de seguridad	MEP	Alarmas activas y funcionales	GR	Pupitre	00:30:00	Mensual	00:30:00

Fuente: Elaboración propia

El plan de mantenimiento enfocado en componentes críticos permite concentrar los esfuerzos en aquellos elementos cuya falla tiene mayor impacto en la operación, destacando el sistema de refrigeración como el principal factor de riesgo identificado.

A diferencia del mantenimiento tradicional basado en intervalos de kilometraje, este enfoque prioriza el monitoreo continuo, la detección temprana de fallas y la intervención oportuna, lo que permite reducir significativamente la probabilidad de fallas críticas en el sistema de baterías.

Se observa que la mayor concentración de tareas se encuentra en el sistema de refrigeración de baterías, lo que confirma su criticidad dentro del sistema y valida los resultados obtenidos en el análisis FMECA desarrollado en el capítulo anterior.

En este contexto, el plan propuesto no solo mejora la confiabilidad del sistema, sino que también permite optimizar la disponibilidad operacional del bus eléctrico, reduciendo tiempos de detención y contribuyendo a la continuidad del servicio.

3.4.DESCRIPCIÓN DE LAS MEJORAS PROPUESTAS

A partir de los resultados obtenidos mediante la aplicación de la metodología RCM II y el análisis FMECA del sistema de baterías, se definieron modificaciones e incorporaciones al plan de mantenimiento del bus eléctrico, con el objetivo de optimizar la confiabilidad operativa y reducir la ocurrencia de fallas críticas, especialmente aquellas asociadas al sistema de refrigeración.

Estas mejoras se fundamentan en la identificación de los modos de falla más relevantes, los cuales evidenciaron que el control térmico del sistema de baterías constituye un factor determinante en la continuidad operacional del bus.

En este contexto, se implementaron las siguientes mejoras:

- **Priorización del sistema de refrigeración:** Se identificó como subsistema crítico, por lo que se incrementó la frecuencia de inspecciones y tareas preventivas, especialmente en mangueras, nivel de refrigerante, bomba y sistema de disipación térmica.
- **Incorporación de mantenimiento basado en condición (MPT):** Se establecieron tareas orientadas al monitoreo continuo de variables críticas como temperatura, flujo de refrigerante y estado del coolant, permitiendo detectar fallas antes de su ocurrencia.
- **Optimización de frecuencias de mantenimiento:** Las periodicidades fueron ajustadas en función del análisis FMECA, la criticidad de los componentes y la operación real de los buses, considerando que estos operan durante el día y son intervenidos principalmente en turno nocturno.
- **Estandarización de tareas operativas:** Se definieron actividades claras y estructuradas, facilitando su ejecución por parte del personal de operación y mantenimiento, reduciendo la variabilidad en la intervención.
- **Incorporación de tareas preventivas críticas:** Se añadieron actividades como purga del sistema, control de nivel de refrigerante, revisión de ventiladores y diagnóstico del BMS, las cuales no estaban completamente consideradas en el plan actual.
- **Reducción de mantenimiento reactivo:** Se busca disminuir intervenciones no programadas mediante una estrategia proactiva basada en confiabilidad.

Como resultado de estas mejoras, el plan de mantenimiento propuesto permite una mayor anticipación a fallas críticas, particularmente en el sistema de refrigeración de baterías, reduciendo el riesgo de sobrecalentamiento, optimizando la disponibilidad operacional y fortaleciendo la continuidad del servicio.

Tabla 3-3. Descripción de siglas de periodicidad.

Sigla	Descripción
AHT	Equipo detenido (parada programada)
MEP	Equipo en operación
MPT	Mantenimiento basado en condición
MP	Mantenimiento preventivo
RCM	Mantenimiento centrado en confiabilidad

Fuente: Elaboración propia

3.5.IMPACTO EN LA DISPONIBILIDAD

En el contexto de operación de buses eléctricos, la disponibilidad representa uno de los indicadores más relevantes, ya que determina la capacidad de la flota para cumplir con los servicios programados y evitar pérdidas económicas asociadas a detenciones no planificadas.

Actualmente, el sistema de mantenimiento aplicado a la flota presenta un enfoque principalmente reactivo frente a fallas, lo que genera una disminución en la disponibilidad operacional de los buses, especialmente cuando se presentan fallas críticas asociadas al sistema de refrigeración de baterías, provocando detenciones inmediatas del vehículo por sobre temperatura.

A partir del análisis FMECA realizado, se identificó que las fallas relacionadas con el sistema de refrigeración generan tiempos de detención significativos, debido a que implican intervenciones correctivas, diagnósticos y reposición de componentes, afectando directamente la continuidad del servicio.

La implementación del plan de mantenimiento basado en RCM permite abordar de forma anticipada estos modos de falla, mediante tareas preventivas y basadas en condición, lo que reduce la frecuencia de fallas y el tiempo fuera de servicio del bus.

En este sentido, se espera una mejora en la disponibilidad operacional, debido a los siguientes factores:

- Reducción de fallas críticas asociadas al sobrecalentamiento de baterías.
- Disminución de tiempos de reparación mediante detección temprana de fallas.
- Mayor planificación de las actividades de mantenimiento, alcanzando niveles cercanos al 100%.
- Ejecución de tareas en turno nocturno, evitando interferencias con la operación diaria.

Como resultado de la aplicación del plan de mantenimiento mejorado, se proyecta un aumento en la disponibilidad de los buses, debido a la disminución de detenciones no programadas y a una mejor gestión de las intervenciones de mantenimiento.

3.6.FACTIBILIDAD TÉCNICA Y ECONÓMICA

La factibilidad técnica y económica del plan de mantenimiento propuesto se evaluó considerando los resultados obtenidos en el análisis FMECA, la cuantificación del riesgo económico y los costos asociados al plan de mantenimiento desarrollado mediante la metodología de Mantenimiento Centrado en la Confiabilidad (RCM).

Desde el punto de vista técnico, la implementación del plan es completamente viable, ya que las actividades propuestas se basan en tareas de inspección, diagnóstico y mantenimiento preventivo que pueden ser ejecutadas con los recursos disponibles en la empresa, sin requerir modificaciones estructurales en los buses ni inversiones en infraestructura adicional.

Asimismo, la planificación de las tareas durante el turno nocturno permite su ejecución sin afectar la operación diaria, lo que facilita su integración en la estrategia actual de mantenimiento.

Desde el punto de vista económico, el análisis de fallas desarrollado previamente evidencia que los modos de falla asociados al sistema de refrigeración de baterías generan altos costos de ineficiencia, debido a la detención del bus, pérdida de ingresos operacionales y posibles penalizaciones por incumplimiento del servicio.

En este contexto, el impacto económico asociado a la detención del bus fue estimado en función de la pérdida de continuidad operacional, considerando tiempos de detención, frecuencia de fallas y costos asociados a la indisponibilidad del servicio. De esta forma, se determinó el costo anual de ineficiencia a partir de la cantidad de fallas esperadas y del tiempo fuera de servicio del sistema.

Para estimar el número de fallas esperadas, se utilizó una simulación probabilística tipo Monte Carlo, considerando 10.000 escenarios posibles. Como base se utilizó el historial de fallas del sistema, correspondiente a 44 eventos anuales.

La ocurrencia de fallas fue modelada mediante una distribución de Poisson, representando eventos aleatorios en un periodo de tiempo. Para los escenarios con implementación de RCM, se consideraron reducciones probabilísticas en la ocurrencia de fallas, asociadas a la intervención de los modos de falla críticos identificados en el análisis FMECA.

Los resultados de la simulación muestran una reducción esperada a 32 fallas anuales para el escenario de intervención en componentes críticos, y a 24 fallas anuales para la implementación completa del plan RCM.

Tabla 3-4. Resultados de simulación Monte Carlo

Escenario	Promedio de fallas	Mediana	Rango probable (90%)
Plan actual sin RCM	44	44	34-55
RCM (componentes críticos)	32,1	32	23-42
RCM (plan completo)	24,2	24	16-33

Fuente: Elaboración propia en base a simulación probabilística tipo Monte Carlo (10.000 iteraciones).

A partir de estos resultados, se desarrolló la comparación económica entre el plan de mantenimiento actual y las propuestas basadas en RCM.

Tabla 3-5. Comparativo técnico–económica del plan de mantenimiento

Concepto	Plan actual sin RCM	Propuesta RCM (componentes críticos)	Propuesta RCM (plan completo)
N° de fallas esperadas	44	32	24
Tiempo fuera de servicio por falla (min)	60	30	20
Horas mantenimiento (h/año)	175	40	25
Porcentaje de planificación	50%	85%	100%
Costo de ineficiencia (USD/año)	\$ 92.400	\$ 33.600	\$ 16.800
Costo de mantenimiento (USD/año)	\$ -	\$ 12.000	\$ 18.758
Costo total (USD/año)	\$ 92.400	\$ 45.600	\$ 35.558

Fuente: Elaboración propia en base a análisis FMECA, simulación Monte Carlo y propuesta RCM.

La reducción en los costos de ineficiencia se debe principalmente a la disminución en el número de fallas y en los tiempos de detención del sistema, lo cual impacta directamente en la disponibilidad operacional del bus.

En el escenario actual, el sistema presenta altos niveles de mantenimiento reactivo, lo que genera detenciones no programadas y costos operacionales elevados. En contraste, la implementación del plan RCM permite intervenir directamente los modos de falla críticos, reduciendo la frecuencia de fallas y optimizando los tiempos de intervención.

La aplicación del RCM en los componentes críticos del sistema de baterías permite reducir el número de fallas desde 44 a 32 eventos anuales, lo cual se justifica por la intervención directa sobre los modos de falla con mayor criticidad identificados en el análisis FMECA, tales como fallas en el sistema de refrigeración, sensores térmicos y sistema de control BMS.

Por su parte, la implementación completa del plan RCM permite alcanzar una reducción a 24 fallas anuales, debido a la incorporación de tareas preventivas y basadas en condición en todos los subsistemas relevantes, lo que disminuye significativamente la probabilidad de ocurrencia de fallas.

Adicionalmente, el tiempo fuera de servicio por falla se reduce progresivamente de 60 a 30 y luego a 20 minutos, lo que contribuye directamente a mejorar la continuidad operacional del sistema.

En términos económicos, la implementación del plan RCM permite reducir el costo total anual desde 92.400 USD a 35.558 USD, lo que representa un ahorro significativo asociado a la disminución de fallas y a una mejor planificación del mantenimiento.

En consecuencia, el análisis técnico–económico demuestra que la implementación del mantenimiento centrado en confiabilidad no solo mejora la disponibilidad del sistema de baterías, sino que también permite optimizar los costos operacionales, validando su aplicación como una estrategia eficiente y sustentable para la gestión de mantenimiento en buses eléctricos.

Plan mejorado con RCM enfocado en componentes críticos

La aplicación de la metodología de Mantenimiento Centrado en la Confiabilidad (RCM) enfocada en los componentes críticos del sistema de baterías permite una reducción del número de fallas desde 44 a 32 fallas anuales. Este resultado se encuentra respaldado por la simulación probabilística tipo Monte Carlo desarrollada en el presente estudio, la cual considera 10.000 escenarios posibles de operación y mantenimiento.

Asimismo, el tiempo fuera de servicio por falla se reduce de 60 minutos a 30 minutos, lo que impacta directamente en la disponibilidad operacional de la flota, permitiendo una mayor continuidad del servicio.

En términos de mantenimiento, las horas de ejecución disminuyen desde 175 horas anuales en el escenario actual a aproximadamente 40 horas anuales, lo que refleja una optimización significativa en la planificación y ejecución de las actividades, enfocando los recursos en los componentes de mayor criticidad.

Adicionalmente, el porcentaje de planificación del mantenimiento aumenta desde un 50% a un 85%, evidenciando una transición desde un mantenimiento reactivo hacia un mantenimiento mayoritariamente planificado, lo cual permite mejorar la gestión de los recursos y reducir la ocurrencia de fallas no programadas.

En relación con los costos, el costo de ineficiencia operacional se reduce desde aproximadamente 92.400 USD/año a 33.600 USD/año, debido a la disminución en la frecuencia de fallas y en los tiempos de detención del sistema.

Considerando la incorporación del costo de mantenimiento preventivo asociado al plan RCM, estimado en 12.000 USD/año, se obtiene un costo total de 45.600 USD/año.

Estos resultados se encuentran resumidos en la Tabla 3-6, donde se compara el desempeño del plan actual con las propuestas basadas en RCM.

Esta mejora se explica por la intervención directa sobre los modos de falla críticos identificados en el análisis FMECA, tales como fallas en el sistema de refrigeración, sensores térmicos y sistema de control BMS, los cuales concentran una alta proporción de las fallas del sistema.

En consecuencia, la aplicación del RCM en los componentes críticos permite reducir significativamente la ocurrencia de fallas, optimizar los tiempos de intervención y mejorar la disponibilidad operacional del bus eléctrico, generando un impacto económico positivo para la organización.

Tabla 3-6. Actividad de mantenimiento

ACTIVIDAD DE MANTENIMIENTO: 1.1.1 INSPECCION DE FUGAS EN EL SISTEMA DE REFRIGERACIÓN DE BATERÍAS	
Realizado por: Técnico de mantenimiento	
Advertencia: Antes de cualquier intervención, asegurar que el bus se encuentre detenido, desenergizado y con el sistema de alta tensión (HV) aislado y bloqueado (LOTO). Utilizar elementos de protección personal: guantes, lentes de seguridad y ropa de trabajo adecuada. Evitar contacto directo con el refrigerante.	
Paso 1: Verificar que el bus se encuentre fuera de servicio y con sistema HV desenergizado.	
Paso 2: Inspeccionar visualmente mangueras, conexiones y racores del sistema de refrigeración.	
Paso 3: Identificar presencia de fugas, goteo, humedad o residuos visibles de refrigerante	
Paso 4: Revisar estado de abrazaderas, uniones y puntos de fijación.	
Paso 5: Detectar posibles grietas, desgaste por vibración o daño mecánico.	
Paso 6: Verificar correcto enrutamiento de las mangueras, evitando contacto con superficies calientes o móviles.	
Paso 7: Registrar condiciones detectadas y reportar anomalías para intervención correctiva.	

Fuente: Elaboración propia

Frecuencia: Según plan de mantenimiento RCM (ver Tabla 3-1).

3.7.EVALUACIÓN DE COSTOS OPERACIONALES

Al analizar la factibilidad técnica y económica del plan de mantenimiento propuesto, se evidencian resultados favorables que respaldan su implementación en la operación de buses eléctricos de la empresa.

Desde el punto de vista técnico, la propuesta desarrollada mediante la metodología RCM permite aumentar la confiabilidad del sistema de baterías, principalmente a través de la intervención del sistema de refrigeración, el cual fue identificado como subsistema crítico dentro del análisis FMECA. Esto se traduce en una reducción significativa de fallas asociadas a sobrecalentamiento, pérdida de eficiencia térmica y detenciones no programadas.

En este contexto, se estima que la aplicación del plan de mantenimiento mejorado permite reducir el número de fallas anuales desde 44 a 24 eventos, lo que representa una disminución aproximada del 45%. Esta reducción impacta directamente en la continuidad operativa del bus eléctrico, disminuyendo las interrupciones del servicio

Adicionalmente, se observa una reducción en los tiempos fuera de servicio, pasando de un promedio de 60 minutos por falla en el escenario actual a aproximadamente 20 minutos en el escenario con mantenimiento basado en RCM, debido a la detección temprana de fallas y la incorporación de mantenimiento preventivo y basado en condición.

A continuación, se presenta la comparación de la disponibilidad del sistema de baterías entre el escenario actual y el escenario con implementación del plan de mantenimiento basado en RCM.

Tabla 3-7, Comparación de indicadores de confiabilidad y disponibilidad del sistema de baterías.

Equipo	Sistema	N° de Fallas	Tiempo Detenido (min)	Tiempo disponible (min)	MTBF (min)	MTTR (min)	Disponibilidad	Condición
Bus eléctrico King Long	Sistema de baterías	44	2640	52560	1194	60	95,52	Plan actual
Bus eléctrico King Long	Sistema de baterías	24	480	52560	2190	20	99,1%	Plan con RCM
							+3,9%	Mejora

Fuente: Elaboración propia

Al analizar los resultados obtenidos, se evidencia una mejora en la disponibilidad del sistema, lo cual se debe principalmente a la reducción de fallas críticas y a la optimización de los tiempos de intervención. Si bien el sistema presenta una alta disponibilidad inicial, la mejora obtenida resulta significativa considerando la criticidad operacional del sistema de baterías dentro del funcionamiento del bus eléctrico.

Desde el punto de vista económico, la implementación del plan de mantenimiento basado en RCM presenta beneficios operacionales relevantes asociados principalmente a la reducción de fallas no programadas y a la disminución de tiempos de detención del sistema de baterías.

El costo anual estimado asociado a la aplicación del plan de mantenimiento corresponde aproximadamente a 18.758 USD/año. Sin embargo, la disminución de fallas críticas y la optimización de las actividades de mantenimiento permiten reducir significativamente las pérdidas operacionales derivadas de la indisponibilidad del bus eléctrico.

En este contexto, se estima un ahorro operacional anual aproximado de 56.842 USD, asociado principalmente a:

- Reducción de fallas no programadas.
- Disminución de tiempos fuera de servicio.
- Optimización de intervenciones de mantenimiento.
- Mejora en la planificación de actividades.
- Aumento de disponibilidad operacional del sistema.

Los resultados obtenidos evidencian que la aplicación de estrategias de mantenimiento centrado en confiabilidad permite mejorar el desempeño operacional del sistema de baterías y reducir los costos asociados a mantenimiento correctivo e interrupciones operacionales.

Adicionalmente, el incremento de disponibilidad desde un 95,52% a un 99,1% demuestra una mejora significativa en la continuidad operacional del bus eléctrico, contribuyendo a una operación más eficiente y confiable para la empresa.

En consecuencia, el análisis técnico–económico desarrollado permite concluir que la implementación de metodologías RCM y FMECA contribuye positivamente a la optimización de la gestión de mantenimiento, permitiendo reducir riesgos operacionales, disminuir pérdidas asociadas a fallas y mejorar la eficiencia operacional del sistema de baterías de los buses eléctricos.

CONCLUSIÓN

La aplicación de la metodología de Mantenimiento Centrado en la Confiabilidad (RCM) permitió comprender en profundidad la criticidad de los sistemas que componen el bus eléctrico King Long XMQ6900G, facilitando la definición de estrategias de mantenimiento orientadas a asegurar la continuidad operativa del activo en su contexto real de operación.

El análisis del sistema de baterías de alta tensión evidenció su rol crítico dentro del funcionamiento del bus eléctrico, permitiendo identificar, a través del historial de fallas y el análisis técnico, los principales modos de falla que afectan su desempeño, destacando aquellos asociados al sistema de refrigeración.

Mediante la aplicación del análisis de criticidad y la metodología FMECA, se determinó que el sistema de refrigeración de baterías corresponde al subsistema más crítico, debido a su influencia directa en la temperatura de operación, la eficiencia energética y la seguridad del sistema. Se identificaron modos de falla relevantes, tales como deterioro o ruptura de mangueras, obstrucciones en líneas, fallas en la bomba de circulación y problemas en el control térmico mediante el sistema BMS.

El estudio permitió evidenciar que el plan de mantenimiento actual presenta limitaciones importantes, principalmente en la falta de actividades preventivas específicas, baja planificación y escasa integración de mantenimiento basado en condición, lo que favorece la ocurrencia de fallas no programadas y afecta la disponibilidad operacional.

A partir de estos resultados, se desarrolló un plan de mantenimiento basado en RCM, incorporando actividades preventivas y basadas en condición, orientadas a mitigar los modos de falla identificados. Este plan considera mejoras como el aumento en la frecuencia de inspecciones, control de nivel de refrigerante, purga del sistema, diagnóstico del BMS y estandarización de procedimientos críticos.

Asimismo, se estableció una planificación de mantenimiento alineada con la operación real de los buses, permitiendo ejecutar las actividades principalmente en turno nocturno, sin afectar la continuidad del servicio.

Desde el punto de vista técnico-económico, los resultados evidencian que la implementación del plan propuesto es viable y beneficiosa, permitiendo reducir el número de fallas anuales de 44 a 24 eventos, disminuir los tiempos de detención y mejorar la disponibilidad del sistema de baterías.

Al analizar los resultados obtenidos, se evidencia una mejora en la disponibilidad del sistema, la cual se debe principalmente a la reducción de fallas críticas y a la optimización de los tiempos de intervención. Si bien el sistema presenta una alta disponibilidad inicial, la mejora obtenida resulta significativa considerando la criticidad operacional del sistema de baterías dentro del funcionamiento del bus eléctrico.

Desde el punto de vista económico, la implementación del plan de mantenimiento basado en RCM presenta beneficios operacionales relevantes asociados a la reducción de fallas no programadas y a la disminución de tiempos de detención del sistema.

El costo anual estimado del plan corresponde aproximadamente a 18.758 USD/año, mientras que los costos asociados a fallas no controladas generan pérdidas relevantes debido a la indisponibilidad del sistema. Adicionalmente, se estimó un ahorro operacional anual aproximado de 56.842 USD, asociado principalmente a la disminución de fallas, optimización de las intervenciones y mejora en la planificación del mantenimiento.

En consecuencia, la aplicación de la metodología RCM permite optimizar la gestión del mantenimiento, mejorar la confiabilidad del sistema de baterías y fortalecer la continuidad del servicio de transporte público eléctrico, contribuyendo a una operación más eficiente y sustentable.

RECOMENDACIONES

En base a los resultados obtenidos en el presente trabajo, se proponen las siguientes recomendaciones para fortalecer la gestión del mantenimiento y la operación del sistema de buses eléctricos:

En primer lugar, se recomienda integrar la gestión operacional dentro de la estrategia de mantenimiento, considerando que el comportamiento de conducción y la carga del bus influyen directamente en el desempeño térmico del sistema de baterías. La operación en condiciones de alta exigencia, como pendientes pronunciadas o sobrecarga de pasajeros, incrementa la generación de calor y acelera los mecanismos de degradación del sistema.

En este contexto, se sugiere implementar programas de capacitación y reentrenamiento para conductores, enfocados en la conducción eficiente de buses eléctricos, con énfasis en el uso adecuado de la potencia en pendientes, control de aceleraciones y gestión de la carga del vehículo.

Asimismo, se recomienda incorporar indicadores operacionales dentro del sistema de mantenimiento, tales como carga promedio, ciclos de exigencia, temperatura en ruta y comportamiento térmico del sistema, permitiendo una gestión integral que relacione la operación con la confiabilidad del activo.

Adicionalmente, se sugiere implementar sistemas de monitoreo en tiempo real (telemetría), que permitan registrar variables críticas del sistema de baterías y anticipar fallas mediante análisis de datos, fortaleciendo el mantenimiento basado en condición.

Finalmente, se recomienda dar continuidad al enfoque de mejora continua mediante la actualización periódica del análisis FMECA y la revisión del plan de mantenimiento, con el objetivo de adaptarlo a las condiciones reales de operación y al comportamiento de la flota en el tiempo.

Bibliografía

- Espacio T. (2023). *Buses eléctricos en Valparaíso superan los dos millones de viajes*. Obtenido de Radio Stella Maris: <https://www.radiostellamaris.cl/buses-electricos-valparaiso-dos-millones-viajes/>
- International Organization for Standardization. (2012). *ISO 39001:2012 Road traffic safety management systems*.
- King Long United Automotive Industry Co. Ltd. (2023). *Manual técnico del bus eléctrico XMQ6900G*. Xiamen, China: King Long United Automotive Industry Co. Ltd.
- Ministerio de Transportes y Telecomunicaciones. (1991). *Decreto Supremo N°122: Requisitos técnicos de vehículos de locomoción colectiva*.
- Ministerio de Transportes y Telecomunicaciones. (2001). *Decreto Supremo N°130: Normas de emisión de contaminantes*.
- Ministerio de Transportes y Telecomunicaciones. (2023). *Decreto N°22: Condiciones operacionales del transporte público*.
- Ministerio de Transportes y Telecomunicaciones. (2024). *Estrategia nacional de electromovilidad*. Obtenido de Ministerio de Transportes y Telecomunicaciones: <https://www.mtt.gob.cl/archivos/37074>
- Moubray, J. (1997). *Reliability-centered maintenance*. Oxford: Butterworth-Heinemann.
- Rodríguez Hidalgo, J. (2023). *Presentación de capacitación: conocimiento de producto – buses eléctricos King Long XMQ6900G*. Valparaíso: Vivipra.
- SAE International. (2009). *SAE JA1011: Evaluation criteria for reliability-centered maintenance (RCM) processes*. Warrendale, PA, Estados Unidos: SAE International.
- SAE International. (2009). *SAE JA1011: Evaluation criteria for reliability-centered maintenance (RCM) processes*. SAE International.
- Trolebuses de Chile S.A. (2025). *Historia de Trolebuses de Chile S.A.* Obtenido de Trolebuses de Chile.

Anexos

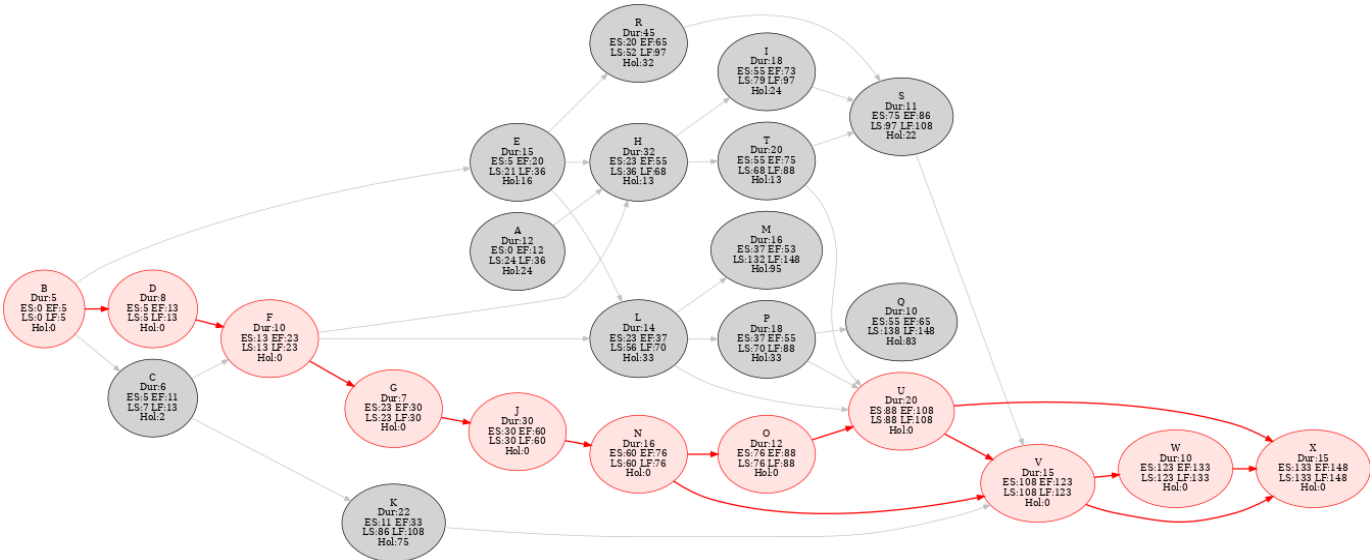
Anexo 1:Tabla de jerarquización componentes bus eléctrico KingLong XMQ6900G.

Sistemas	Componentes de Bus Electrico XMQ6900G	FF	TR	ISHA	CR	IF	IC
Estructura mecánica	Chasis (estructura principal)	1	5	5	5	5	20
	Bastidor inferior	1	5	5	5	5	20
	Bastidor superior	1	5	5	5	5	20
	Subchasis delantero	1	4	5	4	5	18
	Subchasis trasero	1	4	5	4	5	18
	Puntos de anclaje de suspensión	1	4	5	4	4	17
	Puntos de anclaje de carrocería	1	4	4	3	3	14
	Refuerzos estructurales	1	5	5	5	5	20
Sistema de Suspensión	fuelle de suspension neumatica	2	3	4	2	4	26
	Amortiguadores	1	3	3	2	3	11
	Brazos de suspensión	1	4	4	4	4	16
	Barra estabilizadora	2	3	3	3	3	24
	Bujes de goma	4	3	3	2	3	44
	Rótulas	3	3	4	3	4	42
	Válvulas niveladoras	1	3	4	3	4	14
	Tuberías neumáticas de suspensión	1	2	4	2	4	12
Sistema Frenos	Racores y conexiones	1	2	4	2	4	12
	Sistema modulo ECAS	2	4	4	5	4	34
	Compresor de aire	1	4	5	4	5	18
	acumulador de aire	1	3	5	3	5	16
	Válvula de freno	1	3	5	3	5	16
	Discos de freno	1	3	5	3	5	16
	Pastillas de freno	1	2	5	3	5	15
	Calipers	1	3	5	3	5	16
Sistema dePropulsión eléctrica	Modulo EBS	2	4	5	4	5	36
	Sensores de velocidad de rueda	2	2	4	2	4	24
	Sistema de frenado regenerativo	1	4	4	4	4	16
	Motor eléctrico de tracción	1	5	5	5	5	20
	Inversor	1	5	5	5	5	20
	Controlador de motor (MCD)	1	4	5	4	5	18
	Reductor	1	4	4	4	5	17
	Diferencial	1	4	4	4	5	17
Sistema de Baterías (Alta tensión)	Eje motriz	1	4	5	4	5	18
	Pack de baterías	2	5	5	5	5	40
	Módulos de batería	1	5	5	5	5	20
	Celdas	1	5	5	5	5	20
	BMS (Battery Management System)	1	4	5	4	5	18
	Sensores de temperatura	1	2	4	2	4	12
	Sistema de refrigeración de baterías	5	4	5	4	5	90
	Cableado de alta tensión	1	4	5	4	5	18
Sistema Eléctrico baja tensión	Conectores HV	1	3	5	3	5	16
	Batería auxiliar (12V/24V)	3	2	3	3	4	36
	Convertidor DC/DC	1	3	3	3	4	13
	Fusibles	1	1	2	1	3	7
	Relés	1	1	2	1	3	7
	Cableado	1	3	3	3	4	13
	Iluminación exterior	1	1	3	2	3	9
	Iluminación interior	1	1	1	1	2	5
Sistema Eléctrico baja tensión	Bocina	3	1	2	1	2	18
	Intermitentes (HAZARD)	2	1	3	2	3	18
	VCU (Vehicle Control Unit)	2	4	5	5	5	38
	ECU de tracción	1	4	5	4	5	18
	ECU de baterías	1	4	5	4	5	18
	Red CAN	1	4	5	4	5	18
	Sensores de velocidad	1	2	4	2	4	12
	Sensores de presión	1	2	3	2	4	11
Sistema Neumático	Sensores de temperatura	1	2	3	2	4	11
	Panel de instrumentos	1	2	2	2	3	9
	Pantalla del conductor	1	2	2	2	3	9
	Compresor	1	4	5	4	5	18
	Acumulador de aire	1	3	5	3	5	16
	Líneas neumáticas	1	2	4	2	4	12
	Válvulas neumáticas	1	3	4	3	4	14
	Sistema neumático de puertas	4	3	5	3	5	64
Sistema Térmico	Radiadores	1	3	3	3	4	13
	Bombas de refrigeración	1	3	4	3	4	14
	Intercambiadores de calor	1	3	4	3	4	14
	Sistema HVAC	1	4	2	3	3	12
	Compresor de aire acondicionado	1	4	2	4	3	13
	tapa de deposito de expansion	5	2	3	1	4	50
	Ventiladores	1	2	3	2	3	10
	Puertas de pasajeros	1	3	5	3	5	16
Sistema Carrocería	Sistema de apertura de puertas	1	3	5	3	5	16
	Rampa PMR	1	3	4	3	4	14
	Asientos	1	2	1	2	2	7
	Pasamanos	1	1	1	1	1	4
	Vidrios	4	2	3	3	3	44
	Parabrisas	3	3	4	4	4	45
	Sistema contra incendios	2	4	5	4	5	36
	Sensores de incendio	1	2	5	2	5	14
Sistema Seguridad	Botón de emergencia	1	1	5	1	5	12
	Sistema de corte HV	1	4	5	4	5	18
	Alarmas	1	2	4	2	4	12
	Luces de emergencia	2	1	4	2	4	22
SISTEMA DE RODADURA	Neumatocos triangler	5	2	5	3	5	75

Anexo 2. Registro de fallas por sistema del bus eléctrico King Long XMQ6900G

Sistema del bus eléctrico	Número de fallas	Horas totales	Horas por falla
Sistema estructural (chasis y carrocería)	21	115,5	5,5
Sistema de suspensión	20	150	7,5
Sistema de frenos	4	37	9,25
Sistema de propulsión eléctrica	1	16	16
Sistema de baterías (alta tensión)	40	644	16,1
Sistema eléctrico baja tensión	11	17,5	1,59
Sistema de control electrónico	1	16	16
Sistema neumático	21	122,5	5,83
Sistema térmico	38	95	2,5
Sistema de seguridad	3	17	5,67
Sistema de rodadura	228	450	1,97
Sistema de dirección	2	12	6

Anexo3. Diagrama de ruta crítica del plan de mantenimiento basado en RCMdo de



Anexo 4. Programa de mantenimiento actual bus eléctrico XMQ6900G

	REVISION 2 Modelos: XMQ 6900G eTech	F-AS-VVP-13 30/08/2024 V00 Pag 1 de 1
REVISION I INSPECCIÓN		
NÚMERO DE OT:		FECHA:
CLIENTE:		MODELO:
PLACA PATENTE:		Nº CHASIS:
KILOMETRAJE:		HORA INICIO: HORA TERMINO:
Nº INTERNO:		Nº CARRO:
BMS - ADMINISTRADOR DE BATERÍAS ✓		
1	LIMPIEZA CON AIRE COMPRIMIDO Y PAÑO SECO	
2	ESTADO Y SUJECION DE CONEXIONES ELECTRICAS Y LINEA DE TIERRA.	
DISTRIBUIDOR ✓		
4	ESTADO Y SUJECIÓN DE CONEXIONES ELECTRICAS DE ALTO VOLTAJE	
5	ESTADO DE MANGUERAS Y REAPRETE DE ABRAZADERAS	
MCU - CONTROLADOR DE MOTOR ✓		
6	ESTADO Y SUJECIÓN DE CONEXIONES ELECTRICAS TRIFASICAS	
7	ESTADO DE MANGUERAS Y REAPRETE DE ABRAZADERAS	
MOTOR ✓		
8	ESTADO Y SUJECIÓN DE CONEXIONES ELECTRICAS Y LINEA DE TIERRA.	
9	ESTADO DE MANGUERAS Y REAPRETE DE ABRAZADERAS	
SISTEMA REFRIGERACIÓN ✓		
10	NIVEL DE REFRIGERANTE DE HV AGREGAR SI ES NECESARIO	
11	NIVEL DE REFRIGERANTE DE BATERIA HV Y AGREGAR SI ES NECESARIO	
12	REVISION DE MANGUERAS Y REAPRIETE DE ABRAZADERAS	
COMPRESOR DE AIRE ✓		
13	ESTADO Y SUJECIÓN DE CONEXIONES ELECTRICAS Y LINEA DE TIERRA.	
14	REVISAR FUGAS DE AIRE	
BATERÍAS DE ALTO VOLTAJE (HV) ✓		
15	LIMPIEZA CON AIRE COMPRIMIDO Y PAÑO SECO	
16	ESTADO Y SUJECIÓN DE CONEXIONES ELECTRICAS Y LINEA DE TIERRA.	
17	AISLAMIENTO DE MOTOR, BOMBA HIDRAULICA Y COMPRESOR	
SISTEMA DE DIRECCIÓN HIDRAULICA ✓		
18	REVISAR NIVELES Y FUGAS	
SISTEMA ELECTRICO BAJO VOLTAJE ✓		
19	LIMPIAR COMPARTIMIENTO DE BATERIAS CON AIRE COMPRIMIDO	
20	REVISAR CONEXIONES DE BATERIA (BORNES)	
EJE TRASERO ✓		
21	EXISTENCIA PERDIDA DE LUBRICANTE POR RETEN Y CUBOS	
EJE DELANTERO ✓		
22	INSPECION DE GRASA DE CUBOS DELANTERO	
SISTEMA DE FRENO ✓		
23	DRENAR PRESENCIA DE HUMEDAD EN ACUMULADORES DE AIRE	
24	REVISAR FUGAS	
NEUMATICOS		
25	APIRIETE DE TUERCAS DE FIJACIÓN DE LAS TUERCAS	✓
26	PRESION DE NEUMATICOS 110 PSI	
AIRE ACONDICIONADO Y CALEFACCIÓN ✓		
27	NIVEL DE REFRIGERANTE SISTEMA CALEFACCIÓN, REVISAR POSIBLES PERDIDAS	
ENGRASE		
28	ENGRASE MUÑONES	
29	ENGRASE CRUCETAS DE CARDAN Y BRIDA DESLIZANTE	
30	ENGRASE TERMINALES DE DIRECCIÓN	
31	ENGRASE ARTICULACIÓN DE PUERTAS	
32	ENGRASE CHICHARRAS DE FRENO	

Fuente: Elaboración propia en base a pautas de mantenimiento proporcionadas por la empresa.

Anexo 5. Programa de mantenimiento actual bus eléctrico XMQ6900G

	MANTENIMIENTO PREVENTIVO 1 Modelos: XMQ 6900G eTech	F-AS-VVP-13
		30/08/2024
		V00
		Pag 1 de 1

NÚMERO DE OT:	FECHA:
CLIENTE:	MODELO:
PLACA PATENTE:	Nº CHASIS:
KILOMETRAJE:	HORA INICIO: HORA TERMINO:
Nº INTERNO:	Nº CARRO:

BMS - ADMINISTRADOR DE BATERÍAS		✓
1	LIMPIEZA CON AIRE COMPRIMIDO Y PAÑO SECO	
2	ESTADO Y SUJECIÓN DE CONEXIONES ELECTRICAS Y LINEA DE TIERRA.	
DISTRIBUIDOR		✓
4	ESTADO Y SUJECIÓN DE CONEXIONES ELECTRICAS DE ALTO VOLTAJE	
5	ESTADO DE MANGUERAS Y REAPRETE DE ABRAZADERAS	
MCU - CONTROLADOR DE MOTOR		✓
6	ESTADO Y SUJECIÓN DE CONEXIONES ELECTRICAS TRIFASICAS	
7	ESTADO DE MANGUERAS Y REAPRETE DE ABRAZADERAS	
MOTOR		✓
8	ESTADO Y SUJECIÓN DE CONEXIONES ELECTRICAS Y LINEA DE TIERRA.	
9	ESTADO DE MANGUERAS Y REAPRETE DE ABRAZADERAS	
SISTEMA REFRIGERACIÓN		✓
10	NIVEL DE REFRIGERANTE DE HV AGREGAR SI ES NECESARIO	
11	NIVEL DE REFRIGERANTE DE BATERIA HV Y AGREGAR SI ES NECESARIO	
12	REVISION DE MANGUERAS Y REAPRIETE DE ABRAZADERAS	
COMPRESOR DE AIRE		✓
13	ESTADO Y SUJECIÓN DE CONEXIONES ELECTRICAS Y LINEA DE TIERRA.	
14	REVISAR FUGAS DE AIRE	
BATERÍAS DE ALTO VOLTAJE (HV)		✓
15	LIMPIEZA CON AIRE COMPRIMIDO Y PAÑO SECO	
16	ESTADO Y SUJECIÓN DE CONEXIONES ELECTRICAS Y LINEA DE TIERRA.	
17	AISLAMIENTO DE MOTOR, BOMBA HIDRAULICA Y COMPRESOR	
SISTEMA DE DIRECCIÓN HIDRAULICA		✓
18	REVISAR NIVELES Y FUGAS	
SISTEMA ELECTRICO BAJO VOLTAJE		✓
19	LIMPIAR COMPARTIMIENTO DE BATERÍAS CON AIRE COMPRIMIDO	
20	REVISAR CONEXIONES DE BATERIA (BORNES)	

EJE TRASERO		✓
21	REVISAR NIVEL DE ACEITE DIFERENCIAL MOBILUBE SAE 80W90 APIGL5	
22	ESTADO DE CRUCETA Y BRIDASLIZANTE	
SISTEMA DE DIRECCIÓN		✓
23	REVISAR ACEITE Y FILTRO DE DIRECCIÓN ATF DEXRON 3	
24	REVISAR FUGAS DE ACEITE EN CAJA DE DIRECCIÓN Y BOMBA HIDRAULICA	
EJE DELANTERO		✓
25	HOLGURA AXIAL DE MUÑONES (AJUSTAR SI ES NECESARIO)	
26	EXISTENCIA DE PERDIDA DE LUBRICANTE POR RETENES DE CUBO	
SISTEMA DE FRENO		✓
27	REVISAR DESGASTE DE PASTILLAS DE FRENO DESMONAR F	
28	DRENAR PRESENCIA DE HUMEDAD EN ACUMULADORES DE AIRE	
29	CAMBIO FILTRO SECADOR DE AIRE	
30	CAMBIO FILTRO AIRE COMPRESOR	
SISTEMA DE SUSPENSION		✓
31	APRIETE Y FIJACIÓN DE LOS TENSORES	
NEUMATICOS		✓
32	APRIETE DE TUERCAS DE FIJACIÓN DE LAS TUERCAS	
33	PRESION DE NEUMATICOS 110 PSI	
AIRE ACONDICIONADO Y CALEFACCIÓN		✓
34	NIVEL DE REFRIGERANTE SISTEMA CALEFACCIÓN,	
35	FUNCIONAMIENTO AIRE ACONDICIONADO (FRIO - CALOR)	
ENGRASE		✓
36	ENGRASE MUÑONES	
37	ENGRASE CRUCETAS DE CARDAN Y BRIDA DESLIZANTE	
38	ENGRASE TERMINALES DE DIRECCIÓN	
39	ENGRASE ARTICULACIÓN DE PUERTAS	
40	ENGRASE CHICHARRAS DE FRENO	

Fuente: Elaboración propia en base a pautas de mantenimiento proporcionadas por la empresa.

Anexo 6. Programa de mantenimiento actual bus eléctrico XMQ6900G

	MANTENIMIENTO PREVENTIVO 2 Modelos: XMQ 6900G eTech	F-AS-VVP-13
		30/08/2024
		V00
		Pag 1 de 1

NÚMERO DE OT:	FECHA:	
CLIENTE:	MODELO:	
PLACA PATENTE:	Nº CHASIS:	
KILOMETRAJE:	HORA INICIO:	HORA TERMINO:
Nº INTERNO:	Nº CARRO:	

BMS - ADMINISTRADOR DE BATERÍAS	✓
1 LIMPIEZA CON AIRE COMPRIMIDO Y PAÑO SECO	
2 ESTADO Y SUJECION DE CONEXIONES ELECTRICAS Y LINEA DE TIERRA.	
DISTRIBUIDOR	✓
4 ESTADO Y SUJECIÓN DE CONEXIONES ELECTRICAS DE ALTO VOLTAJE	
5 ESTADO DE MANGUERAS Y REAPRETE DE ABRAZADERAS	
MCU - CONTROLADOR DE MOTOR	✓
6 ESTADO Y SUJECIÓN DE CONEXIONES ELECTRICAS TRIFASICAS	
7 ESTADO DE MANGUERAS Y REAPRETE DE ABRAZADERAS	
MOTOR	✓
8 ESTADO Y SUJECIÓN DE CONEXIONES ELECTRICAS Y LINEA DE TIERRA.	
9 ESTADO DE MANGUERAS Y REAPRETE DE ABRAZADERAS	
SISTEMA REFRIGERACIÓN	✓
10 NIVEL DE REFRIGERANTE DE HV AGREGAR SI ES NECESARIO	
11 NIVEL DE REFRIGERANTE DE BATERIA HV Y AGREGAR SI ES NECESARIO	
12 REVISION DE MANGUERAS YREAPRIETE DE ABRAZADERAS	
COMPRESOR DE AIRE	✓
13 ESTADO Y SUJECIÓN DE CONEXIONES ELECTRICAS Y LINEA DE TIERRA.	
14 REVISAR FUGAS DE AIRE	
BATERÍAS DE ALTO VOLTAJE (HV)	✓
15 LIMPIEZA CON AIRE COMPRIMIDO Y PAÑO SECO	
16 ESTADO Y SUJECIÓN DE CONEXIONES ELECTRICAS Y LINEA DE TIERRA.	
17 AISLAMIENTO DE MOTOR, BOMBA HIDRAULICA Y COMPRESOR	
SISTEMA DE DIRECCIÓN HIDRAULICA	✓
18 REVISAR NIVELES Y FUGAS	
SISTEMA ELECTRICO BAJO VOLTAJE	✓
19 LIMPIAR COMPARTIMIENTO DE BATERIAS CON AIRE COMPRIMIDO	
20 REVISAR CONEXIONES DE BATERIA (BORNES)	
21 TESTEAR BATERIAS	

EJE TRASERO	✓
22 CAMBIO ACEITE DIFERENCIAL MOBILUBE SAE 80W90 APIGL5	
23 ESTADO DE CRUCETAS Y BRIDA DESLIZANTE	
SISTEMA DE DIRECCIÓN	✓
24 REVISAR ARTICULACIONES DE DIRECCIÓN	
25 REVISAR FUGAS DE ACEITE EN CAJA DE DIRECCIÓN Y BOMBA HIDRAULICA	
EJE DELANTERO	✓
26 HOLGURA AXIAL DE MUÑONES (AJUSTAR SI ES NECESARIO)	
27 MANTENCION DE MASAS DELANTERAS (GRASAXHP222 MOBILGREASE	
CARDAN	✓
28 REVISAR PERNOS DE FIJACIÓN	
SISTEMA DE FRENO	✓
29 REVISAR DESGASTE PASTILLAS DE FRENO (DESMONTAR LA RUEDA)	
30 CAMBIAR FILTRO SECADOR DE AIRE	
31 DRENAR PRESENCIA DE DE HUMEDAD EN ACUMULADORES DE AIRE	
32 CAMBIO FILTRO DE AIRE	
SISTEMA DE SUSPENSION	✓
33 LIMPIEZA DE FUELLES DE SUSPENSION DE AIRE Y SOPORTE INFERIOR	
NEUMATICOS	✓
34 APRIETE DE TUERCAS DE FIJACIÓN DE LAS TUERCAS 600 N	
35 PRESION DE NEUMATICOS 110 PSI	
AIRE ACONDICIONADO Y CALEFACCIÓN	✓
36 NIVEL DE REFRIGERANTE SISTEMA CALEFACCIÓN, REVISAR POSIBLES PERDIDAS	
37 FUNCIONAMIENTO AIRE ACONDICIONADO (FRIO - CALOR)	
38 LIMPIEZA FILTRO SALON (LAVADO DESENGRASANTE)	
ENGRASE	✓
39 ENGRASE MUÑONES	
40 ENGRASE CRUCETAS DE CARDAN Y BRIDA DESLIZANTE	
41 ENGRASE TERMINALES DE DIRECCIÓN	
42 ENGRASE ARTICULACIÓN DE PUERTAS	
43 ENGRASE CHICHARRAS DE FRENO	

Fuente: Elaboración propia en base a pautas de mantenimiento proporcionadas por la empresa.

Anexo 7. Programa de mantenimiento actual bus eléctrico XMQ6900G

	MANTENIMIENTO PREVENTIVO 3 Modelos: XMQ 6900G eTech	F-AS-VVP-13
		30/08/2024
		V00
		Pag 1 de 1

NÚMERO DE OT:	FECHA:
CLIENTE:	MODELO:
PLACA PATENTE:	Nº CHASIS:
KILOMETRAJE:	HORA INICIO: HORA TERMINO:
Nº INTERNO:	Nº CARRO:

BMS - ADMINISTRADOR DE BATERÍAS	✓
1 LIMPIEZA CON AIRE COMPRIMIDO Y PAÑO SECO	
2 ESTADO Y SUJECIÓN DE CONEXIONES ELECTRICAS Y LINEA DE TIERRA.	
DISTRIBUIDOR	✓
4 ESTADO Y SUJECIÓN DE CONEXIONES ELECTRICAS DE ALTO VOLTAJE	
5 ESTADO DE MANGUERAS Y REAPRETE DE ABRAZADERAS	
MCU - CONTROLADOR DE MOTOR	✓
6 ESTADO Y SUJECIÓN DE CONEXIONES ELECTRICAS TRIFASICAS	
7 ESTADO DE MANGUERAS Y REAPRETE DE ABRAZADERAS	
MOTOR	✓
8 ESTADO Y SUJECIÓN DE CONEXIONES ELECTRICAS Y LINEA DE TIERRA.	
9 ESTADO DE MANGUERAS Y REAPRETE DE ABRAZADERAS	
SISTEMA REFRIGERACIÓN	✓
10 NIVEL DE REFRIGERANTE DE HV AGREGAR SI ES NECESARIO	
11 NIVEL DE REFRIGERANTE DE BATERIA HV Y AGREGAR SI ES NECESARIO	
12 REVISION DE MANGUERAS Y REAPRIETE DE ABRAZADERAS	
COMPRESOR DE AIRE	✓
13 ESTADO Y SUJECIÓN DE CONEXIONES ELECTRICAS Y LINEA DE TIERRA.	
14 REVISAR FUGAS DE AIRE	
BATERÍAS DE ALTO VOLTAJE (HV)	✓
15 LIMPIEZA CON AIRE COMPRIMIDO Y PAÑO SECO	
16 ESTADO Y SUJECIÓN DE CONEXIONES ELECTRICAS Y LINEA DE TIERRA.	
17 AISLAMIENTO DE MOTOR, BOMBA HIDRAULICA Y COMPRESOR	
SISTEMA DE DIRECCIÓN HIDRAULICA	✓
18 REVISAR NIVELES Y FUGAS	
SISTEMA ELECTRICO BAJO VOLTAJE	✓
19 LIMPIAR COMPARTIMIENTO DE BATERIAS CON AIRE COMPRIMIDO	
20 REVISAR CONEXIONES DE BATERIA (BORNES)	
21 TESTEAR BATERIAS	

EJE TRASERO	✓
22 NIVEL ACEITE DIFERENCIAL MOBILUBE SAE 80W90 API GL5	
23 ESTADO DE CRUCETAS Y BRIDA DESLIZANTE	
SISTEMA DE DIRECCIÓN	✓
24 REVISAR ARTICULACIONES DE DIRECCIÓN	
25 REVISAR NIVEL DE ACEITE Y FUGAS EN CAJA DE DIRECCIÓN Y BOMBA HIDRAULICA	
EJE DELANTERO	✓
26 REVISAR HOLGURA AXIAL DE MUÑONES (AJUSTAR SI ES NECESARIO)	
SISTEMA DE FRENO	✓
27 REVISAR DESGASTE PASTILLAS DE FRENO (DESMONTAR LA RUEDA)	
28 CAMBIAR FILTRO SECADOR DE AIRE	✓
29 DRENAR PRESENCIA DE DE HUMEDAD EN ACUMULADORES DE AIRE	
30 CAMBIO FILTRO DE AIRE COMPRESOR	
SISTEMA DE SUSPENSION	
31 LIMPIEZA DE FUELLES DE SUSPENSION DE AIRE Y SOPORTE INFERIOR	
32 REAPRIETE FIJACIÓN DE TENSORES	✓
NEUMATICOS	
33 APRIETE DE TUERCAS DE FIJACIÓN DE LAS TUERCAS 600 N	✓
34 PRESION DE NEUMATICOS 110 PSI	
35	
AIRE ACONDICIONADO Y CALEFACCIÓN	✓
36 NIVEL DE REFRIGERANTE SISTEMA CALEFACCIÓN, REVISAR POSIBLES PERDIDAS	
37 FUNCIONAMIENTO AIRE ACONDICIONADO (FRIO - CALOR)	
38 LIMPIEZA FILTRO SALON (LAVADO DESENGRASANTE)	
ENGRASE	✓
39 ENGRASE MUÑONES	
40 ENGRASE CRUCETAS DE CARDAN Y BRIDA DESLIZANTE	
41 ENGRASE TERMINALES DE DIRECCIÓN	
42 ENGRASE ARTICULACIÓN DE PUERTAS	
43 ENGRASE CHICHARRAS DE FRENO	

Fuente: Elaboración propia en base a pautas de mantenimiento proporcionadas por la empresa.

Anexo 8. Programa de mantenimiento actual bus eléctrico XMQ6900G

	MANTENIMIENTO PREVENTIVO 4 Modelos: XMQ 6900G eTech	F-AS-VVP-13
		30/08/2024
		V00
		Pag 1 de 1

NÚMERO DE OT:	FECHA:	
CLIENTE:	MODELO:	
PLACA PATENTE:	N° CHASIS:	
KILOMETRAJE:	HORA INICIO:	HORA TERMINO:
N° INTERNO:	N° CARRO:	

BMS - ADMINISTRADOR DE BATERÍAS		✓
1	LIMPIEZA CON AIRE COMPRIMIDO Y PAÑO SECO	
2	ESTADO Y SUJECION DE CONEXIONES ELECTRICAS Y LINEA DE TIERRA.	
DISTRIBUIDOR		✓
4	ESTADO Y SUJECIÓN DE CONEXIONES ELECTRICAS DE ALTO VOLTAJE	
5	ESTADO DE MANGUERAS Y REAPRETE DE ABRAZADERAS	
MCU - CONTROLADOR DE MOTOR		✓
6	ESTADO Y SUJECIÓN DE CONEXIONES ELECTRICAS TRIFASICAS	
7	ESTADO DE MANGUERAS Y REAPRETE DE ABRAZADERAS	
MOTOR		✓
8	ESTADO Y SUJECIÓN DE CONEXIONES ELECTRICAS Y LINEA DE TIERRA.	
9	ESTADO DE MANGUERAS Y REAPRETE DE ABRAZADERAS	
SISTEMA REFRIGERACIÓN		✓
10	CAMBIO DE REFRIGERANTE DE HV	
11	CAMBIO REFRIGERANTE DE BATERIA HV	
12	REVISION DE MANGUERAS YREAPRIETE DE ABRAZADERAS	
COMPRESOR DE AIRE		✓
13	ESTADO Y SUJECIÓN DE CONEXIONES ELECTRICAS Y LINEA DE TIERRA.	
14	REVISAR FUGAS DE AIRE	
BATERÍAS DE ALTO VOLTAJE (HV)		✓
15	LIMPIEZA CON AIRE COMPRIMIDO Y PAÑO SECO	
16	ESTADO Y SUJECIÓN DE CONEXIONES ELECTRICAS Y LINEA DE TIERRA.	
17	AISLAMIENTO DE MOTOR, BOMBA HIDRAULICA Y COMPRESOR	
SISTEMA DE DIRECCIÓN HIDRAULICA		✓
18	REVISAR ESTADO DE CONEXIONES DE ELECTRICAS TRIFASICAS Y LINEA DE TIERRA	
SISTEMA ELECTRICO BAJO VOLTAJE		✓
19	LIMPIAR COMPARTIMIENTO DE BATERIAS CON AIRE COMPRIMIDO	
20	REVISAR CONEXIONES DE BATERIA (BORNES)	
21	TESTEAR BATERIAS	

EJE TRASERO		✓
22	CAMBIO ACEITE DIFERENCIAL MOBILUBE SAE 80W90 API GL5	
23	ESTADO DE CRUCETAS Y BRIDA DESLIZANTE	
SISTEMA DE DIRECCIÓN		✓
24	REVISAR ARTICULACIONES DE DIRECCIÓN	
25	CAMBIO DE ACEITE Y FILTRO. REVISAR FUGAS EN CAJA DE DIRECCIÓN Y BOMBA HIDRAULICA	
EJE DELANTERO		✓
26	REVISAR HOLGURA AXIAL DE MUÑONES (AJUSTAR SI ES NECESARIO)	
27	ENGRASE DE MASAS DELANTERAS (GRASAXHP222 MOBILGREASE)	
SISTEMA DE FRENO		✓
28	REVISAR DESGASTE PASTILLAS DE FRENO (DESMONTAR LA RUEDA)	
29	CAMBIAR FILTRO SECADOR DE AIRE	
30	DRENAR PRESENCIA DE DE HUMEDAD EN ACUMULADORES DE AIRE	
31	CAMBIO FILTRO DE AIRE COMPRESOR	
SISTEMA DE SUSPENSION		✓
32	LIMPIEZA DE FUELLES DE SUSPENSION DE AIRE Y SOPORTE INFERIOR	
NEUMATICOS		✓
33	APRIETE DE TUERCAS DE FIJACIÓN DE LAS TUERCAS 600 N	
34	PRESION DE NEUMATICOS 110 PSI	
AIRE ACONDICIONADO Y CALEFACCIÓN		✓
35	NIVEL DE REFRIGERANTE SISTEMA CALEFACCIÓN,	
36	FUNCIONAMIENTO AIRE ACONDICIONADO (FRIO - CALOR)	
37	LIMPIEZA FILTRO SALON (LAVADO DESENGRASANTE)	
ENGRASE		✓
38	ENGRASE MUÑONES	
39	ENGRASE CRUCETAS DE CARDAN Y BRIDA DESLIZANTE	
40	ENGRASE TERMINALES DE DIRECCIÓN	
41	ENGRASE ARTICULACIÓN DE PUERTAS	
42	ENGRASE CHICHARRAS DE FRENO	

Fuente: Elaboración propia en base a pautas de mantenimiento proporcionadas por la empresa.

Tabla 3-6. Actividad de mantenimiento

ACTIVIDAD DE MANTENIMIENTO: 1.1.2 CONTROL Y REPOSICIÓN DE REFRIGERANTE (COOLANT)	
Realizado por: Técnico de mantenimiento	
Advertencia: Antes de intervenir, verificar que el sistema se encuentre a temperatura segura ($< 30\text{ }^{\circ}\text{C}$). No abrir el sistema en caliente. Evitar derrames de refrigerante y contacto con la piel.	
Paso 1: Detener el bus y asegurar condiciones seguras de intervención.	
Paso 2: Ubicar el depósito de refrigerante del sistema de baterías.	
Paso 3: Verificar nivel de refrigerante mediante indicador o visor.	
Paso 4: Comparar con nivel mínimo y máximo permitido.	
Paso 5: En caso de nivel bajo, revisar previamente posibles fugas en el sistema.	
Paso 6: Verificar ausencia de aire en el sistema mediante purga si corresponde.	
Paso 7: Rellenar con refrigerante especificado (mezcla 50/50 según fabricante) hasta nivel adecuado.	
Paso 8: Cerrar correctamente el sistema y verificar estanqueidad.	
Paso 9: Registrar nivel y reposición en historial de mantenimiento.	

Fuente: Elaboración propia

Frecuencia: Según plan de mantenimiento RCM (ver Tabla 3-1).

Tabla 3-7. Actividad de mantenimiento

ACTIVIDAD DE MANTENIMIENTO: 1.3.1		
DIAGNÓSTICO DEL SISTEMA TÉRMICO MEDIANTE BMS		
Realizado por: Especialista eléctrico		
Advertencia:		
Trabajar con sistemas eléctricos requiere conocimiento técnico.		
No intervenir conexiones sin aislamiento adecuado.		
Utilizar herramientas certificadas.		
Paso 1:		
Conectar equipo de diagnóstico al sistema del bus (scanner o software BMS).		
Paso 2:		
Acceder a los parámetros de temperatura del sistema de baterías.		
Paso 3:		
Verificar lectura de sensores de temperatura en tiempo real.		
Paso 4:		
Detectar valores fuera de rango (sobre rango permitido por fabricante, típicamente > 25–30 °C).		
Paso 5:		
Identificar errores de comunicación o fallas en sensores.		
Comparar datos obtenidos con registros históricos de operación, si están disponibles.		
Paso 7:		
Validar correcta activación del sistema de refrigeración.		
Paso 8:		
Registrar resultados y generar reporte de diagnóstico.		
Paso 9:		
En caso de anomalía, programar intervención correctiva o reemplazo.		

Fuente: Elaboración propia

Frecuencia: Según plan de mantenimiento RCM (ver Tabla 3-1).