

UNIVERSIDAD TÉCNICA FEDERICO SANTA MARÍA

SEDE CONCEPCIÓN REY BALDUINO DE BÉLGICA.

**“DISEÑO DE UN PLAN DE MANTENIMIENTO BASADO EN CONFIABILIDAD
PARA BUSES ELECTRICOS ZHONGTONG”**

Trabajo de Titulación para optar al Título
Profesional de INGENIERIA EN
MANTENIMIENTO INDUSTRIAL.

Alumno

Sr Giancarlo Andrés Olivares Agüero

Profesor Guía: Sr Carlos Garay Burgos

2025



CONSTANCIA DE VALIDACIÓN Y CONFIDENCIALIDAD DE MONOGRAFÍA A REPOSITORIO ACADÉMICO

1.- IDENTIFICACIÓN DEL TRABAJO ACADÉMICO

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

Título del trabajo: DISEÑO DE UN PLAN DE MANTENIMIENTO BASADO EN CONFIABILIDAD PARA BUSES ELECTRICOS ZHONGTONG

Nombre del candidato(a): Giancarlo Andrés Olivares Agüero

Carrera / Grado: INGENIERIA EN MANTENIMIENTO INDUSTRIAL

Campus: SEDE CONCEPCION Departamento: DEPARTAMENTO DE MECANICA

2.- VALIDACIÓN DEL PROFESOR GUÍA/DIRECTOR DE TESIS

Yo, Carlos Garay Burgos, 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: 08/01/2006

Firma: 

Estudiante o Candidato(a):

Fecha: 08/01/2006

Firma: 

DEDICATORIA

Con profundo orgullo y gratitud, dedico este trabajo de título a mis padres, Iris y Alberto, quienes con su amor, sabiduría y constantes consejos han sido la base de cada uno de mis logros. A mis hermanas Cinthia y Khatrina, por su apoyo incondicional, y a mis hermanos Exequiel y Leandro, por acompañarme, guiarme y brindarme fuerza en cada etapa del camino.

A Ignacia, por ser mi compañera, mi equilibrio y un pilar fundamental durante este proceso. A Joaquín, mi partner incondicional, por estar siempre presente. A Paola, en su rol de cuñada, hermana y mamá, por su cariño y contención. A mi Leke y Keep, que incluso con un ladrido supieron entregar compañía y apoyo en los momentos que más lo necesité.

Finalmente, agradezco a Dios, por su guía, sus bendiciones y por permitirme llegar hasta este momento tan importante en mi vida

Resumen

Hoy en día, la electromovilidad se ha transformado en un eje clave para avanzar hacia un transporte más eficiente y sustentable. En ese escenario, los buses eléctricos han incrementado su presencia debido a su aporte en la reducción de emisiones contaminantes, la optimización del consumo energético y la disminución de la contaminación acústica. Sin embargo, su operación depende de componentes de alta tecnología, por lo que requieren estrategias de mantenimiento especializadas que aseguren la disponibilidad operativa y la confiabilidad de sus sistemas.

En este contexto, el presente trabajo de título desarrolla una propuesta orientada a diseñar un plan de mantenimiento centrado en la confiabilidad (RCM) para buses eléctricos Zhongtong que operan en la línea Rutas Las Playas. Para ello, se consideran los distintos tipos de mantenimiento y se analizan los componentes del activo, con el objetivo de identificar los sistemas críticos asociados a fallas funcionales. Asimismo, se utiliza un conjunto de herramientas y metodologías propias del mantenimiento industrial para diagnosticar el estado operativo de los buses y priorizar acciones según su impacto en la operación. A partir de estos resultados, se estructura un plan con actividades de inspección y mantenimiento definidas por frecuencia (diaria, semanal, mensual y por kilometraje), con el propósito de disminuir tiempos de inactividad, optimizar recursos y fortalecer la gestión de activos. Finalmente, se concluye que la propuesta entrega una base técnica aplicable para mejorar la disponibilidad operativa y el rendimiento de la flota, aportando a una operación más segura y eficiente.

KEYWORDS: electromovilidad; buses eléctricos; mantenimiento centrado en la confiabilidad (RCM); gestión de activos; criticidad; fallas funcionales; disponibilidad operativa; plan de mantenimiento.

ÍNDICE

INTRODUCCIÓN.	1
OBJETIVOS	2
OBJETIVO GENERAL	2
OBJETIVOS ESPECÍFICOS	2
CAPITULO 1: MARCO TEORICO	3
1.1. EVOLUCIUN HISTORICA DE LOS AUTOBUSES.....	4
1.1.1. Transporte por tracción animal	4
1.1.2. Transición mecánica.....	4
1.1.3. Buses eléctricos y estrategias de eficiencia energética	4
1.2. LA ELECTROMOVILIDAD.	5
1.2.1. ¿Qué es la Electromovilidad?	5
1.2.2. Electromovilidad en Chile.	5
1.3. ¿QUE ES EL MANTENIMIENTO?	5
1.4. EVOLUCION HISTORICA DEL MANTENIMIENTO.....	6
1.4.1. Revolución Industrial.....	6
1.4.2. Primera mitad del siglo XX	6
1.4.3. Segunda mitad del siglo XX.....	6
1.4.4. Avances recientes.....	7
1.5. TIPOS DE MANTENIMIENTO.....	7
1.5.1. Clasificación.....	7
1.5.2. Mantenimiento Correctivo	8
1.5.3. Mantenimiento Preventivo.....	8
1.5.4. Mantenimiento Predictivo	9
1.5.5. Mantenimiento Productivo Total	9
1.6. NORMAS RELACIONADAS CON EL RCM.....	10
1.6.1. Norma SAE JA1011	10
1.6.2. Norma SAE JA1012	10
1.6.3. Norma ISO 14224.....	11
1.7. METODOLOGÍA DE MANTENIMIENTO CENTRADO EN LA CONFIABILIDAD. 11	
1.7.1. Antes de aplicar RCM.	12
1.7.2. Las siete preguntas del mantenimiento centrado en la fiabilidad.	12
1.7.3. Recopilación de la información del activo.	12
1.7.4. Definición de funciones y estándares de desempeño.	13
1.7.5. Identificación de fallas funcionales.....	13
1.7.6. Determinación de modos de falla.....	13
1.7.7. Análisis de efecto de falla.....	13
1.7.8. Evaluación de consecuencias y criticidad.....	13
1.7.9. Selección de tareas de mantenimiento proactivas.	13
1.7.10. Implementación y mejora continua del plan de mantenimiento.....	14
1.8. HERRAMIENTAS DE ANALISIS PARA LA GESTION DEL MANTENIMIENTO. .14	
1.8.1. Diagrama de Pareto	14
1.8.2. Diagrama de Ishikawa	15

1.8.3. Análisis de Criticidad	15
1.8.4. Análisis de Modos y Efectos de Falla.....	16
CAPITULO 2: DESCRIPCIÓN DEL ACTIVO, CONTEXTO OPERACIONAL Y ANÁLISIS DE CRITICIDAD DEL BUS ELÉCTRICO ZHONGTONG	17
2.1. ZHONGTONG BUS URBANO ELECTRICO.....	18
2.1.1. Parámetros del Vehículo	18
2.1.2. Parámetros del Motor.	19
2.2. ZHONGTONG EN CONCEPCION.	20
2.3. ANTECEDENTES DEL PROYECTO.....	21
2.4. PLAN DE MANTENIMIENTO DADO POR FABRICANTE.	21
2.5. DIAGRAMA DE ISHIKAWA.	23
2.6. DIAGRAMA DE PARETO.....	23
2.6.1. Diagrama de Pareto Según el Impacto en la Disponibilidad Operacional. 24	
2.6.2. Diagrama de Pareto Según el Costo de Reparación de los Sistemas.....	26
2.6.3. Diagrama de Pareto Según el Peligro para Operador y Pasajeros.	27
2.7. SISTEMAS DEL ZHONGTONG.	29
2.8. ARQUITECTURA DE SISTEMAS Y COMPONENTES CRITICOS DEL BUS ELECTRICO.	29
2.8.1. Sistema de Tracción Eléctrica.	29
2.8.2. Sistema de Almacenamiento y Gestión de Energía.....	29
2.8.3. Sistema de Frenado Regenerativo y Neumático.....	30
2.8.4. Sistema HVAC.	30
2.8.5. Sistema Auxiliar Eléctrico.	31
2.8.6. Sistema de Control, Comunicación y Electrónica.	31
2.8.7. Sistema Estructural, Chasis y Suspensión	31
2.9. ANÁLISIS CUALITATIVO DE CRITICIDAD DE SISTEMAS.	32
CAPITULO 3: PROPUESTA DE ESTUDIO DE MANTENIMIENTO CENTRADO EN CONFIABILIDAD (RCM).	34
3.1. APLICACIÓN DEL DIAGRAMA DE ISHIKAWA.	35
3.1.1. Análisis del Diagrama de Ishikawa.	35
3.1.2. Propuesta de mejoras según el Diagrama de Ishikawa	36
3.2. CAUSAS COMUNES DE FALLO Y POSIBLE MITIGACIÓN SEGÚN MANUAL... 37	
3.2.1. Motor.	37
3.2.2. Fuente de Alimentación Integrada.	40
3.2.3. Bomba de Dirección Eléctrica.	41
3.2.4. Sistema de Conducción.....	42
3.2.5. Sistema de Dirección.....	43
3.2.6. Sistema de Frenos.	44
3.2.7. Sistema de la Fuente de Alimentación.	45
3.3. DESARROLLO DE ANALISIS DE FALLAS FUNCIONALES, MODOS DE FALLAS Y EFECTO DE COMPONENTES CRITICOS DEL SISTEMA.	45
3.3.1. Motor de Tracción.	46
3.3.2. Batería de Tracción.	47

3.3.3. Inversor de Potencia.	49
3.3.4. Eje Motriz (Reductor/Diferencial Trasero).....	50
3.3.5. Sistema de Enfriamiento de Tren de tracción.....	51
3.3.6. Sistema de Gestión de Baterías (BSM):	53
3.3.7. Sistema de Carga.	55
3.3.8. Frenos de Servicio.	56
3.3.9. Compresor de Aire Neumático.....	57
3.3.10. Sistema de Dirección.....	59
CAPITULO 4: ELABORACION DE UN PLAN DE MANTENIMIENTO PARA BUS ELECTRICO ZHONGTONG.	62
4.1. PROPUESTA DE PLAN DE MANTENIMIENTO DEL BUS ZHONGTONG.	63
4.1.1 Plan de Mantenimiento Diario. (Inspecciones de Rutina).....	64
4.1.2. Plan de mantenimiento Semanales.	66
4.1.3 Plan de mantenimientos Mensuales / Km.	69
4.1.4 Check List Previo a Conducción.	72
CAPITULO 5: ANÁLISIS DE COSTOS DE IMPLEMENTACIÓN DEL PLAN DE MANTENIMIENTO PARA BUSES ELÉCTRICOS ZHONGTONG.	74
5.1. EVALUACIÓN ECONÓMICA COMPARATIVA DE COMPONENTES CRÍTICOS Y RECURSOS PARA MANTENIMIENTO PREDICTIVO.....	75
CONCLUSIÓN.....	77
BIBLIOGRAFÍA	78

ÍNDICE DE IMÁGENES.

Imagen 1-1: Mantenimiento Industrial.....	6
Imagen 1-2: IoT en las Industrias.....	7
Imagen 1-3: Logo de mantenimiento.....	10
Imagen 1-4: Proceso de mantenimiento centrado en confiabilidad.....	12
Imagen 1-5: Ley de Pareto (Regla 80/20).....	15
Imagen 1-6: Diagrama de Ishikawa.....	15
Imagen 1-7: Análisis de Modos y Efectos de Falla.....	16
Imagen 2-1: Vista general del bus eléctrico Zhongtong LCK6850EVG.....	20
Imagen 2-2: Diagrama de Ishikawa sobre la precariedad del plan de mantenimiento en buses eléctricos.....	23
Imagen 2-3: Diagrama de Pareto según el impacto en la disponibilidad operacional de los sistemas.....	25
Imagen 2-4: Diagrama de Pareto según el costo de reparación de los sistemas.....	27
Imagen 2-5: Diagrama de Pareto según el peligro/riesgo para operador y pasajeros.....	28
Imagen 2-6: Sistemas y subsistemas principales del bus eléctrico Zhongtong.....	29
Imagen 3-1: Diagrama de Ishikawa aplicado a las causas de precariedad del mantenimiento en la flota.....	35

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 2-1: Parámetros del Vehículo (bus eléctrico Zhongtong LCK6850EVG).	19
Tabla 2-2: Especificaciones técnicas del motor y sistema de baterías.	19
Tabla 2-3: Plan de mantenimiento.....	22
Tabla 2-4: Resultados del análisis de criticidad por impacto en la disponibilidad operacional (ordenamiento tipo Pareto).....	24
Tabla 2-5: Escala de evaluación del impacto en la disponibilidad operacional.	25
Tabla 2-6: Resultados del análisis de criticidad por costo de reparación (ordenamiento tipo Pareto).	26
Tabla 2-7: Escala de evaluación del costo de reparación.	26
Tabla 2-8: Resultados del análisis de criticidad por peligro/riesgo para operador y pasajeros (ordenamiento tipo Pareto).	27
Tabla 2-9: Escala de evaluación del peligro/riesgo para operador y pasajeros.....	28
Tabla 2-10: Matriz cualitativa de criticidad de sistemas y componentes del bus eléctrico Zhongtong.	33
Tabla 3-1: Fallas típicas del motor de tracción y tratamiento recomendado.	40
Tabla 3-2: Fallas típicas de la fuente de alimentación integrada y tratamiento recomendado.....	41
Tabla 3-3: Fallas típicas de la bomba de dirección eléctrica y tratamiento recomendado.....	42
Tabla 3-4: Fallas típicas del sistema de conducción y tratamiento recomendado....	43
Tabla 3-5: Fallas típicas del sistema de dirección y tratamiento recomendado.	44
Tabla 3-6: Fallas típicas del sistema de frenos y tratamiento recomendado.	45
Tabla 3-7: Fallas típicas del sistema de alimentación y tratamiento recomendado.	45
Tabla 4-1: Plan de mantenimiento diario (inspecciones de rutina antes de operación).	66
Tabla 4-2: Plan de mantenimiento semanal.	68
Tabla 4-3: Plan de mantenimiento mensual y por kilometraje (km/mes).....	71
Tabla 4-4: Checklist previo a la conducción (control operativo previo).	73
Tabla 5-1: Valor económico comparativo de componentes críticos (alta tensión). ...	75
Tabla 5-2: Costos de capacitación/certificación para mantenimiento predictivo.	75
Tabla 5-3: Equipamiento de apoyo para inspección predictiva	76

SIMBOLOGÍA

- **V:** Voltaje.
- **A:** Amperaje.
- **T°:** Temperatura.
- **°C:** Grados Celsius.
- **K:** Kelvin.

SIGLAS

- **RCM:** Mantenimiento Centrado en la Confiabilidad.
- **IoT:** Internet de las Cosas.
- **MP:** Mantenimiento Preventivo.
- **MC:** Mantenimiento Correctivo.
- **SAE:** Society of Automotive Engineers.
- **AMFE:** Análisis de Modos y Efectos de Falla.
- **MPT:** Mantenimiento Productivo Total.
- **MCI:** Motor de Combustión Interna.
- **BMS:** Sistema de gestión de batería.
- **ABS:** Sistema Antibloqueo de Frenos.
- **SOC:** State Of Charge; Estado de Carga.
- **CAN:** Controller Area Network.
- **PLC:** Power Line Communication.

INTRODUCCIÓN.

Hoy en día, la electromovilidad se ha convertido en un pilar fundamental para el desarrollo de un transporte más eficiente y sustentable. Los buses eléctricos han experimentado un notable crecimiento en su implementación debido a su contribución en la reducción de emisiones contaminantes, la optimización del consumo energético y la disminución de la contaminación acústica en las ciudades.

Su funcionamiento depende de componentes de alta tecnología que requieren estrategias de mantenimiento especializadas para garantizar la disponibilidad y confiabilidad de los sistemas.

La gestión de mantenimiento en este tipo de activo no solo logra prolongar su vida útil, sino también optimizar los costos operacionales y asegurar la seguridad de los operarios y usuarios. En este contexto, el Mantenimiento Centrado en la Confiabilidad (RCM) y el uso de herramientas de gestión de activos cobran relevancia, ya que permiten identificar de manera precisa los componentes críticos y aplicar metodologías adecuadas para prevenir fallas que puedan afectar la operación.

Debido a la importancia de contar con un sistema de mantenimiento eficiente, en este trabajo de título se desarrolla una propuesta que tiene como propósito diseñar un plan de mantenimiento centrado en la confiabilidad para buses eléctricos de la línea Rutas Las Playas. Este plan considera la descripción de diferentes tipos de mantenimiento, análisis de los componentes del activo para reconocer los más críticos en la generación de fallas; diagnosticar el estado operativo de los activos mediante herramientas de la gestión de activo.

Finalmente diseñar un plan de mantenimiento orientado a mejorar la gestión de los activos en los buses eléctricos de la empresa Rutas las Playas.

OBJETIVOS

OBJETIVO GENERAL

- Diseñar un plan de mantenimiento centrado en la confiabilidad para optimizar la disponibilidad operativa y el rendimiento de los buses eléctricos presentes en terminal Ruta las Playas, previniendo fallas que reduzcan los tiempos de inactividad.

OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- Identificar las metodologías, normas y tipos de mantenimiento para implementar metodología basada en la confiabilidad (RCM).
- Analizar los componentes de la cadena de tracción de un bus eléctrico para identificar los sistemas críticos en la generación de fallas funcionales.
- Determinar el estado operativo de los buses eléctricos, mediante herramientas y metodologías propias del mantenimiento industrial.
- Elaborar un plan de mantenimiento apoyado en las herramientas utilizadas previamente, orientado a optimizar la gestión de los activos y la disponibilidad operativa del sistema.

CAPITULO 1: MARCO TEORICO

1.1. **EVOLUCIÓN HISTÓRICA DE LOS AUTOBUSES**

La evolución del transporte colectivo sobre ruedas ha pasado por varias etapas fundamentales, desde el uso animal hasta la electrificación moderna. En cada etapa, los avances tecnológicos respondieron a necesidades de eficiencia, capacidad, velocidad y sostenibilidad.

1.1.1. **Transporte por tracción animal**

Antes de la invención de los motores mecánicos, los primeros sistemas de transporte colectivo urbano usaban carros tirados por caballos u otros animales. Estos vehículos permitían transportar grupos de personas sobre rutas fijas, aunque con limitaciones de velocidad, costos de mantenimiento y carga horaria de los animales (Amann, 2023)

1.1.2. **Transición mecánica**

Con el desarrollo de la ingeniería en siglo XIX, se probaron autobuses impulsados por máquinas de vapor. Aunque demostraron la posibilidad de eliminar animales, tenían complejidades técnicas, peso elevado y consumos altos, por lo que su adopción fue limitada.

Posteriormente, con la invención del motor de combustión interna, los autobuses adquirieron una mayor practicidad, autonomía y adaptabilidad. El uso de motores diésel o gasolina dominó el transporte colectivo durante gran parte del siglo XX.

Durante este período surgieron también tecnologías intermedias, como trolebuses eléctricos (alimentados por líneas aéreas) y vehículos híbridos que combinaban motor de combustión con sistemas eléctricos de apoyo.

1.1.3. **Buses eléctricos y estrategias de eficiencia energética**

En las últimas décadas, el impulso hacia la descarbonización del transporte ha llevado a un interés creciente por los autobuses eléctricos puros o híbridos eléctricos. En el libro **Electric and Hybrid Buses for Urban Transport: Energy Efficiency Strategies**, los autores presentan una evaluación sistemática del desempeño de estos vehículos en entornos urbanos, considerando variables técnicas, energéticas y operativas (Varga, Iclodean & Mariasiu, 2016).

Entre los temas abordados se encuentran la arquitectura del sistema de propulsión, estrategias de carga, consumo energético, mantenimiento y casos de simulación.

Los buses eléctricos ofrecen ventajas claras en emisiones locales (prácticamente cero), reducción de ruido y menores costos de mantenimiento. Sin embargo, enfrentan desafíos: costo inicial elevado, necesidad de infraestructura de recarga, limitaciones de autonomía y degradación de baterías.

1.2. **LA ELECTROMOVILIDAD.**

La electromovilidad es la transición desde los vehículos con motor de combustión interna (MCI), hacia vehículos eléctricos, abarcando varios tipos de transporte, tanto el privado como el público. Este enfoque nace como respuesta a la necesidad de avanzar a un sistema de transporte sostenible en el tiempo, reduciendo las emisiones contaminantes.

1.2.1. **¿Qué es la Electromovilidad?**

Hoy en día la electromovilidad se define como la utilización de sistemas de tracción eléctrica en diversos tipos de transportes. **La Estrategia Nacional de Electromovilidad de Chile** la expone literalmente como “el uso de sistemas de impulso o tracción que utilizan energía eléctrica aplicados a distintos medios de transporte” (Gobierno de Chile, 2017). Esto quiere decir, Reemplazar los motores de combustión por motores alimentados eléctricamente mediante baterías u otras fuentes eléctricas. Este término abarca una gran cantidad de gamas de vehículos, incluyendo camiones, automóviles y especialmente buses eléctricos para el transporte público, con el objetivo de reducir la contaminación atmosférica y mejorar la eficiencia energética (Ministerio de Energía de Chile, 2017)

1.2.2. **Electromovilidad en Chile.**

Chile ha emergido como líder regional en electromovilidad en el transporte público, generando un notable avance en la introducción de buses eléctricos en sus ciudades. De acuerdo con reportes institucionales recientes, es el país con la flota de buses eléctricos más grande de Latino America, alcanzando aproximadamente 2.600 unidades en el sistema de transporte público para 2025 (Ministerio de Obras Públicas, 2025).

Este avance ha sido posible gracias a políticas públicas que fomentan la electromovilidad, incluyendo licitaciones que exigen vehículos de cero emisiones contaminantes, en línea con la estrategia nacional de descarbonización del sector de transporte (Infraestructura Pública, 2025)

1.3. **¿QUE ES EL MANTENIMIENTO?**

Es el conjunto de acciones planificadas y ejecutadas con el propósito de conservar un activo, equipo o sistema en condiciones adecuadas de funcionamiento. Su objetivo principal es garantizar que los recursos materiales continúen cumpliendo la función para la cual fueron diseñados, prolongando su vida útil y evitando pérdidas derivadas de fallas o interrupciones en la operación/producción.

En el ámbito industrial, el mantenimiento no se limita únicamente a la reparación de averías, sino que abarca una gestión integral que incluye a inspección, el control y la preservación de los equipos. De esta manera, el mantenimiento se convierte en una herramienta clave para asegurar la confiabilidad, disponibilidad y seguridad de los activos, contribuyendo al desempeño eficiente y sostenible de una organización.



Imagen 1-1: Mantenimiento Industrial.

Fuente: Larez, Alexis. ¿Por qué podrían estar fallando tus planes de mantenimiento industrial? E-Nova Levante. Disponible en: <https://enovalevante.es/mantenimiento-industrial-por-que-podrian-estar-fallando-tus-planes-de-mantenimiento-industrial/>. Consulta: 2025.

1.4. **EVOLUCION HISTORICA DEL MANTENIMIENTO**

El mantenimiento tiene sus orígenes en la aparición de las primeras maquinas utilizadas por el hombre, donde incluso con herramientas rudimentarias fue necesario implementar cuidados que permitieran conservar sus características y prolongar su vida útil (Gómez de León, 1997)

1.4.1. **Revolución Industrial**

Durante los siglos XVIII y XIX, con la revolución industrial, las tareas de reparación de la maquinaria comenzaron a integrarse al proceso productivo. Este hecho marco el inicio del mantenimiento correctivo (MC), motivado por la necesidad de reducir costos y mejorar la competitividad de las industrias (Gómez de León, 1997)

1.4.2. **Primera mitad del siglo XX**

En Estados Unidos, durante la primera Guerra Mundial, se implementaron técnicas de verificación en fábricas y transporte. Posteriormente, hacia 1920, surgieron los primeros controles sistemáticos de fallos y planificación de repuestos, con aplicaciones destacadas en el ámbito de la aviación. En esta etapa también aparecieron las primeras estadísticas sobre tasas de fallo en motores y equipos (Gómez de León, 1997).

1.4.3. **Segunda mitad del siglo XX**

En este periodo el mantenimiento adquirió un carácter científico y tecnológico, consolidándose como disciplina propia.

En la década de 1950 surgió el concepto de mantenimiento preventivo (MP), primero en EE. UU y Europa, y posteriormente en Suecia con la implementación del Swedish Preventive Maintenance System.

En la década de 1970, Reino Unido destacó el impacto económico del mantenimiento.

En la década de 1980 se masificaron las técnicas de monitoreo de vibraciones y parámetros funcionales en la industria petroquímica y aeronáutica.

En la década de 1990, con la expansión de la informática, se desarrollaron sistemas expertos de diagnósticos y programas de análisis predictivo, como LabVIEW, HP VEE o IQ2000 (Gómez de León, 1997)

1.4.4. **Avances recientes**

En la actualidad, el mantenimiento ha evolucionado hacia enfoques basados en inteligencia artificial, Internet de las Cosas (IoT) y análisis de datos en tiempo real, que permiten estimar la vida útil restante de los equipos, anticipar fallos y optimizar los costos de operación. Estas técnicas modernas, conocidas como mantenimiento predictivo inteligente, integran modelos de pronóstico, sistemas de diagnósticos y estrategias de autoadaptación que refuerzan la confiabilidad y disponibilidad de los activos industriales. (Lughofer & Sayed, 2019)



Imagen 1-2: IoT en las Industrias.

Fuente: CIT.UPC (Centro de Innovación Tecnológica, Universidad Peruana de Ciencias Aplicadas). Tofman: hacia el futuro de los sistemas de fabricación inteligentes. Disponible en: <https://cit.upc.edu/es/portfolio-item/tofman-hacia-el-futuro-de-los-sistemas-de-fabricacion-inteligentes/>. Consulta: 2025.

1.5. **TIPOS DE MANTENIMIENTO**

1.5.1. **Clasificación**

Aunque podrían establecerse diferentes clasificaciones del mantenimiento, atendiendo a las posibles funciones que se le atribuyan a éste, así como a la forma de desempeñarlas, tradicionalmente se admite una clasificación basada más en un enfoque metodológico o filosofía de planteamientos, que, en una mera relación de particularidades funcionales asignadas, que -como se ha visto depende de muy diversos factores. Desde esta perspectiva, pueden distinguirse los siguientes tipos de mantenimiento:

- Mantenimiento Correctivo
- Mantenimiento Preventivo
- Mantenimiento Predictivo
- Mantenimiento Productivo Total

Ninguno de los tipos anteriores se utiliza de forma exclusiva, sino que, en aras de la rentabilidad de la explotación, se impone practicar una adecuada combinación de los tipos anteriores, realizando lo que se ha venido en llamar mantenimiento planificado. Esto consiste, en definitiva, en efectuar una correcta selección de las plantas o de los equipos a los que se va a aplicar cada uno de los tipos de mantenimiento anteriores. Seguidamente se hace una descripción de cada uno de los tipos enunciados.

1.5.2. **Mantenimiento Correctivo**

En este tipo de mantenimiento, también llamado mantenimiento "a rotura" (breakdown maintenance), sólo se interviene en los equipos cuando el fallo ya se ha producido. Se trata, por tanto, de una actitud pasiva, frente a la evolución del estado de los equipos, a la espera de la avería o fallo.

A pesar de que por su definición pueda parecer una actitud despreocupada de atención a los equipos, lo cierto es que este tipo de mantenimiento es el único que se practica en una gran cantidad de industrias, y en muchas ocasiones esto está plenamente justificado, especialmente en aquellos casos en los que existe un bajo coste de los componentes afectados, y donde los equipos son de naturaleza auxiliar y no directamente relacionados con la producción.

1.5.3. **Mantenimiento Preventivo**

El mantenimiento preventivo es un conjunto de técnicas que tiene como finalidad disminuir y/o evitar las reparaciones de los ítems con tal de asegurar su total disponibilidad y rendimiento al menor coste posible. Para llevar a cabo esta práctica se requiere rutinas de inspección y renovación de los elementos malogrados y deteriorados.

Las inspecciones son los procesos por el cual se procede al desmontaje total o parcial del equipo a fin de revisar el estado de sus elementos. Durante la inspección se

reemplazan aquellos elementos que no cumplan con los requisitos de funcionamiento de la máquina. Los elementos también pueden ser sustituidos tomando como referencia su vida útil o su tiempo de operación con tal de reducir su riesgo de fallo.

1.5.4. **Mantenimiento Predictivo**

El mantenimiento predictivo, es aquel, que busca pronosticar una futura falla de un componente de una maquinaria o vehículo, de forma que, lograr esto requiere de un seguimiento y chequeo constante de las piezas que deben ser cambiadas antes de que produzca una falla, también, esta pieza puede ser reemplazada en base a un seguimiento de la vida útil calculada por el fabricante v/s la cantidad de horas o km que esta estuvo sometida a trabajo, de esta forma se logra prevenir que se produzca una falla o avería de dicho componente.

- Comprobar estado de las sujeciones
- Comprobar cavitación
- Comprobar estado de Rodamientos.

1.5.5. **Mantenimiento Productivo Total**

Aunque esta denominación (Total Productive Maintenance, TPM) surge y se desarrolla en Japón con un enfoque cercano al análisis de calidad de la producción y de estudios de rendimiento, lo cierto es que su difusión ha ido alterando la idea original hasta el punto de que no existe una definición universal precisa para este tipo de mantenimiento, tampoco existe, incluso, demasiado acuerdo sobre la designación más apropiada que debe tener. En cualquier caso, con el Mantenimiento Productivo Total (MPT) se intenta recoger y aplicar las tendencias más recientes en cuanto a la planificación participativa integral de todas las tareas del mantenimiento, incluyendo las técnicas utilizadas y su gestión, la administración del mantenimiento, el control de los distintos índices asociados al funcionamiento de los equipos y al conjunto de las instalaciones (fiabilidad, disponibilidad y mantenibilidad), la calidad de la producción y, finalmente, su repercusión en la economía de la empresa. Por tanto, esta filosofía de mantenimiento implica a todos los estamentos y niveles de la producción, con una estructura de planificación jerárquica que, partiendo de los objetivos últimos de la explotación, vaya desglosándose en tareas concretas hasta llegar al operador y a las actuaciones específicas sobre cada máquina y componente de las instalaciones.

Mediante el MPT se intenta, pues, abarcar una visión más amplia del mantenimiento, que recoja todos aquellos aspectos que inciden de alguna manera en la utilización de los equipos e instalaciones, y por tanto en la capacidad de producción.



Imagen 1-3: Logo de mantenimiento.

Fuente: Ángel Mendizábal. Mantenimiento preventivo. Disponible en: <https://angelmendizabal.com/mantenimiento/como-implantar-un-programa-de-mantenimiento-preventivo/>. Consulta: 2025.

1.6. **NORMAS RELACIONADAS CON EL RCM**

El Mantenimiento Centrado en Confiabilidad se basa en una serie de normas internacionales que establecen lineamientos técnicos y metodológicos necesarios para su correcta aplicación en distintas industrias. Estas normas garantizan la consistencia en la recolección de datos, la implementación de estrategias de mantenimiento y la evaluación de la confiabilidad de los activos físicos. (SAE International, 2009)

1.6.1. **Norma SAE JA1011**

La norma SAE JA1011 establece los criterios mínimos que deben cumplirse para que un proceso sea considerado como RCM auténtico. Desarrollada por la **Society of Automotive Engineers (SAE)**, define los pasos esenciales del método, tales como la identificación de funciones, modos de falla, consecuencias y tareas preventivas adecuadas. Su aplicación permite mantener las funciones operacionales críticas de los equipos, mejorando la seguridad, disponibilidad y eficiencia de los sistemas (SAE International, 2009).

1.6.2. **Norma SAE JA1012**

La SAE JA1012 complementa la anterior al ofrecer una guía interpretativa y ejemplos prácticos que facilitan su comprensión e implementación. Esta norma amplía los conceptos de la SAE JA1011 y detalla la metodología, terminología y procedimientos que deben seguir las organizaciones para aplicar el RCM correctamente. Asimismo, propone recomendaciones para adaptar el método a distintos tipos de activos, garantizando su aplicabilidad en diversos entornos productivos (SAE International, 2009).

1.6.3. **Norma ISO 14224**

La ISO 14224 establece un marco estandarizado para la recopilación y análisis de datos de confiabilidad y mantenimiento, originalmente enfocado en la industria del petróleo y gas, pero actualmente aplicable a múltiples sectores. Proporciona criterios para la clasificación, almacenamiento y aseguramiento de la calidad de los datos, permitiendo comparar el desempeño de equipos y evaluar la efectividad de las estrategias de mantenimiento. Además, su aplicación permite cuantificar la confiabilidad y disponibilidad de los activos a lo largo de su ciclo de vida, fortaleciendo la gestión de mantenimiento basada en la información técnica (SAE International, 2009).

En conjunto, las normas SAE JA1011, SAE JA1012 e ISO 14224 constituyen el pilar normativo del RCM, garantizando un enfoque estructurado, medible y alineado con los estándares internacionales de gestión de activos. Su uso contribuye a mejorar la seguridad operativa, optimizar los recursos y extender la vida útil de los equipos industriales (SAE International, 2009).

1.7. **METODOLOGÍA DE MANTENIMIENTO CENTRADO EN LA CONFIABILIDAD.**

El RCM es una técnica de organización de las actividades y de la gestión del mantenimiento para desarrollar programas organizados que se basan en la confiabilidad de los equipos. El RCM asegura un programa efectivo de mantenimiento que se centra en que la confiabilidad original inherente al equipo se mantenga. John Moubray definió el RCM como un proceso utilizado para determinar que se debe hacer para asegurar que cualquier activo continúe haciendo lo que sus usuarios quieren que haga en su contexto operacional. En la actualidad, el RCM es utilizado con frecuencia no solo para identificar tareas de mantenimiento, también se utiliza como marco de referencia para analizar el riesgo en equipos, clasificar por importancia los componentes significativos para el mantenimiento o detectar áreas de oportunidad de mejora en el mantenimiento de equipos complejos. También se busca mejorar los resultados del RCM al combinarlo con otras metodologías tales como el mantenimiento radical, el mantenimiento basado en la condición y el proceso de jerarquía analítica. La norma SAE JA1011 establece los criterios mínimos que debe cumplir una metodología para que pueda definirse como RCM; especifica que cualquier proceso de RCM debe asegurarse de responder satisfactoriamente en secuencia las preguntas que se muestran en la Fig.

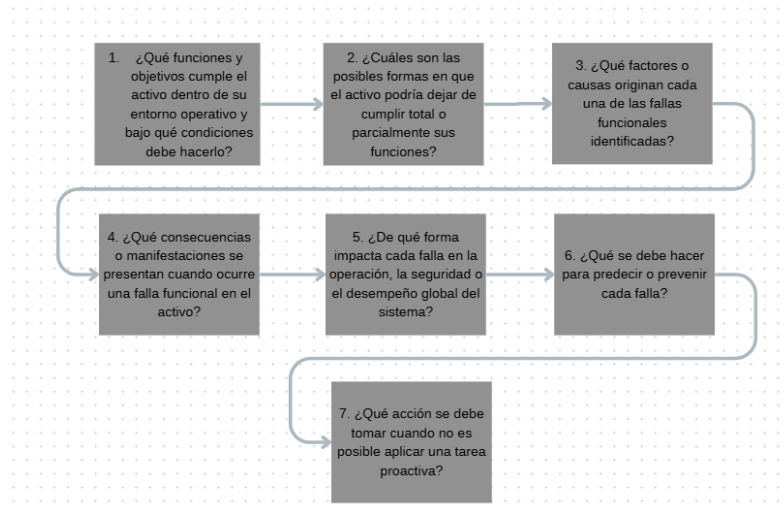


Imagen 1-4: Proceso de mantenimiento centrado en confiabilidad.

Fuente: Elaboración propia, basada en la metodología de Mantenimiento Centrado en la Confiabilidad (RCM), según Moubray (1997), 2025.

1.7.1. **Antes de aplicar RCM.**

Antes de iniciar el análisis que marca la norma SAE JA1011, se propone que se recopile y analice la información correspondiente del activo que será requerida, también que se establezca la taxonomía y se analice el contexto operativo del activo. (SAE International, (2009).

1.7.2. **Las siete preguntas del mantenimiento centrado en la fiabilidad.**

En esencia, el mantenimiento centrado en la fiabilidad gira en torno a siete preguntas clave que ayudan a identificar y aplicar tareas de mantenimiento eficaces.

- ¿Cuáles son las funciones y las normas de rendimiento asociada del activo?
- ¿De qué manera puede incumplir sus funciones?
- ¿Cuáles son las causas de cada fallo funcional?
- ¿Qué ocurre cuando se produce cada fallo?
- ¿Qué importancia tiene cada fracaso?
- ¿Qué se puede hacer para predecir o prevenir cada fallo?
- ¿Qué debe hacerse si no se encuentra una tarea proactiva adecuada?

1.7.3. **Recopilación de la información del activo.**

Antes de aplicar la metodología de RCM es indispensable recopilar la información necesaria del activo que servirá como insumo. Esta información incluye planos,

diagramas, manuales, bitácoras de operación/mantenimiento, documentos como el contexto operativo (si existe), también es esencial que se entreviste al personal de operación, producción y mantenimiento para extraer información sobre los requerimientos de desempeño deseados y problemas actuales que se estén presentando.

1.7.4. **Definición de funciones y estándares de desempeño.**

Esta etapa responde a la pregunta "¿Cuáles son las funciones y las normas de rendimiento asociada del activo?", formando la base sobre la cual se evaluarán las fallas en pasos posteriores.

1.7.5. **Identificación de fallas funcionales.**

Aquí se responde a la pregunta "¿De qué manera puede incumplir sus funciones?". Una falla funcional describe el estado en el cual el activo no desempeña la función según el estándar definido.

1.7.6. **Determinación de modos de falla.**

Identificada las fallas funcionales, el análisis se enfoca en determinar **cómo y porque** podrían ocurrir tales fallas. En esta etapa se responde la pregunta "¿Cuáles son las causas de cada fallo funcional?"

1.7.7. **Análisis de efecto de falla.**

Tras identificar los modos de falla, el RCM requiere analizar los efectos de falla, es decir, describir que sucede cuando ocurre cada falla. Aquí se busca responder la pregunta "¿Qué ocurre cuando se produce cada fallo?"

1.7.8. **Evaluación de consecuencias y criticidad.**

No todas las fallas tienen el mismo impacto, por ello el siguiente paso es evaluar las consecuencias de cada falla y determinar su criticidad. En esta fase responde a la pregunta "¿Qué importancia tiene cada fracaso?"

1.7.9. **Selección de tareas de mantenimiento proactivas.**

Conociendo las causas de falla y sus consecuencias, el RCM procede a definir la estrategia de mantenimiento óptima para cada modo de falla significativo. En este paso se plantea "¿Qué se puede hacer para predecir o prevenir cada fallo?"

1.7.10. **Implementación y mejora continua del plan de mantenimiento.**

Una vez definidas las tareas de mantenimiento resultantes del análisis RCM, es fundamental **implementar** estas recomendaciones en la operación cotidiana y establecer un proceso de revisión continua. Esto asegura que el RCM se traduzca en beneficios reales y no se quede solo en el papel.

1.8. **HERRAMIENTAS DE ANALISIS PARA LA GESTION DEL MANTENIMIENTO.**

En la gestión del mantenimiento, es fundamental contar con herramientas de análisis que permitan identificar, priorizar y resolver los problemas que afectan la confiabilidad de los equipos. Estas metodologías facilitan la toma de decisiones basadas en datos, optimizando recursos y aumentando la disponibilidad de los activos. Entre las herramientas más utilizadas destacan el Diagrama de Pareto, Diagrama de Ishikawa o causa – efecto, Análisis de Criticidad, Análisis de Modos y Efectos de Falla (AMFE). En conjunto, estas herramientas de la gestión constituyen una base esencial para el desarrollo de un plan de mantenimiento centrado en la confiabilidad orientado a mejorar la eficiencia operativa y la gestión de activos.

1.8.1. **Diagrama de Pareto**

El Diagrama de Pareto es una herramienta de análisis utilizada para identificar las causas más significativas de un problema, basándose en el principio 80/20, el cual establece que aproximadamente el 80% de los efectos previenen del 20% de las causas. En el contexto de mantenimiento, esta herramienta permite determinar cuáles componentes o fallas generan la mayor cantidad de paradas o costos, facilitando la priorización de acciones correctivas. Su aplicación ayuda a enfocar los recursos en los puntos críticos que producen el mayor impacto en la disponibilidad y confiabilidad de los equipos, optimizando así la gestión del mantenimiento y la toma de decisiones estratégicas (Juran & Godfrey, 1999)

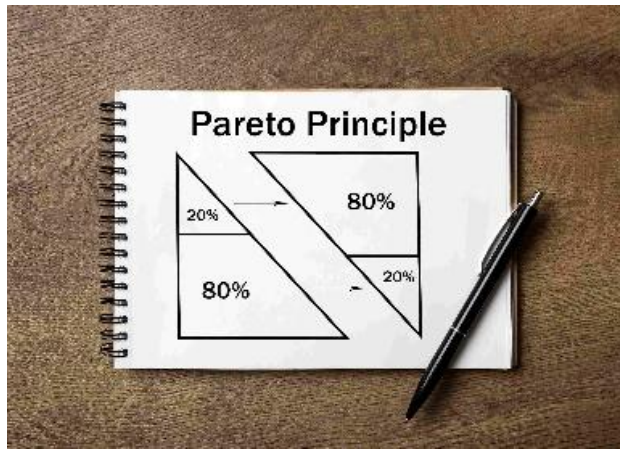


Imagen 1-5: Ley de Pareto (Regla 80/20).

Fuente: ESIC Business & Marketing School. Ley de Pareto. Disponible en: https://www.esic.edu/sites/default/files/2024-03/ley%20de%20pareto_1.jpeg. Consulta: 2025.

1.8.2. Diagrama de Ishikawa

El Diagrama de Ishikawa, también conocido como diagrama de causa – efecto o espina de pescado, es una técnica desarrollada por Kaoru Ishikawa para identificar las causas potenciales de un problema específico. Su estructura grafica agrupa las causas en categorías como métodos, materiales, mano de obra, maquinaria, entorno y medición. En el ámbito del mantenimiento, este diagrama se emplea para analizar las causas de raíz de las fallas y comprender la relación entre diferentes factores que influyen en la confiabilidad de los equipos. De esta manera, contribuye a implementar soluciones más efectivas, reduciendo la recurrencia de averías y fortaleciendo la cultura de mejora continua (Ishikawa, 1986)

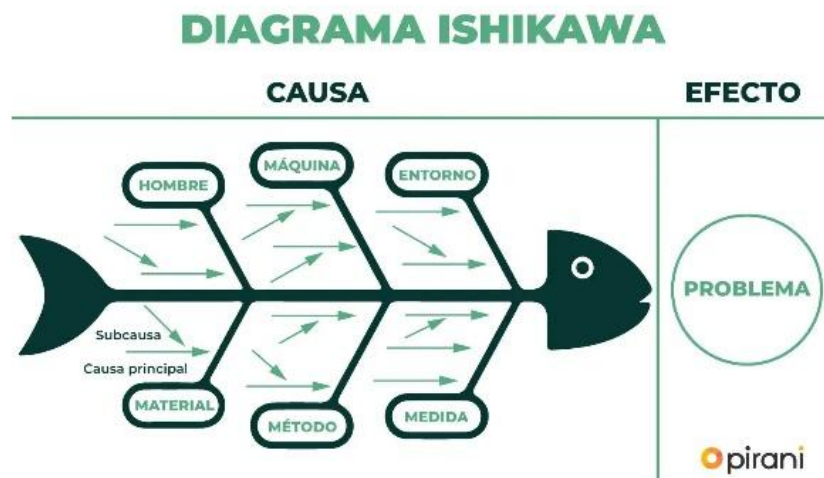


Imagen 1-6: Diagrama de Ishikawa.

Fuente: Pirani Risk. Diagrama de Ishikawa: relaciones entre causas. Disponible en: <https://www.piranirisk.com/hs-fs/hubfs/diagrama-de-ishikawa-relaciones-entre-causas.webp>. Consulta: 2025.

1.8.3. Análisis de Criticidad

El **análisis de criticidad** es una herramienta fundamental dentro de la gestión del mantenimiento, ya que permite identificar y priorizar los equipos o sistemas más importantes de una organización según su impacto en la seguridad, el medio ambiente, la producción y los costos operativos. A través de la evaluación de factores como la frecuencia de fallas, las consecuencias operacionales y los riesgos asociados, es posible establecer un nivel de criticidad que facilite la toma de decisiones en la planificación del mantenimiento. Esta metodología busca optimizar los recursos disponibles y enfocar las estrategias preventivas o predictivas en aquellos activos cuyo fallo podría generar mayores consecuencias, contribuyendo así a una gestión más eficiente, segura y confiable de los activos físicos dentro del marco del Mantenimiento Centrado en la Confiabilidad (RCM).

1.8.4. **Análisis de Modos y Efectos de Falla**

El Análisis de Modos y Efectos de Falla (AMFE), conocido internacionalmente como FMEA (Failure Mode and Effects Analysis), es una metodología sistemática que identifica los posibles modos de falla de un sistema, evalúa sus causas y consecuencias, y determina su nivel de riesgo. Esta herramienta permite establecer prioridades de acción mediante la asignación de un Numero de Prioridades de Riesgo (NPR), calculado a partir de la severidad, ocurrencia y detención de cada falla. En el mantenimiento industrial, el AMFE es esencial para anticipar fallas potenciales, mejorar la confiabilidad de los equipos y definir estrategias de mantenimiento preventivo o predictivo que reduzcan riesgos operacionales y costos no planificado (Stamatis, 2003)



Imagen 1-7: Análisis de Modos y Efectos de Falla.

Fuente: ManWinWin. FMEA – Failure Mode and Effects Analysis. Disponible en: <https://www.manwinwin.com/wp-content/uploads/2024/03/FMEA.jpg>. Consulta: 2025.

**CAPITULO 2: DESCRIPCIÓN DEL ACTIVO, CONTEXTO OPERACIONAL Y
ANÁLISIS DE CRITICIDAD DEL BUS ELÉCTRICO ZHONGTONG**

2.1. **ZHONGTONG BUS URBANO ELECTRICO**

Es un bus eléctrico modelo ZhongTong equipado con un motor eléctrico de tracción directa que entrega una potencia máxima de 196kW y un torque de 2800 N*m, alimentado por un sistema de baterías de litio hierro fosfato (LiFePO4) con una capacidad total de 324,4 kWh, diseñado para operar en entornos urbanos con una velocidad máxima de aproximadamente de 69 km/h

2.1.1. **Parámetros del Vehículo.**

En esta sección se presentan los parámetros dimensionales y operacionales del bus eléctrico Zhongtong, los cuales permiten caracterizar el activo y establecer condiciones base para el análisis de mantenimiento. Las dimensiones generales del vehículo (largo total 11.990 mm, ancho total 2.550 mm y alto total 3.280 mm) confirman que se trata de un bus urbano de tamaño estándar para transporte público, mientras que la altura interior de 2.320 mm define el espacio disponible para pasajeros y distribución interna.

La distancia entre ejes de 6.100 mm y el voladizo trasero de 3.220 mm son variables relevantes para comprender el comportamiento del vehículo en maniobras, así como también el nivel de exigencia mecánica sobre el chasis y sistemas de suspensión en condiciones reales de operación. Por otra parte, el ángulo de acercamiento (7° / 7°) y la altura del primer peldaño (360 mm) se asocian directamente con la accesibilidad y con el riesgo de contacto en irregularidades de la calzada o al aproximarse a paraderos, lo que puede influir en la aparición de daños por golpes o roces en componentes inferiores.

En términos de operación, el peso total máximo de 19.000 kg y el número nominal de pasajeros (83) permiten estimar las cargas de trabajo durante el servicio, lo que se relaciona con el desgaste de sistemas críticos como frenos, suspensión, dirección y, especialmente, el sistema de tracción eléctrica y almacenamiento de energía. Finalmente, la velocidad máxima de 69 km/h establece el límite operacional del activo y sirve como referencia para evaluar su desempeño en ruta y las condiciones de esfuerzo que pueden incidir en fallas y detenciones. En conjunto, estos parámetros constituyen información esencial para el análisis de criticidad y la posterior definición de tareas de mantenimiento bajo el enfoque RCM.

Largo Total	11.990 mm
Ancho Total	2.550 mm
Alto Total	3.280 mm
Altura Interior	2.320 mm
Distancia Entre Ejes	6.100 mm
Voladizo Trasero	3.220 mm
Ángulo de Acercamiento	7° / 7°

Altura de Primer Peldaño	360 mm
Peso Total Máx.	19.000 kg
Numero Nominal Pasajeros	83
Velocidad Máxima	69 km/h

Tabla 2-1: Parámetros del Vehículo (bus eléctrico Zhongtong LCK6850EVG).

Fuente: Elaboración propia, en base a Manual ZhongTong Bus Holding Co., Ltd., abril 2021.

2.1.2. Parámetros del Motor.

El bus eléctrico Zhongtong cuenta con un sistema de almacenamiento de energía basado en baterías de fosfato de litio-hierro (LiFePO₄) del fabricante CATL, con celdas unitarias de 3,2 V y 176 Ah, y una capacidad total instalada de 250 kWh. En relación con la gestión térmica, el sistema declara refrigeración por radiación natural, condición que debe considerarse en la operación diaria, especialmente en ciclos continuos y escenarios de alta demanda energética.

En el sistema de tracción, la configuración corresponde a conducción tipo Direct Drive, y el controlador opera a 576 V en corriente continua (DC). El conjunto entrega una potencia nominal de 135 kW y una potencia máxima de 196 kW, además de un torque nominal de 1520 Nm y un torque máximo de 2800 Nm, valores que permiten dimensionar la exigencia del sistema frente a cargas variables, detenciones frecuentes y pendientes propias del servicio urbano. Además, se registra el sistema de aire acondicionado TZ460XSF01 y como fabricante asociado al sistema eléctrico a Jingjin Electric Beijing, antecedentes relevantes para la trazabilidad técnica del activo y la posterior definición de tareas de mantenimiento.

Modelo de Batería	Fosfato de litio – Hierro / CATL
Capacidad Batería Unitaria	3.2V / 176 AH
Voltaje / Capacidad total	250 kWh
Tipo de Refrigerador	Radiación Natural
Sistema Acondicionado	TZ460XSF01
Empresa Fabricante	Jingjin electric Beijing
Tipo de Conducción	Direct Drive
Voltaje de Controlador	576 V (DC)
Potencia Nominal Pick	135/196 kW
Torque Nominal Pick	1520/2800 Nm

Tabla 2-2: Especificaciones técnicas del motor y sistema de baterías.

Fuente: Elaboración propia, en base a Manual ZhongTong Bus Holding Co., Ltd., abril 2021.

2.3. **ANTECEDENTES DEL PROYECTO**

En los últimos años, el mantenimiento industrial ha evolucionado desde un enfoque correctivo hacia una gestión estratégica orientada a la confiabilidad y disponibilidad de los activos (Pistarelli 2010). Un sistema de mantenimiento efectivo debe considerar a los equipos como parte de un proceso integrado, en el que cada activo cumple una función esencial dentro del sistema productivo. Cuando las instalaciones se gestionan de forma aislada o sin planificación, las acciones de mantenimiento pierden profundidad, se dirigen a objetivos intrascendentes y generan gastos innecesarios. Por el contrario, una visión sistémica permite priorizar la confiabilidad operativa, reducir fallas inesperadas y optimizar el uso de los recursos disponibles.

En el caso del Terminal Ruta Las Playas, que cuenta con una flota de buses eléctricos destinados al transporte público, se ha identificado una precariedad en el plan de mantenimiento actual dado por el fabricante, caracterizada por la ausencia de un programa estructurado de inspección visual diaria, falta de indicadores de desempeño (como MTBF, MTTR y disponibilidad) y escasa aplicación de metodologías modernas como el Mantenimiento Centrado en la Confiabilidad (RCM).

2.4. **PLAN DE MANTENIMIENTO DADO POR FABRICANTE.**

El plan de mantenimiento entregado por el fabricante para el bus eléctrico Zhongtong se presenta como una pauta base de inspecciones y revisiones preventivas orientadas a mantener el vehículo en condiciones seguras de operación. En general, este tipo de documento define actividades estándar de control visual y funcional, junto con verificaciones básicas de componentes críticos para la continuidad del servicio, tales como neumáticos, sistemas de iluminación, elementos de seguridad, accesos y mecanismos de operación.

En el caso analizado, el manual incorpora tareas agrupadas por zonas y sistemas del vehículo, incluyendo controles asociados a neumáticos (ajuste de tuercas, presión y desgaste), revisión del estado de puertas y mecanismos de cierre, verificación de dispositivos de seguridad (extintores y equipos de emergencia), sistemas de visibilidad (lavaparabrisas y limpiaparabrisas), estanqueidad del techo y una revisión del sistema eléctrico mediante chequeo de luces externas e internas, además de indicadores en el tablero de instrumentos. Asimismo, el fabricante considera condiciones ambientales particulares, incluyendo recomendaciones para operación en ambiente frío.

Adicionalmente, la pauta distingue actividades marcadas con el símbolo "★", las cuales se indican como de ejecución obligatoria según la nota incorporada en el propio documento. Estos puntos se entienden como controles mínimos para sostener la seguridad y el funcionamiento del bus durante la operación.

No obstante, considerando lo expuesto en la sección anterior, este plan se emplea en el presente trabajo como referencia inicial y como base comparativa para evaluar su ajuste a las condiciones reales de operación en el Terminal Ruta Las Playas. En consecuencia, su revisión permite identificar brechas y respaldar la necesidad de estructurar un plan de mantenimiento centrado en la confiabilidad (RCM), complementado con indicadores de desempeño y criterios de priorización de sistemas según criticidad.

Proyecto	Mantenimiento diario	Mantenimiento semanal
Compartimiento del motor		
Revisar la conexión de líneas de alta tensión.	★	★
Revisar el nivel de aceite de dirección hidráulica.		★
Revisar el nivel del líquido refrigerante	★	★
Revisar filtro de aire		★
Parte inferior		
Revisar el depósito de aire y el drenaje del agua.		★
Revisar la fuga del motor, eje trasero y tuberías.		★
Revisar el nivel de aceite del eje trasero.		★
Revisar la fijación de todas las conexiones del chasis.		★
Revisar todas las tuberías y líneas del chasis para detectar si hay daños, desgaste e interferencias con otras partes.		★
Parte lateral		
Revisar visualmente si hay tuercas sueltas del neumático	★	

Revisar y sujetar las tuercas de neumáticos.		★
Revisar la presión de neumáticos		★
Revisar el desgaste de neumáticos.	★	★
Revisar y eliminar piedras pequeñas y otros residuos entre neumáticos.	★	★
Revisar el estado de cierre de todas las puertas en ambos lados.	★	★
Delantera		
Revisar el lavaparabrisas		★
Revisar el funcionamiento del limpiaparabrisas		★
Revisar la presión de neumáticos de repuesto.		★
Revisar la seguridad y confiabilidad del asiento y mantener la superficie limpia.		★
Revisar el lavador frontal		★
Revisar cinturones de seguridad, ajustadores de ángulo de respaldo y otros accesorios de asientos		★
Revisar equipos de seguridad, como martillos de seguridad y extintores de incendios.	★	★
Revisar si la puerta de pasajeros, la puerta del conductor, la puerta de seguridad y la válvula de emergencia se pueden abrir y cerrar libremente	★	★
Revisar el enchufe del automóvil, la caja de herramientas y otros equipos.	★	★
Parte superior		
Revisar la estanqueidad del techo.		★
Sistema eléctrico		★
Revisar todas las luces externas (faros, luces de freno, luces de niebla, luces de marcha atrás, intermitentes, luz pequeña, luces de indicador de alarma, etc.)	★	★
Limpiar la batería, revisar el nivel de líquido y el voltaje;		★
Revisar todas las luces internas (luz del techo interior, luces de salpicadero, luces de interruptor basculante, luces de lectura y luces de paso, etc.)	★	★
Antes de accionar, revisar si todas las luces indicadoras en el tablero de instrumentos son normales y efectuar puesta en marcha	★	★
Revisar el lavaparabrisas, el limpiaparabrisas, la bocina y la descongelación	★	★
Ambiente frío		★
Añadir el detergente anticongelante en el lavaparabrisas	★	★

Nota: Se necesitan ejercer los artículos con "★".

Tabla 2-3: Plan de mantenimiento.

Fuente: Manual ZhongTong bus Holding CO., LTD. Abril de 2021.

2.5. DIAGRAMA DE ISHIKAWA.



Imagen 2-2: Diagrama de Ishikawa sobre la precariedad del plan de mantenimiento en buses eléctricos.

Fuente: Elaboración propia (adaptación sobre plantilla de www.unsitiogenial.es), a partir del diagnóstico del Terminal Ruta Las Playas (2025).

El análisis de causas, representado en el diagrama de Ishikawa, evidencia diversos factores que contribuyen a esta situación: deficiencias en la capacitación técnica del personal, carencia de tecnologías de monitoreo en tiempo real (como sistemas IoT o inspecciones termográficas), falta de inventarios mínimos de repuestos críticos y debilidades en la planificación de tareas preventivas. Estas condiciones generan una gestión reactiva del mantenimiento, donde las intervenciones se realizan una vez ocurrida la falla, afectando la disponibilidad y continuidad operativa de los buses eléctricos.

Frente a este escenario, surge la necesidad de diseñar un plan de mantenimiento basado en la confiabilidad (RCM) que permita establecer rutinas de inspección visual, definir tareas preventivas adecuadas y desarrollar indicadores que garanticen la continuidad de operación de los activos. Este enfoque busca no solo aumentar la disponibilidad de los buses eléctricos, sino también contribuir a la sostenibilidad y eficiencia del sistema de transporte público, fortaleciendo el proceso de electromovilidad en la región del Biobío.

2.6. DIAGRAMA DE PARETO.

Dado que no se dispone de un historial robusto de fallas reales de la flota de buses eléctricos Zhongtong operativos en la Ruta Las Playas, el presente análisis se orientó hacia la criticidad de los sistemas en lugar de la frecuencia de fallas. Este enfoque permite priorizar los componentes que más afectan la disponibilidad y confiabilidad del activo, incluso en ausencia de registros históricos cuantitativos.

El análisis de criticidad se fundamenta en la evaluación cualitativa del impacto operativo que tendría la falla de cada sistema principal sobre la capacidad del bus para continuar en servicio. De este modo, se asignó a cada sistema un valor numérico de criticidad en una escala de 1 a 10, considerando su efecto directo sobre la disponibilidad operacional, la seguridad, la complejidad de reparación y el tiempo de recuperación del servicio (MTTR).

2.6.1. Diagrama de Pareto Según el Impacto en la Disponibilidad Operacional.

El presente diagrama de Pareto permite identificar los sistemas que generan mayor impacto en la disponibilidad del bus Zhongtong. Se logra apreciar que un pequeño grupo de componentes concentra la mayor proporción del riesgo de indisponibilidad, claramente destacando principalmente las cuya falla provoca detención inmediata del activo. Este análisis facilita priorizar acciones de mantenimiento en los sistemas más críticos, logrando a optimizar recursos y asegurar la continuidad operativa.

Orden	Sistema	Puntaje	% Individual	% Acumulado
C	Batería / BMS	10	0,1428571	14%
B	Inversor DC/AC	10	0,1428571	29%
A	Motor de tracción	9	0,1285714	41%
D	Sistema neumático	8	0,1142857	53%
F	Dirección	7	0,1	63%
E	Refrigeración	7	0,1	73%
H	DC/DC Converter	6	0,0857143	81%
I	Compresor de aire	6	0,0857143	90%
G	HVAC	4	0,0571429	96%
J	Sistemas Auxiliares	3	0,0428571	100%
	TOTAL	70		

Tabla 2-4: Resultados del análisis de criticidad por impacto en la disponibilidad operacional (ordenamiento tipo Pareto).

Fuente: Elaboración propia, a partir del análisis de criticidad aplicado a los sistemas del bus Zhongtong (Terminal Ruta Las Playas, 2025).

CRITERIO UTILIZADO:		Impacto en Disponibilidad
Puntaje	Categoría	Descripción
8--10	ALTO	La falla detiene el bus y lo deja fuera de servicio de inmediato.
5--7	MEDIO	La falla permite operar, pero con funciones limitadas o degradadas.
1--4	BAJO	La falla no afecta la operación y puede corregirse de forma programada.

Tabla 2-5: Escala de evaluación del impacto en la disponibilidad operacional.

Fuente: Elaboración propia, basada en criterios RCM para priorización de criticidad (2025).

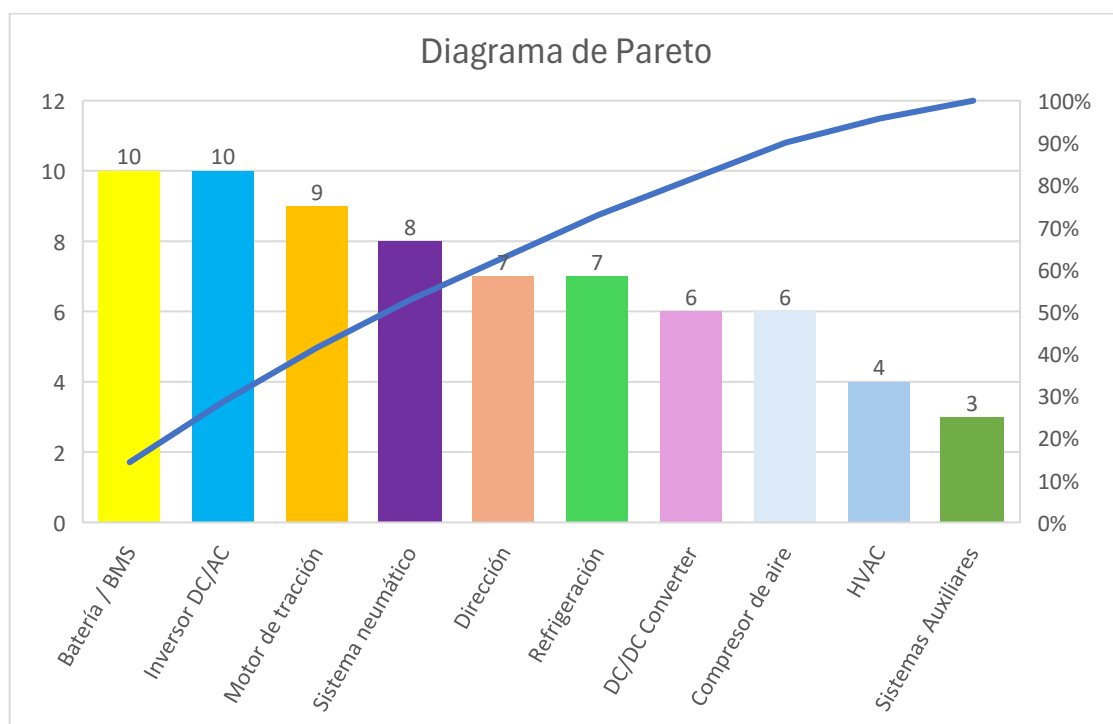


Imagen 2-3: Diagrama de Pareto según el impacto en la disponibilidad operacional de los sistemas.

Fuente: Elaboración propia, en base a los resultados de la Tabla 2-4 (2025).

2.6.2. **Diagrama de Pareto Según el Costo de Reparación de los Sistemas.**

El siguiente diagrama de Pareto muestra la distribución de los costos de reparación asociados a los principales sistemas del activo Zhongtong. Se observa que un grupo reducido de componentes, concentran la mayor parte del costo total, debido a su alto valor de repuestos y la necesidad de mano de obra especializada y/o certificada. Este diagrama permite priorizar intervenciones y recursos hacia los sistemas que generan mayor impacto económico dentro del mantenimiento del bus eléctrico.

Orden	Sistema	Puntaje	% Individual	% Acumulado
C	Batería / BMS	10	0,1612903	16%
B	Inversor DC/AC	9	0,1451613	31%
A	Motor de tracción	8	0,1290323	44%
H	DC/DC Converter	7	0,1129032	55%
D	Sistema neumático	6	0,0967742	65%
I	Compresor de aire	6	0,0967742	74%
F	Dirección	5	0,0806452	82%
G	HVAC	4	0,0645161	89%
E	Refrigeración	4	0,0645161	95%
J	Sistemas Auxiliares	3	0,0483871	100%
	TOTAL	62		

Tabla 2-6: Resultados del análisis de criticidad por costo de reparación (ordenamiento tipo Pareto).

Fuente: Elaboración propia, a partir del análisis de criticidad aplicado a los sistemas del bus Zhongtong (Terminal Ruta Las Playas, 2025).

CRITERIO UTILIZADO:	Costos de Reparación	
	Puntaje	Descripción
8--10	ALTO	Reparaciones > \$4.000.000 CLP; requieren repuestos importados o desarme mayor.
5--7	MEDIO	Reparaciones \$1.000.000 – \$3.999.999 CLP; componentes medianos o mano de obra certificada
1--4	BAJO	Reparaciones < \$1.000.000 CLP; repuestos simples y de rápida reposición.

Tabla 2-7: Escala de evaluación del costo de reparación.

Fuente: Elaboración propia, con rangos de costo referenciales definidos para el análisis de criticidad (2025).

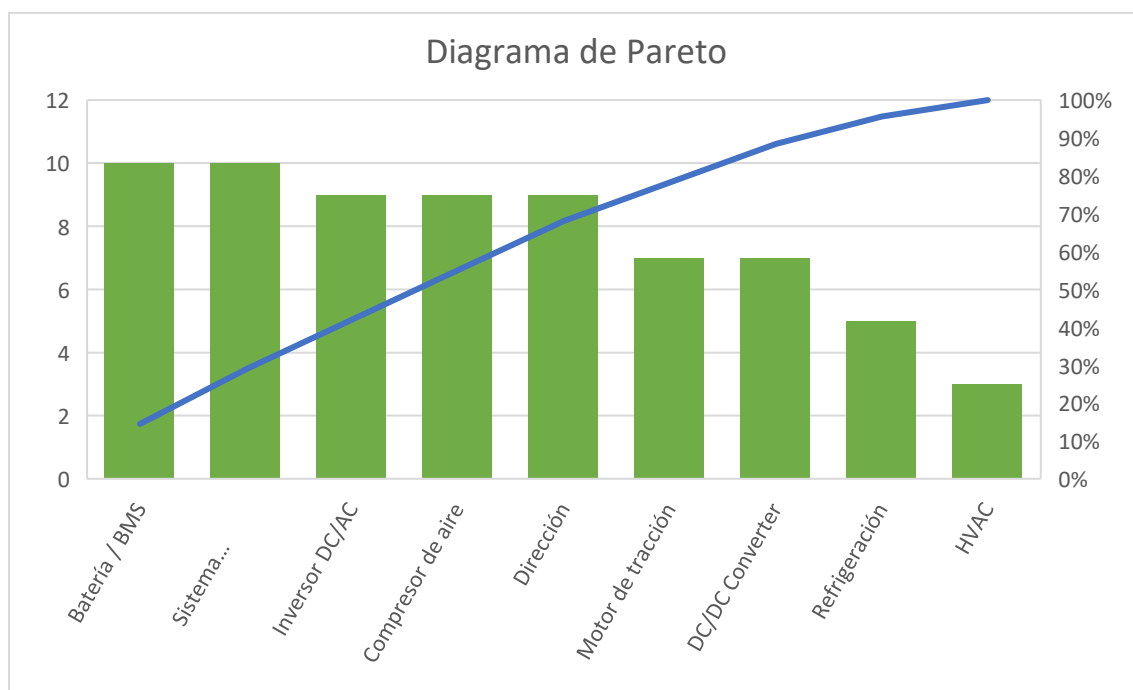


Imagen 2-4: Diagrama de Pareto según el costo de reparación de los sistemas.

Fuente: Elaboración propia, en base a los resultados de la Tabla 2-6 (2025).

2.6.3. Diagrama de Pareto Según el Peligro para Operador y Pasajeros.

El diagrama de Pareto evidencia los sistemas los cuales representan el mayor riesgo para la seguridad del operador y los pasajeros. Se observa que componentes como el sistema de frenos/neumáticos, batería/BMS, el inversor y la dirección concentran la mayor parte del riesgo, a causa de que una falla considerable dentro de estos sistemas puede provocar pérdidas de control, incendios o incidentes de alta severidad. Este análisis permite priorizar acciones de mantenimiento enfocadas en prevenir fallas que logren comprometer la integridad humana y la operación segura del activo.

Orden	Sistema	Puntaje	% Individual	% Acumulado
C	Batería / BMS	10	0,1408451	14%
D	Sistema Frenos/Neumático	10	0,1408451	28%
B	Inversor DC/AC	9	0,1267606	41%
I	Compresor de aire	9	0,1267606	54%
F	Dirección	9	0,1267606	66%
A	Motor de tracción	7	0,0985915	76%
H	DC/DC Converter	7	0,0985915	86%
E	Refrigeración	5	0,0704225	93%
G	HVAC	3	0,0422535	97%
J	Sistemas Auxiliares	2	0,028169	100%
	TOTAL	71		

Tabla 2-8: Resultados del análisis de criticidad por peligro/riesgo para operador y pasajeros (ordenamiento tipo Pareto).

Fuente: Fuente: Elaboración propia, a partir del análisis de criticidad aplicado a los sistemas del bus Zhongtong (Terminal Ruta Las Playas, 2025).

CRITERIO UTILIZADO:		Peligro/Riesgo Humano	
Puntaje	Categoría	Descripción	
8--10	ALTO	Puede generar accidente mayor, pérdida de control, incendio, etc.	
5--7	MEDIO	Fallas que afectan la operación, pero con riesgo limitado.	
1--4	BAJO	No compromete seguridad humana. (Iluminación, confort, etc.)	

Tabla 2-9: Escala de evaluación del peligro/riesgo para operador y pasajeros.

Fuente: Elaboración propia, basada en criterios de seguridad operacional utilizados en el análisis de criticidad (2025).

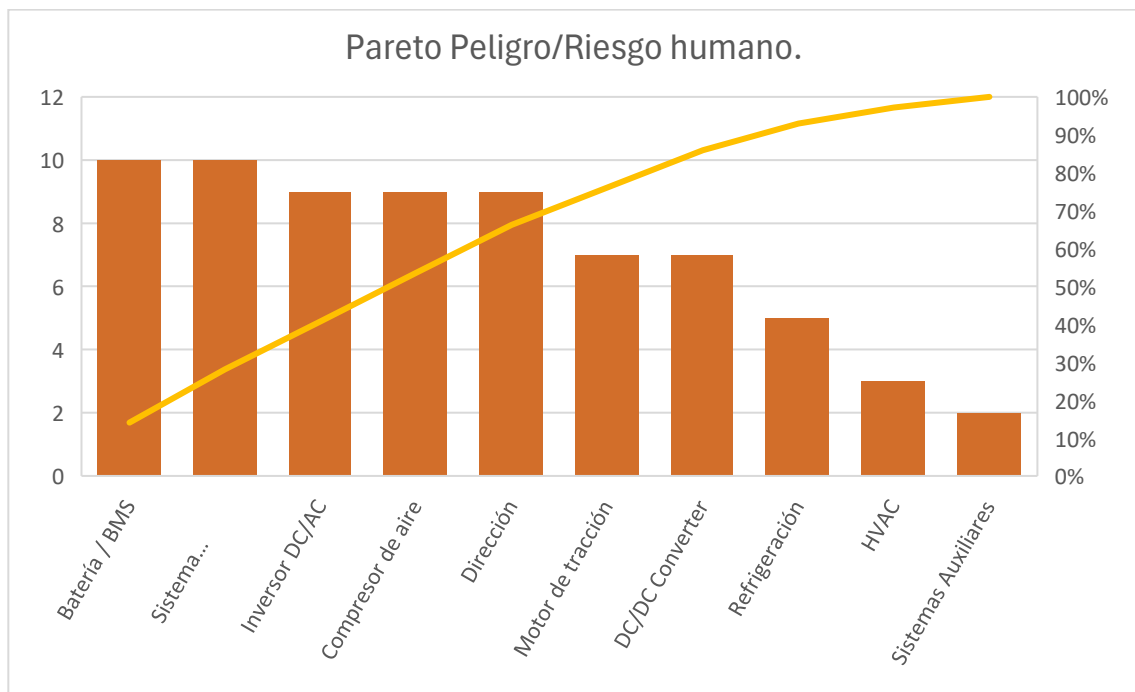


Imagen 2-5: Diagrama de Pareto según el peligro/riesgo para operador y pasajeros.

Fuente: Elaboración propia, en base a los resultados de la Tabla 2-8 (2025).

2.7. SISTEMAS DEL ZHONGTONG.

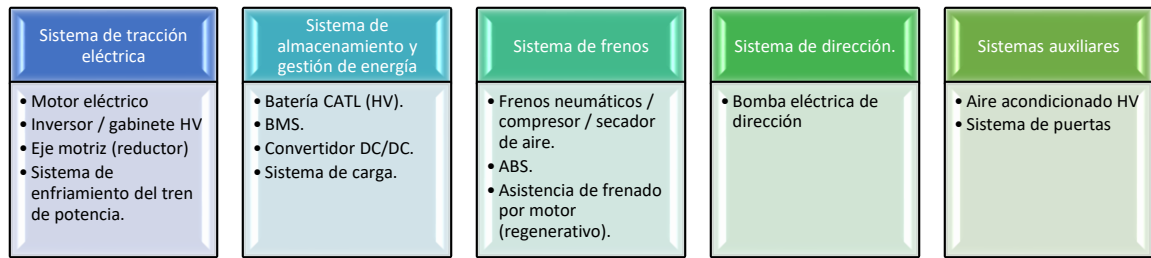


Imagen 2-6: Sistemas y subsistemas principales del bus eléctrico Zhongtong.

Fuente: Elaboración propia, en base a la descripción técnica del Manual ZhongTong Bus Holding Co., Ltd., abril de 2021, 2025.

2.8. ARQUITECTURA DE SISTEMAS Y COMPONENTES CRITICOS DEL BUS ELECTRICO.

El comienzo para establecer una base sólida en el análisis de criticidad de los sistemas y la posterior aplicación de metodología basada en la confiabilidad (RCM), es necesario identificar y comprender desde la función y composición de los sistemas principales del bus eléctrico. En esta sección se presenta una síntesis de los subsistemas que conforman el vehículo y su importancia desde una perspectiva de confiabilidad y la disponibilidad operacional del activo.

2.8.1. Sistema de Tracción Eléctrica.

Este sistema convierte la energía del banco de baterías en movimiento mediante un tren motriz totalmente eléctrico, sin transmisión convencional y con arquitectura Direct Drive. Su relevancia operacional lo posiciona como uno de los conjuntos de mayor criticidad del vehículo.

- **Componentes Principales:**

- Inversor de Potencia: Transforma de DC en AC para el motor y regula torque/velocidad. Una falla provoca pérdida total de tracción.
- Motor eléctrico de Tracción: Motor síncrono de imanes permanentes acoplado al eje motriz. Es altamente crítico por su función y costo.
- Eje motriz con reductor/diferencial: Distribuye el torque a las ruedas. Un fallo mecánico detiene el bus.
- Convertidor DC/DC de alta a baja tensión: Alimenta los sistemas auxiliares. Su falla afecta múltiples subsistemas.
- Sistema de refrigeración líquida: Mantiene temperaturas seguras en el inversor y motor. Fallas generan sobrecalentamiento progresivo.
- Controlador central de tracción (ECU): Coordina motor, inversor y frenado regenerativo.

2.8.2. Sistema de Almacenamiento y Gestión de Energía.

Corresponde al banco de baterías LiFePO₄ y su electrónica asociada. Es uno de los sistemas más críticos por costo, vida útil y sensibilidad térmica.

- **Componentes principales:**

- Banco de baterías: Módulos LiFePO₄ con vida útil de 3.000–4.000 ciclos. Incluye fusibles HV y estructuras de protección.
- BMS: Supervisa tensión, corriente, SOC y temperatura; ejecuta protecciones.
- Sistema de refrigeración: Mantiene el pack en su rango térmico seguro.
- Convertidor DC/DC: Provee energía a la red de 12–24 V.
- Sistema/puerto de carga: Fundamental para la disponibilidad operativa, aunque su falla no interrumpe el viaje inmediato.
- Protecciones HV: Contactores, fusibles y seccionadores de servicio.

2.8.3. **Sistema de Frenado Regenerativo y Neumático.**

Combina recuperación energética mediante el motor-generator con un sistema neumático convencional para asegurar capacidad de detención y redundancia.

- **Regenerativo:**

- Frenado regenerativo: Recupera energía en desaceleración. Su falla no detiene el bus, pero reduce eficiencia.
- Control de regeneración: Ajusta niveles según velocidad y SOC.

- **Neumático:**

- Frenos de servicio: Discos, pastillas y caliper; alta criticidad por seguridad.
- Compresor eléctrico: Alimenta el circuito neumático; su falla activa los frenos de emergencia.
- Secador de aire: Previene humedad y corrosión.
- ABS/EBS: Mejoran estabilidad y modulan el frenado electrónico.
- Freno (spring brake): Seguridad ante pérdida de presión.

2.8.4. **Sistema HVAC.**

Provee confort térmico a pasajeros y conductor. Es uno de los mayores consumidores energéticos y afecta directamente la autonomía.

- **Componentes principales:**

- Unidad A/C: Compresor eléctrico, evaporador, condensador y control electrónico.
- Calefacción eléctrica PTC: Entrega calor sin riesgo térmico.
- Ventiladores y turbinas: Distribución de aire.
- Sensores y unidad de control HVAC: Regulan modos y temperatura.
- Conductos, filtros y difusores: Garantizan calidad y distribución del aire.

2.8.5. **Sistema Auxiliar Eléctrico.**

Alimenta todos los equipos de baja tensión y permanece operativo incluso con el HV desconectado.

- **Componentes principales:**

- Batería auxiliar 12–24 V: Mantiene ECU, iluminación y sistemas básicos.
- Convertidor DC/DC: Reduce la HV a baja tensión para accesorios.
- Iluminación interior/externa: Luces LED y señalización.
- Sistemas de puertas: Motores y módulos de control.
- Bombas eléctricas: Dirección, refrigeración, calefacción y limpiaparabrisas.
- Tablero/instrumentación: Indicadores, alarmas y monitoreo.

2.8.6. **Sistema de Control, Comunicación y Electrónica.**

Integra todas las ECU mediante redes CAN distribuidas para supervisión, diagnóstico y coordinación funcional.

- **Componentes principales:**

- VCU: Control central del vehículo (motor, inversor, BMS, ABS/EBS, HVAC).
- Controlador del motor/inversor: Gestiona torque y límites térmicos.
- BMS: Conectado por CAN para intercambio continuo de datos.
- Red CAN: HV-CAN, Body CAN y CAN para frenos.
- OBD: Diagnóstico y lectura de fallas.
- HVIL: Seguridad ante apertura de conectores HV.

2.8.7. **Sistema Estructural, Chasis y Suspensión**

Estructura que soporta todos los sistemas del vehículo, garantizando estabilidad, absorción de cargas y seguridad.

- **Componentes principales**

- Chasis monocasco: Acero de alta resistencia adaptado al peso del pack de baterías.
- Bastidores del banco de baterías: Sujeción reforzada del sistema HV.
- Suspensión neumática: Bolsas de aire, amortiguadores, barras estabilizadoras y válvulas niveladoras.
- Sistema de dirección: Electrohidráulica o eléctrica.
- Estructuras anti-impacto y barras laterales: Seguridad pasiva.
- Ruedas y neumáticos: Elementos críticos para operación y estabilidad.

2.9. **ANÁLISIS CUALITATIVO DE CRITICIDAD DE SISTEMAS.**

SISTEMAS	COMPONENTE	CRITICIDAD	JUSTIFICACIÓN
Tracción eléctrica	Motor de tracción	Alta	Este componente es el principal del tren motriz, afectando directamente la disponibilidad del activo. Además, es costoso de reparar y sus reparaciones requieren personal especializado.
	Inversor de potencia	Alta	Este componente es un dispositivo electrónico de potencia crítico el cual controla el motor. Una falla en el inversor resulta en pérdida total de tracción al igual que un fallo del motor.
	Eje Motriz (Reductor / Diferencial)	Media	El activo utiliza transmisión Direct Drive , pero incluye un diferencial. Este componente transmite la potencia/torque hacia las ruedas; si sufre una avería (rotura de engranajes/cojinetes) el bus no podrá desplazarse.
	Sistema de enfriamiento del tren de tracción	Media	Este subsistema incluye bombas, radiadores y enfriadores que mantienen la temperatura segura del motor e inversor. Un fallo de algún componente no detiene inmediatamente el activo, pero provoca sobrecalentamiento que puede derivar en daños mayores si no hay una atención a tiempo.
Almacenamiento y gestión de energía	Batería de tracción (CATL (HV))	Alta	En pocas palabras es el núcleo del activo, se considera uno de los componentes más críticos del bus eléctrico. Si la batería se degrada severamente o falla la autonomía y disponibilidad del bus se ven completamente perjudicadas.
	Sistema de gestión de batería (BMS)	Alta	El BMS es un sistema eléctrico el cual monitorea y controla las baterías para garantizar condiciones seguras de voltaje (V), corriente (A) y temperatura (T°), es fundamental para prevenir sobre cargas o sobrecalentamientos que podrían dañar la batería.
	Convertidor DC/DC	Baja	Este componente reduce la alta tensión de la batería de tracción a voltajes más bajos para alimentar los sistemas auxiliares. La falla de este componente compromete muchos sistemas eléctricos vitales.
	Sistema de carga	Media	Este sistema permite recargar la batería desde la red eléctrica. Dado que los buses eléctricos

			requieren recargas diarias un fallo en el sistema de carga no afecta su operación inmediata, pero si su disponibilidad futura.
Frenado Regenerativo y neumático	Frenos de servicio	Media	Una falla mecánica en los componentes que la componen, ya sean discos, pastillas, caliper, etc. pone en riesgo la seguridad del bus.
	Compresor de aire neumático	Media	Este componente provee aire comprimido al sistema de frenos neumáticos de servicio y estacionamiento. En vehículos pesados si este componente falla se activarán los frenos de emergencia (spring brakes).
	Sistema de frenado regenerativo	Baja	En la frenada regenerativa, el motor eléctrico actúa como generador al desacelerar el vehículo, convirtiendo la energía cinética en energía eléctrica que se envía a la batería.
	Sistema ABS y control eléctrico de frenos	Baja	Si el sistema ABS falla, el bus aún mantiene la capacidad de frenar mediante el sistema neumático convencional, pero perdemos estabilidad y control óptimo en frenadas de emergencias.
	Secador de aire del sistema de freno	Baja	Este componente elimina la humedad del aire comprimido antes de que el aire pase por lo frenos, para prevenir la corrosión y congelamiento en los componentes neumáticos.

Tabla 2-10: Matriz cualitativa de criticidad de sistemas y componentes del bus eléctrico Zhongtong.

Fuente: Elaboración propia, en base al análisis de criticidad desarrollado para el presente trabajo, 2025.

De acuerdo con este análisis de criticidad cualitativo, los tres sistemas evaluados son críticos para la disponibilidad y confiabilidad del bus, aunque con un variado nivel de prioridad en sus componentes. El sistema de tracción eléctrica y el sistema de almacenamiento de energía concentran los componentes de mayor criticidad del activo, ya que sus fallas conllevan a la inmovilización del vehículo y altos costos de reparación, además de concentrar la mayoría de las incidencias en buses eléctricos.

En resumen, el plan de mantenimiento debe concentrar recursos en los componentes de mayor criticidad, utilizando técnicas predictivas y preventivas avanzadas, mientras que para componentes de criticidad media y baja se adoptan estrategias preventivas programadas proporcionales a su riesgo. Este equilibrio característico de RCM, permitirá maximizar la confiabilidad y seguridad del Zhongtong, mejorando su disponibilidad operacional y reducir lo más posible los costos por fallas mayores.

**CAPITULO 3: PROPUESTA DE ESTUDIO DE MANTENIMIENTO CENTRADO EN
CONFIABILIDAD (RCM).**

3.1. APLICACIÓN DEL DIAGRAMA DE ISHIKAWA.

Para identificar las principales causas que originan la precariedad en el plan de mantenimiento de los buses eléctricos del sistema de transporte, se aplicó un Diagrama de Ishikawa utilizando la metodología de las 6M (Mano de obra, Métodos, Máquinas, Materiales, Medición y Medio Ambiente). Esta herramienta permitió organizar y clasificar los factores que afectan la confiabilidad del sistema de tracción eléctrica, el suministro de repuestos, la capacidad operativa del personal y las condiciones externas que impactan el desempeño del bus.

El análisis se realizó considerando información del manual técnico, prácticas actuales del taller, observaciones en terreno y conversaciones con los técnicos responsables. La figura siguiente presenta el diagrama construido específicamente para los buses eléctricos Zhongtong.



Imagen 3-1: Diagrama de Ishikawa aplicado a las causas de precariedad del mantenimiento en la flota.

Fuente: Elaboración propia, en base a información levantada en el Terminal Ruta Las Playas (observación en terreno y revisión documental), 2025.

3.1.1. Análisis del Diagrama de Ishikawa.

Del análisis del diagrama se identificó que el problema principal corresponde a la **precariedad del plan de mantenimiento**, lo cual deriva en fallos recurrentes, baja disponibilidad mecánica y tiempos de reparación elevados. Las causas se agrupan de la siguiente manera:

- **Mano de obra**
 - Falta de capacitación en metodologías de mantenimiento como RCM.
 - Personal insuficiente para realizar inspecciones programadas.
 - Errores de operación que generan fallas evitables.
- **Métodos**
 - Ausencia de un plan de mantenimiento estructurado.
 - Enfoque reactivo sin planificación y sin análisis de criticidad.
 - Falta de estandarización en protocolos de inspección y registro.

- **Máquinas**
 - Falta de redundancia y baja disponibilidad de repuestos críticos.
 - Equipos sin indicadores de deterioro visibles o sistemas de monitoreo.
 - Vida útil avanzada en componentes del sistema eléctrico.
- **Materiales**
 - Suministro lento de repuestos específicos de electromovilidad.
 - Inventario mínimo no definido para componentes críticos.
- **Medición**
 - Ausencia de inspecciones termográficas o técnicas predictivas.
 - Falta de KPI de confiabilidad (MTBF, MTTR, Disponibilidad).
 - No existen registros históricos ni trazabilidad de fallas.
- **Medio ambiente**
 - Rutas con pendientes y frenado frecuente que estresan el sistema de tracción.
 - Puntos de carga insuficientes o con tiempos prolongados que afectan la operación.

Este diagnóstico permite entender que la falta de un plan estructurado y la ausencia de herramientas predictivas son los factores más determinantes, afectando directamente la confiabilidad del bus eléctrico.

3.1.2. Propuesta de mejoras según el Diagrama de Ishikawa

A partir de las causas identificadas se plantean las siguientes mejoras para fortalecer el plan de mantenimiento:

- **Mano de obra**
 - Implementar talleres de capacitación continua sobre RCM, operación segura y mantenimiento eléctrico.
 - Contratar personal adicional para cubrir inspecciones periódicas.
 - Crear guías visuales y estaciones de información para estandarizar tareas.
- **Métodos**
 - Diseñar un plan de mantenimiento preventivo basado en criticidad.
 - Implementar un sistema digital para registrar fallas, análisis causa raíz y repuestos.
 - Estandarizar procedimientos e incluir listas de verificación.
- **Máquinas**
 - Aplicar mantenimiento predictivo mediante termografía e IoT.
 - Planificar reemplazos de componentes con vida útil cercana al límite.
 - Instalar indicadores básicos de condición en sistemas críticos.
- **Materiales**
 - Establecer un inventario mínimo para repuestos de electromovilidad.

- Gestionar proveedores certificados con plazos de entrega definidos.
- Registrar consumo de materiales para mejorar trazabilidad.
- **Medición**
 - Calibrar sensores periódicamente para obtener datos confiables.
 - Instalar alarmas y telemetría para generar alertas tempranas.
 - Crear KPI operacionales (MTBF, MTTR, disponibilidad).
- **Medio ambiente**
 - Adecuar rutas considerando pendientes y alta carga térmica.
 - Instalar sistemas de ventilación o disipación en zonas críticas.
 - Mejorar la infraestructura de carga para reducir tiempos improductivos.

Estas mejoras apuntan a fortalecer la disponibilidad del bus eléctrico y permiten fundamentar técnicamente la creación de un plan de mantenimiento RCM.

3.2. **CAUSAS COMUNES DE FALLO Y POSIBLE MITIGACIÓN SEGÚN MANUAL.**

Para complementar una base sólida sobre el análisis del activo, se elaboraron tablas que reúnen las causas comunes de fallo y sus posibles medidas de mitigación, basada exclusivamente en la información técnica proporcionada por el fabricante del bus eléctrico. Estos datos, extraídos del manual oficial, permiten identificar modos de falla recurrentes y las acciones de posible tratamiento recomendadas por el propio diseñador del sistema. La integración de esta información constituye un punto de referencia técnico confiable para posterior aplicación de la metodología RCM, asegurando que las decisiones de mantenimiento se fundamenten en evidencia técnica confiable y alineada con los estándares del equipo.

3.2.1. **Motor.**

Fenómeno de avería.	Causas de avería.	Posible tratamiento.
Desactivación del motor cuando está vacío	<ol style="list-style-type: none"> 1. La unidad de alimentación no se encuentra energizada o está desconectada. 2. El inversor detiene su operación debido a condiciones o restricciones internas de control. 3. Se presentan fallas en los bobinados del estator, tales como aperturas, cortocircuitos, derivaciones a tierra o configuraciones incorrectas. 	<ol style="list-style-type: none"> 1. Verificar el interruptor, el estado del contactor y el cableado del motor; corregir cualquier anomalía encontrada. 2. Inspeccionar el inversor para identificar posibles fallos en su funcionamiento. 3. Examinar los bobinados del estator, localizar la avería y aplicar la reparación correspondiente. 4. Comprobar el nivel de tensión de suministro y revisar cada punto de conexión asociado.

	4. El nivel de tensión de entrada es insuficiente para el funcionamiento adecuado del sistema.	
Desactivación del motor con sonido de zumbidos una vez que el motor está energizado	<ol style="list-style-type: none"> 1. El bobinado del rotor presenta una interrupción o circuito abierto. 2. La carga aplicada al motor es excesiva o el mecanismo se encuentra trabado. 3. El suministro eléctrico no está conectado de forma completa o adecuada. 	<ol style="list-style-type: none"> 1. Localizar la interrupción del circuito y reemplazar el rotor correspondiente. 2. Inspeccionar el sistema y corregir cualquier falla detectada. 3. Utilizar un multímetro para verificar si existe pérdida de fase o mala conexión en la línea de alimentación, y efectuar la reparación necesaria.
Sobrecalentamiento del estator	<ol style="list-style-type: none"> 1. El devanado del estator presenta una interrupción en una de sus fases, generando funcionamiento monofásico. 2. Existe una condición de sobrecarga en el motor. 3. La cantidad de espiras del bobinado no corresponde a la especificación adecuada. 4. El sistema de ventilación se encuentra en mal estado o no funciona correctamente. 	<ol style="list-style-type: none"> 1. Disminuir la carga aplicada o utilizar un equipo de mayor capacidad. 2. Comprobar el valor de resistencia del bobinado. 3. Verificar que el ventilador opere correctamente.
Baja resistencia de aislamiento	<ol style="list-style-type: none"> 1. El bobinado se encuentra húmedo o ha sido expuesto al agua. 2. El aislamiento del devanado está contaminado con polvo y grasa. 3. El recubrimiento aislante del conductor presenta desgaste y grietas. 4. El aislamiento del devanado muestra signos de envejecimiento. 	<ol style="list-style-type: none"> 1. Aplicar calor para eliminar la humedad y asegurar su secado completo. 2. Retirar la grasa y suciedad del devanado, secarlo e impregnar con barniz aislante. 3. Reemplazar o volver a aislar el conductor con material aislante nuevo. 4. Si tras la evaluación el devanado aún puede utilizarse de forma segura, limpiarlo y aplicar nuevamente barniz; si el aislamiento está deteriorado y no es seguro operarlo, reemplazar el bobinado.
Vibración del motor	1. Desgaste en el cojinete que provoca	1. Verificar la holgura de los cojinetes y asegurar que

	<p>una holgura fuera de especificación.</p> <ol style="list-style-type: none"> 2. El entrehierro del motor presenta variaciones o falta de uniformidad. 3. El rotor está desbalanceado. 4. Las barras del rotor tipo jaula están fracturadas. 5. El bobinado del estator presenta fallas como cortos, aperturas, derivaciones a tierra o conexiones incorrectas. 6. El eje se encuentra doblado. 7. El núcleo de hierro está deformado o presenta piezas sueltas. 	<p>se ajuste a lo establecido por el diseño.</p> <ol style="list-style-type: none"> 2. Corregir y uniformar el entrehierro. 3. Realizar nuevamente el balanceo del rotor. 4. Sustituir el rotor por uno en buen estado. 5. Identificar los puntos defectuosos del bobinado y repararlos. 6. Rectificar o alinear el eje. 7. Ajustar el núcleo de hierro o rearmarlo mediante un nuevo apilado.
<p>Desequilibrio de la corriente sin carga cuando el motor está funcionando sin carga, y la diferencia es muy grande.</p>	<ol style="list-style-type: none"> 1. Existe un desbalance en los niveles de voltaje de la alimentación eléctrica. 2. El bobinado presenta fallas, como cortocircuitos entre espiras o inversión en el sentido de conexión. 	<ol style="list-style-type: none"> 1. Verificar los valores de tensión de la fuente para identificar el origen de la anomalía. 2. Desarmar el motor para revisar la polaridad y el estado del bobinado, corrigiendo cualquier defecto encontrado.
<p>Ruido anormal cuando el motor está funcionando</p>	<ol style="list-style-type: none"> 1. El cojinete presenta desgaste o daño. 2. El núcleo del rotor o del estator se ha aflojado. 3. Hay un desequilibrio en la tensión de alimentación o el bobinado presenta fallas como cortos o conexiones incorrectas. 4. El cojinete no tiene la lubricación adecuada. 5. El entrehierro es irregular, provocando roce entre rotor y estator. 	<ol style="list-style-type: none"> 1. Reparar o reemplazar el cojinete según corresponda. 2. Identificar la causa de la vibración y volver a ajustar o pensar el núcleo de hierro. 3. Medir la tensión de entrada, verificar si existe desbalance y corregirlo. 4. Revisar el bobinado para detectar fallas y realizar la reparación necesaria. 5. Limpiar el cojinete y aplicar la cantidad de grasa lubricante recomendada. 6. Ajustar el entrehierro para garantizar una correcta alineación y montaje.
<p>El calentamiento del cojinete excede lo estipulado</p>	<ol style="list-style-type: none"> 1. Se ha aplicado una cantidad inadecuada de grasa lubricante, ya sea en exceso o insuficiente. 2. La grasa utilizada es de baja calidad o presenta 	<ol style="list-style-type: none"> 1. Retirar la tapa del cojinete, verificar la cantidad de grasa y ajustarla conforme a las especificaciones. 2. Revisar si la grasa presenta impurezas y reemplazarla por

	<p>contaminación por impurezas.</p> <ol style="list-style-type: none"> 3. El ajuste entre el cojinete y el eje es incorrecto, quedando demasiado suelto o apretado. 4. El cojinete y la tapa de extremo están montados con un ajuste inadecuado. 5. El retén de aceite posee una holgura excesivamente ajustada. 6. La cubierta interna del cojinete está descentrada y roza contra el eje. 7. La holgura del cojinete es inapropiada, ya sea demasiado grande o pequeña. 	<p>lubricante limpio y adecuado.</p> <ol style="list-style-type: none"> 3. Asegurar un correcto ajuste entre el cojinete y el eje para cumplir con los requerimientos técnicos. 4. Corregir el ajuste entre el cojinete y la tapa de extremo para que cumpla con las especificaciones. 5. Reparar o sustituir el retén de aceite según su estado. 6. Reparar la cubierta interior del cojinete para lograr una holgura adecuada respecto al eje. 7. Sustituir el cojinete por uno nuevo cuando la holgura no sea corregible.
--	--	---

Tabla 3-1: Fallas típicas del motor de tracción y tratamiento recomendado.

Fuente: Elaboración propia, en base a información técnica del Manual ZhongTong Bus Holding Co., Ltd., abril de 2021, 2025.

3.2.2. **Fuente de Alimentación Integrada.**

Fenómeno de avería.	Fallas posibles	Posible Solución
El DC-DC no funciona	<ol style="list-style-type: none"> 1. Sin entrada en el lado de alta tensión 2. Sin señal de habilitación 3. El terminal de salida de baja tensión no está conectado con la batería 4. Voltaje del terminal de entrada demasiado bajo / alto 	<ol style="list-style-type: none"> 1. Compruebe si hay entrada de alimentación en el lado de alta tensión y si la conexión y desconexión del MSD están en buen estado 2. Verifique si hay señal de habilitación en el terminal de interfaz de control 3. Conecte el terminal de salida de DCDC a la batería 4. Verifique si el voltaje HV del sistema excede el estándar
Fluctuación en el voltaje de salida de LV	<ol style="list-style-type: none"> 1. El terminal de salida no está conectado con la batería 	<ol style="list-style-type: none"> 2. Conecte el terminal de salida a la batería
La bomba de aceite o la bomba neumática no funciona	<ol style="list-style-type: none"> 1. Sin entrada en el lado de alta tensión 2. Sin fuente de alimentación de 24V 3. Sin señal de habilitación 4. Voltaje del terminal de entrada demasiado bajo / alto 5. Cortocircuito en la salida 	<ol style="list-style-type: none"> 6. Compruebe si hay entrada de alimentación en el lado de alta tensión y si la conexión y desconexión del MSD están en buen estado 7. Verifique si hay entrada en la fuente de alimentación de control 8. Verifique si hay señal de habilitación en la interfaz de control 9. Verifique si el voltaje HV del sistema excede el estándar 10. Excluya las fallas de cortocircuito

Todo el equipo no funciona	<ol style="list-style-type: none"> 1. Fusión del fusible de la alimentación integral del interior del gabinete de distribución eléctrica 2. Sin fuente de alimentación de 24V 	<ol style="list-style-type: none"> 1. Verifique si el encendido de la alta tensión del vehículo completo es normal, verifique el fusible de la fuente de alimentación integral del interior del gabinete de distribución eléctrica 2. Verifique la línea de baja tensión
Fusión del fusible del terminal de entrada de alta tensión	<ol style="list-style-type: none"> 1. Hay sobrecarga o cortocircuito en el hardware de la fuente de alimentación integral 2. Daño de hardware 	<ol style="list-style-type: none"> 1. Reemplazo de hardware
Sin salida de alta tensión en terminales de aire acondicionado, des congelador o motor	<ol style="list-style-type: none"> 1. Sin entrada en el lado de alta tensión 2. Falla del fusible del interior de la alimentación integral 	<ol style="list-style-type: none"> 1. Compruebe si hay entrada de alimentación en el lado de alta tensión y si la conexión y desconexión del MSD están en buen estado 2. Reemplace el fusible ramal del interior de la alimentación integral

Tabla 3-2: Fallas típicas de la fuente de alimentación integrada y tratamiento recomendado.

Fuente: Elaboración propia, en base a antecedentes técnicos recopilados durante el desarrollo del estudio, 2025.

3.2.3. **Bomba de Dirección Eléctrica.**

Tipo de fallos	Posibles Causas	Posible Método de exclusión de fallos
El motor no puede arrancarse	Fallo de batería	Verifique si las baterías de alta y baja tensión presentan daños o deterioro.
	Si el motor está dañado por la quema	Verificar la resistencia de línea trifásica UVW del motor. Comprobar la resistencia entre cada fase del motor y la carcasa.
	El motor no tiene entrada de alta tensión.	Revisar si hay desconexión en los conectores entre el motor y el controlador, así como posibles cortes en la línea de alta tensión.
Fuerza pesada de giro.	Rotación en sentido antihorario del motor	Examinar el cableado y los procedimientos de conexión, corrigiendo la orientación cuando sea necesario.
	falla del engranaje de dirección (por ejemplo, un lado más pesado que otro lado)	Consultar las instrucciones específicas en el manual de mantenimiento del sistema de dirección.
	El orificio de amortiguación está bloqueado	Realizar una limpieza para retirar polvo y suciedad acumulada.
	Aceite de dirección asistida insuficiente	Revisar el nivel de fluido en el tubo del sistema de dirección y rellenarlo en caso de ser requerido.
	Rotura del tubo de aceite de dirección o fuga de aceite estructural	Inspeccionar y reemplazar los componentes que correspondan.

Sonido extraño de la bomba de dirección	El filtro está obstruido y no se consigue la fácil absorción de aceite	Verificar si el filtro está obstruido; de ser así, repararlo o sustituir el cartucho filtrante.
	El aceite tiene gran viscosidad	Utilizar aceite con la viscosidad especificada por el fabricante.
	Entrada de gas en el tubo de la bomba de dirección	Revisar si existen fugas o curvaturas excesivas en el tubo de entrada de aceite; reparar si corresponde.
	El tubo de entrada es demasiado delgado y largo, con muchos doblados	Engrosar o acortar el conducto según sea necesario y ajustar su orientación.
	Los parámetros del motor y del controlador no coinciden	Revisar los parámetros de configuración del controlador.

Tabla 3-3: Fallas típicas de la bomba de dirección eléctrica y tratamiento recomendado.

Fuente: Elaboración propia, en base a información técnica del Manual ZhongTong Bus Holding Co., Ltd., abril de 2021, 2025.

3.2.4. **Sistema de Conducción.**

Información de avería	Causas de averías	Método de exclusión de fallos
No se puede aumentar la marcha del vehículo de forma normal	Falla del sistema de presión alta	Inspeccionar el sistema de alto voltaje y verificar los códigos de falla mostrados en el panel del instrumento.
	Detectar posibles fallos en el decodificador del extremo del eje o en el transformador rotativo asociado.	Comprobar el conector de aviación del transformador rotativo del motor y el conector del panel de decodificación del transformador del extremo del eje, asegurándose de que no estén sueltos.
Agitación anormal durante la conducción	Los pernos de conexión del sistema de transmisión están sueltos	Apriételo
	El eje de transmisión no está equilibrado y está doblado.	Volver a verificar el desbalance y corregir cualquier deformación o flexión presente en el eje de transmisión.
	El montaje del eje de transmisión no cumple con los requisitos	Los módulos delantero y trasero no están alineados correctamente; deben ensamblarse conforme a las especificaciones establecidas.
	Desequilibrio del neumático	Ajuste de calibración, realice el equilibrio dinámico del neumático según los requisitos estándar
Desviación de marcha de la rueda	Los neumáticos no coinciden	Reemplazo
	Los neumáticos no se inflan suficientemente o la presión de inflado es desigual.	Ajustar la presión de inflado conforme al valor especificado para los neumáticos.
	Las conexiones del bastidor, suspensión y eje están sueltas	Revisar la sujeción
	El freno de una rueda está atascado y mal devuelto.	Reparar el freno
	El ajuste de posicionamiento de las ruedas delanteras es incorrecto	Inspeccionar y ajustar la localización de las ruedas

	Diferencia excesiva de altura entre los airbags izquierdo y derecho	Ajuste según los requisitos
	Amortiguador del vehículo no válido	Reemplace
	Deformación por flexión del eje delantero.	Calibre o reemplace el eje delantero
Desgaste anormal del neumático	La ballesta delantera está dañada o deformada plásticamente.	Reemplazo
	Desequilibrio dinámico del neumático	Efectuar el ajuste correspondiente y realizar el balanceo dinámico del neumático conforme a las especificaciones.
	El valor de indicación de cantidad de deslizamiento lateral de las ruedas delanteras está fuera de tolerancia.	Revisar o ajustar la convergencia
	Fallos del amortiguador delantero	Reemplazo
	Sobrecarga o exceso de velocidad del vehículo	Prestar atención al control
	Los rodamientos de ruedas están desgastados o mal ajustados y sueltos.	Ajuste o reemplazo
	La rótula de la barra de dirección floja	Ajuste o reemplazo
	La presión de aire de neumáticos es insuficiente o demasiado alta	Ajustar la presión de neumáticos al valor especificado.
	Deformación del neumático	Reemplazar el neumático

Tabla 3-4: Fallas típicas del sistema de conducción y tratamiento recomendado.

Fuente: Elaboración propia, en base a información técnica del Manual ZhongTong Bus Holding Co., Ltd., abril de 2021, 2025.

3.2.5. Sistema de Dirección.

Información de avería	Causas de averías	Método de exclusión de fallos
El volante no puede girar de forma adecuada	El rodamiento del tubo de dirección presenta restricción de movimiento, evidenciando que no gira con normalidad o se encuentra bloqueado	Reemplazar el rodamiento y realizar el relleno de grasa lubricante correspondiente.
	Los parámetros de alineación de las cuatro ruedas se encuentran fuera de los valores especificados.	Realizar ajuste del componente según las especificaciones del fabricante.
	Falla del engranaje de dirección	Reemplace
	a varilla de transmisión del sistema de dirección se encuentra con lubricación deficiente, lo que aumenta la fricción y puede afectar la suavidad y precisión del giro.	Realizar ajuste del componente según las especificaciones del fabricante.
El volante La	Insuficiente inflación del neumático	Cargar la presión del neumático al valor especificado por el fabricante

(dirección) presenta resistencia al giro.	Alineación de ruedas incorrecta (excesiva inclinación hacia atrás)	Revisar y ajustar la alineación, corrigiendo el ángulo según especificación.
	Intervalo excesivo entre el pasador principal y el casquillo	Inspeccionar y ajustar el intervalo para restablecer la tolerancia adecuada.
	Cojinetes de empuje instalados en sentido inverso	Desmontar y calibrar correctamente el conjunto, instalando los cojinetes en la orientación adecuada.
	Falta de lubricación en las piezas del eje delantero	Aplicar grasa lubricante en los puntos del eje delantero que lo requieran.
	Rótula demasiado apretada o floja	Inspeccionar y lubricar el pasador de la rótula; ajustar el torque a la especificación.
Vibración del volante	La rótula de la barra de dirección y los pernos de rótula están sueltos.	Ajustar o reemplazar según corresponda.
	El desgaste o ajuste de los cojinetes de las ruedas delanteras es inadecuado.	Reemplazar o ajustar el rodamiento.
	Desgaste excesivo en el eje de pivote y su casquillo.	Corregir o reemplazar las piezas defectuosas.
	Deformación del nudillo de dirección.	Sustituir el nudillo.
	Posicionamiento inadecuado de las ruedas.	Revisar y ajustar la posición de las ruedas.
	Los pernos de montaje de la cremallera de dirección están sueltos.	Apretar según especificación.
	Los neumáticos presentan inflación insuficiente o presión desigual.	Inflar los neumáticos al valor especificado.
	Desgaste desigual en los neumáticos.	Reemplazar los neumáticos afectados.
	Ingreso de aire en el sistema de dirección asistida.	Purgar el sistema para eliminar el aire.
	Deformación de la llanta.	Reemplazar la llanta.
Inflación insuficiente del neumático.	Ajustar la presión al valor especificado.	

Tabla 3-5: Fallas típicas del sistema de dirección y tratamiento recomendado.

Fuente: Elaboración propia, en base a información técnica del Manual ZhongTong Bus Holding Co., Ltd., abril de 2021, 2025.

3.2.6. **Sistema de Frenos.**

Información de avería	Causas de averías	Método de exclusión de fallos
Fuerza de frenado insuficiente	Ajuste inadecuado de la holgura del freno.	Realizar el ajuste correspondiente según fabricante.
	La carrera de la cámara de freno es insuficiente.	Ajustar la carrera al valor especificado.
	Las pastillas de freno presentan desgaste excesivo.	Reemplazar por repuesto adecuado.
	Fallas en la válvula del sistema de frenos.	Diagnosticar y corregir la falla, o reemplazar la válvula si es necesario.
	Fuga en la tubería del sistema de frenos.	Reparar la fuga de aire en la línea afectada.

	Presencia de aceite (líquido de freno) en el tambor de freno.	Limpiar y eliminar el residuo de aceite del tambor.
	El tambor de freno no es perfectamente redondo (o el disco presenta irregularidades).	Desmontar y reparar el tambor o disco para restablecer su circularidad. (RECTIFICADO O CAMBIO)
	Presión de aire de los neumáticos inadecuada.	Ajustar la presión al valor especificado.
Contacto permanente entre pastillas y disco.	Desalineación del freno de estacionamiento.	Ajustar el sistema de freno de estacionamiento.
	Falla en la válvula de liberación rápida del freno.	Reparar o reemplazar la válvula.
	Movimiento deficiente de los pistones superior e inferior de la bomba de freno integral.	Reparar o reemplazar los componentes involucrados.
	Rotura o fatiga del resorte de las pastillas de freno o de la cámara de aire.	Reemplazar la pieza defectuosa.

Tabla 3-6: Fallas típicas del sistema de frenos y tratamiento recomendado.

Fuente: Elaboración propia, en base a información técnica del Manual ZhongTong Bus Holding Co., Ltd., abril de 2021, 2025.

3.2.7. Sistema de la Fuente de Alimentación.

Información de avería	Causas de averías	Método de exclusión de fallos
Pérdida de potencia de la batería	Los terminales de la batería presentan mal contacto.	Limpiar los terminales y asegurar su correcta fijación.
	La solución electrolítica de la batería es insuficiente.	Añadir la solución/electrolito necesario según especificación.
	Los interruptores de los accesorios eléctricos permanecen encendidos mientras el vehículo está detenido por largo tiempo.	Colocar todos los interruptores en posición OFF al detener el vehículo.
	Se ha instalado un equipo con alto consumo eléctrico.	Contactar al taller de servicio autorizado para revisión.
	Uso frecuente e inadecuado de accesorios eléctricos (ej.: aire acondicionado, conducción prolongada a baja velocidad durante la noche, etc.).	Utilizar los equipos eléctricos de manera adecuada y moderada.

Tabla 3-7: Fallas típicas del sistema de alimentación y tratamiento recomendado.

Fuente: Elaboración propia, en base a información técnica del Manual ZhongTong Bus Holding Co., Ltd., abril de 2021, 2025.

3.3. DESARROLLO DE ANÁLISIS DE FALLAS FUNCIONALES, MODOS DE FALLAS Y EFECTO DE COMPONENTES CRÍTICOS DEL SISTEMA.

A continuación, se presenta un Análisis de Modos y Efectos de Falla (AMFE) de los sistemas críticos del autobús eléctrico Zhongtong, enfocado en los componentes de alta y media criticidad. Para cada uno se detallan que funciones deja de cumplir el

sistema cuando falla, modos de falla y los efectos de falla. Estas descripciones se basan en la información técnica y operativa del manual del bus eléctrico ZhongTong.

3.3.1. **Motor de Tracción.**

- Fallas Funcionales.
 - Pérdida total de tracción: El motor deja de proporcionar potencia y, por lo tanto, no transmite par a las ruedas, provocando que el bus quede completamente inmovilizado.
 - Potencia o torque reducido: El motor funciona, pero a un desempeño parcial, no entrega toda la potencia requerida por el operador, esto genera una falla parcial del funcionamiento.
 - Operación irregular del motor: Este fenómeno se manifiesta con vibraciones inusuales y zumbidos o tirones durante las marchas. El motor no se encuentra en funcionamiento armónico.

- Modos de Fallas.
 - Sobrecalentamiento del motor: Una temperatura excesiva en el motor de tracción puede provocar que el activo entre en modo seguridad, reduciendo drásticamente su rendimiento. Esto puede ser un gran indicio de que puede deberse a un fallo en el sistema de enfriamiento.
 - Fallo en el embobinado de estator: Un corto circuito, circuito abierto del componente o el aislamiento defectuoso en los embobinados del motor provoca pérdida repentina de potencia u apagado del activo generando zumbidos anómalos. Esto puede ocurrir por defectos de fabricación, envejecimiento prematuro del aislamiento o sobrecargas eléctricas.
 - Avería de rodamiento o componente mecánico: El desgaste excesivo en los materiales de sacrificio o cojinetes, la falta de lubricación de estos puede provocar vibraciones intensas o trabamiento de este. Un rodamiento sin su lubricación adecuada o un eje deformado impide que el motor gire de forma armónica, causando fatigas mecánicas.
 - Alimentación eléctrica interrumpida: Una pérdida de alimentación de alta tensión hacia el motor de tracción deja al motor sin energía para operar. Esto quiere decir que una conexión deficiente en el circuito de tracción puede ocurrir por vibraciones excesivas, montaje inadecuado u otros escenarios. Si la batería o inversor se desconecta, el motor se desactiva inmediatamente.

- Efectos de Falla:
 - Inmovilización del vehículo: Ante una falla total del motor, el autobús queda completamente fuera de servicio.

- Desempeño parcial del rendimiento: Si el motor se encuentra en modo protección ya sea por un sobrecalentamiento el sistema se protege, pero afecta en la operación óptima del activo.
- Riesgos de accidentes: En casos extremos, un bloqueo mecánico podría frenar bruscamente las ruedas motrices, provocando derrapes o pérdida de control del bus.
- Impacto económico: La reparación o sustitución del motor de tracción implica altos costos. Además, la inmovilización prolongada reduce la disponibilidad de la unidad y genera pérdidas por bus fuera de servicio.

3.3.2. **Batería de Tracción.**

- Fallas Funcionales.
 - Pérdida total de suministro eléctrico (desconexión): La batería deja de entregar energía al sistema de tracción. Esto puede deberse a una desactivación de seguridad o a una interrupción interna (celdas en circuito abierto). Funcionalmente, equivale a "quitar la batería": el bus se apaga o no puede encender.
 - Reducción severa de capacidad de almacenamiento eléctrico: La batería aún funciona, pero almacena mucha menos energía de lo nominal. El vehículo experimenta un alcance muy limitado por carga, y puede agotar la batería antes de completar su ruta. Esta falla funcional ocurre cuando la batería ha sufrido degradación masiva
 - Voltaje insuficiente bajo carga requerida por el operador: Aún con estado de carga alto, la batería no mantiene el voltaje cuando se demanda corriente, resultando en caída de tensión que limita la potencia al motor. Funcionalmente, el bus puede encender, pero no tiene fuerza para acelerar apropiadamente (se comporta "ahogado" ante requerimientos de potencia). Esto suele indicar alta resistencia interna en la batería o celdas deterioradas.
 - Comportamiento errático del indicador de carga: Una falla funcional del sistema de batería puede reflejarse en lecturas incorrectas de estado de carga. Por ejemplo, el indicador de % de batería puede saltar de valores altos a bajos abruptamente.

- Modos de Fallas.
 - Degradación y envejecimiento de celdas: Con los ciclos de carga/descarga y el paso del tiempo, las celdas de iones de litio pierden capacidad y aumentan su resistencia interna. Un uso fuera de rangos óptimos (descargas profundas frecuentes, temperaturas extremas) acelera esta degradación.

- Cortocircuito interno: Una celda puede entrar en cortocircuito interno por defecto de fabricación, daño físico o sobrecalentamiento, causando que libere rápidamente su energía como calor.
 - Falla de aislamiento de alto voltaje: La batería de tracción debe estar aislada del chasis del vehículo. Si ocurre una fuga de corriente a tierra (por humedad, suciedad o daño en aislamientos). Una falla por aislamiento comprometido puede causar choques eléctricos y daños a electrónica sensible. El fabricante comenta que, al detectarse este tipo de falla, el BMS abre el circuito de batería como precaución.
 - Aumento excesivo de temperatura en batería: Si el sistema de gestión térmica de la batería (enfriamiento/ calefacción de la batería) falla, las celdas pueden sobrecalentarse durante cargas rápidas o uso intensivo. Temperaturas por encima del umbral seguro ($\sim 50\text{--}60\text{ }^{\circ}\text{C}$) disparan alarmas y pueden dañar la química de las celdas. Las causas pueden ser falla de ventiladores en el pack, enfriador obstruido, o simplemente operación con temperatura ambiente extrema sin suficiente mitigación. En casos agudos, la sobre temperatura podría llevar al modo de fuga térmica mencionado anteriormente.
 - Sobrecarga o Descarga excesiva: Un error de control (BMS) o un mal procedimiento de carga podría dejar que la batería se cargue por encima de su voltaje máximo seguro, o que se descargue por debajo del mínimo seguro de celda ($\sim 2.5\text{--}3\text{V}$ por celda Li-ion). Estas condiciones extremas causan daños irreversibles.
- Efectos de Falla:
 - Bus inmovilizado en ruta: Una falla grave de la batería (como desconexión por seguridad o cortocircuito interno) resultará en pérdida completa de tracción y apagado de la mayoría de los sistemas del bus. Esto puede dejar el autobús detenido en medio del tráfico. Desde el punto de vista operativo, implica evacuación de pasajeros, asistencia en carretera y retiro del vehículo en grúa. La confiabilidad de la ruta se ve severamente afectada.
 - Autonomía drásticamente reducida: Con una batería degradada o con módulos defectuosos, el bus no podrá cubrir las distancias previstas, requiriendo recargas más frecuentes o sustitución del vehículo a medio recorrido. Esto entorpece la planificación de operaciones y puede causar incumplimiento de horarios.
 - Alarma y limitación por bajo SOC: En casos de descarga profunda o fallo, el sistema puede entrar en protección. El manual indica que, si el SOC cae por debajo de 20%, debe cargarse pronto para no afectar la operación, y si cae a 12% (o alguna celda por debajo de 2.8V), la potencia del vehículo se limita y ni siquiera se permite abordar pasajeros hasta recargar

- Incendio en el compartimento de baterías: El peor efecto es una ignición y fuego intenso debido a una falla interna. Un incendio de batería se propaga rápidamente, emitiendo humos tóxicos como el fluoruro de hidrógeno y un calor difícil de extinguir. Esto pone en grave riesgo la vida de pasajeros y personal de rescate.
- Daños a otros sistemas eléctricos: Una falla de batería puede implicar picos de voltaje o pérdida de referencia en el sistema eléctrico. Por ejemplo, un cortocircuito interno puede hacer caer momentáneamente la tensión, afectando controladores y memorias de otros módulos.
- Costos económicos y de mantenimiento elevados: La batería de tracción es uno de los componentes más costosos del bus. Cualquier falla mayor que requiera reparación o sustitución implica un gasto muy alto.
- Consideraciones ambientales de fin de vida: si la falla obliga a reemplazar la batería, la antigua debe ser desechada o reciclada correctamente.

3.3.3. **Inversor de Potencia.**

- Fallas Funcionales.
 - Pérdida total de accionamiento eléctrico: Si el inversor falla, no se lograría suministrar la corriente necesaria al motor de tracción, resultando en que el vehículo no pueda moverse. Este componente es el cerebro de potencia que controla el motor.
 - Función de tracción degradada: el inversor puede experimentar pérdida de una fase o modulación incorrecta, causando que el motor reciba menos potencia o torque desigual. El autobús podría moverse con tirones, con potencia limitada o a velocidad muy reducida, similar a operar en modo de emergencia.
- Modos de Fallas.
 - Sobrecalentamiento del inversor: Si el sistema de enfriamiento falla o las condiciones de carga son extremas, el inversor puede exceder su temperatura operativa segura. Al sobrecalentarse, típicamente disminuye su rendimiento o se apaga por protección térmica para evitar daños mayores.
 - Fallo de control o firmware: Un error de software en el controlador del inversor, una calibración inadecuada o incompatibilidad con el motor puede llevar a modos de fallo. El manual señala que usar un inversor no coincidente con el motor o sin la debida calibración provoca comportamientos anormales.

- Conexiones flojas o daño en conectores HV: Dado que el inversor maneja alta tensión, un aflojamiento en las conexiones produce arcos eléctricos, calentamiento localizado y eventual fallo. Vibraciones del bus o mantenimiento deficiente pueden provocar esto, por lo que el fabricante insiste en revisar la fijación de pernos y conectores críticos del sistema de alimentación e inversor.
- Falla de aislamiento eléctrico: Un defecto en el aislamiento interno del inversor (por acumulación de humedad, polvo conductor o material degradado) puede generar derivaciones de alta tensión a tierra, llamado consumo eléctrico anómalo. Los sistemas de alto voltaje del bus monitorean aislamiento y, si esta falla, generan alarma y desconectan el sistema por seguridad.
- Efectos de Falla:
 - Bus fuera de servicio: La falla del inversor normalmente provoca inmovilización inmediata.
 - Modo seguro con potencia limitada: En algunos casos, ante una falla parcial, el sistema de control podría entrar en modo de emergencia limitando la potencia para permitir al bus moverse lentamente hasta un lugar seguro.
 - Riesgo de daños colaterales: Un fallo catastrófico en el inversor puede enviar picos de tensión al motor, esto puede dañar el motor eléctrico
 - Costos elevados de reparación: El inversor es un componente complejo y caro. Una falla implica reemplazo completo del módulo electrónico de potencia. Esto conlleva un costo económico alto, además del potencial daño asociado al motor o cableado que deba revisarse.

3.3.4. **Eje Motriz (Reductor/Diferencial Trasero).**

- Fallas Funcionales.
 - Pérdida de transmisión de torque: El eje motriz falla de tal manera que no entrega la fuerza del motor a las ruedas. El motor puede girar, pero el autobús no. Esto ocurre si hay rotura de engranajes en diferencial o desconexión del eje.
 - Bloqueo del eje: Una falla puede trabar mecánicamente el diferencial o los semiejes. Las ruedas motrices podrían quedar bloqueadas. Esta falla funcional es grave: las ruedas traseras pierden su rotación libre, frenando el vehículo inesperadamente.
 - Funcionamiento ruidoso o irregular: El eje motriz comienza a emitir ruidos fuertes (golpes, zumbidos) y vibraciones, indicando desgaste severo.

- Modos de Fallas.
 - Desgaste y rotura de engranajes: Con el tiempo o por lubricación inadecuada, los dientes de los engranajes del diferencial/reductor se desgastan o fisuran.
 - Falta de lubricación: El diferencial requiere aceite de engranajes para reducir fricción y evacuar calor. Fugas de aceite o mantenimiento deficiente pueden dejar el nivel bajo, provocando sobrecalentamiento y soldadura de componentes metálicos por fricción. El manual enfatiza revisar el nivel de aceite del eje trasero regularmente y rellenar si es insuficiente, así como vigilar que no haya fugas mediante inspección visual.
 - Falla de rodamientos del diferencial: Los cojinetes que soportan los engranajes y ejes pueden dañarse por fatiga, contaminación o falta de grasa. Un rodamiento en mal estado causa holguras y desalineación, generando vibraciones y que los engranajes no engranen correctamente.
 - Defecto de montaje o fabricación: Aunque menos común, un montaje incorrecto desde un rodamiento mal montado hasta defectos metalúrgicos de fábrica puede llevar a fallas prematuras del diferencial.

- Efectos de Falla:
 - Inmovilización o pérdida de propulsión: Si el diferencial se rompe y deja de transmitir potencia, el autobús queda incapaz de moverse bajo su propio motor. Este efecto es inmediato y obliga a detener la operación. Dependiendo de la situación, puede dejar el vehículo detenido en carretera, requiriendo asistencia. Desde el punto de vista operacional, es equivalente a una falla del motor/inversor en cuanto a que el bus queda fuera de servicio.
 - Daños costosos: La reparación implica costos altos, ya que requiere reconstruir o reemplazar la unidad completa de eje/reductor. Además, el aceite contaminado con partículas debe desecharse y cambiarse.
 - Impacto ambiental por fugas: Si la falla involucra la rotura de la carcasa o sellos, el aceite del diferencial puede escaparse. Este lubricante, al derramarse en la vía o suelo, causa contaminación ambiental (es un residuo peligroso). Los procedimientos de mantenimiento recalcan comprobar que no haya fugas de aceite en los ejes para prevenir esto.

3.3.5. **Sistema de Enfriamiento de Tren de tracción.**

- Fallas Funcionales.
 - Pérdida de capacidad de enfriamiento: El sistema no consigue mantener las temperaturas bajo control. Esto puede manifestarse en

que el motor y el inversor exceden sus temperaturas de trabajo porque no circula refrigerante o no hay suficiente disipación. Es una falla funcional grave: el sistema de enfriamiento deja de cumplir su función principal de extraer calor.

- Flujo de refrigerante interrumpido o insuficiente: El refrigerante no recorre adecuadamente el circuito, ya sea por una bomba de agua averiada o por obstrucciones. El motor podría operar al principio, pero irá ganando temperatura rápidamente bajo carga de operación.
- Electroventilador inoperante: Los ventiladores del radiador no funcionan cuando deberían, impidiendo la correcta disipación de calor al aire. Especialmente en detenciones o baja velocidad, la ausencia de ventilación provoca que el refrigerante no se enfríe y el calor se acumule.
- Sensor de temperatura defectuoso: El sistema podría fallar al no activar a tiempo sus subsistemas. En tal caso, las funciones de regulación la cual es mantener temperatura óptima están comprometidas, resultando en sobrecalentamiento inadvertido de los componentes.

- Modos de Fallas.

- Fuga de refrigerante: Una pérdida de líquido refrigerante por alguna manguera, sello o radiador perforado disminuye el volumen del fluido en el circuito. Con poco refrigerante, se reduce drásticamente el transporte de calor. Las fugas pueden ser causadas por conexiones flojas, grietas por vibración, corrosión interna o daño mecánico. El manual instruye a "verificar la cantidad de refrigerante en el radiador y comprobar que no haya fugas" frecuentemente, evidenciando que este modo de falla es crítico a vigilar
- Avería de la bomba de agua: Si la bomba de circulación de refrigerante falla, el flujo se detiene. Sin flujo, el calor queda estancado en el motor/inversor. Este modo puede ocurrir por fatiga de la bomba, ingreso de impurezas que la traban, corrosión, entre otros.
- Fallo del ventilador: El ventilador eléctrico que fuerza aire a través del radiador puede quemarse o trabarse. Alternativamente, un fallo en el controlador que activa el ventilador podría dejarlo apagado incluso con temperatura alta. Sin ventilación, la eficiencia del radiador cae enormemente, causando aumento de temperatura del refrigerante especialmente en clima cálido o tráfico lento.
- Obstrucción en el radiador o líneas: Con el tiempo, los radiadores pueden acumular suciedad, insectos, polvo o depósitos internos que reducen el intercambio de calor.
- Fallo en sensores o cableado del sistema: Termistores que monitorean temperaturas pueden dar lecturas erróneas si fallan, impidiendo las acciones correctivas (por ejemplo, no encender un ventilador). El

resultado es que el sistema cree que todo está bien mientras la temperatura real sube sin control.

- Efectos de Falla:
 - Sobrecalentamiento de componentes de tracción: El efecto primario es que el motor de tracción y/o el inversor alcanzan temperaturas peligrosas. Los sistemas modernos reaccionan reduciendo potencia o apagándose antes de dañarse. En el Zhongtong, según el manual, si el controlador del motor excede $\sim 80^{\circ}\text{C}$, entra en modo de limitación de potencia automáticamente.
 - Paradas imprevistas y fallas en ruta: Si el sobrecalentamiento continúa, es probable que el sistema genere alarmas en el tablero y eventualmente apague componentes críticos por seguridad.
 - Daño permanente en motor/inversor: Si la falla de enfriamiento no se aborda a tiempo, el calor excesivo puede degradar o destruir los componentes. En el motor, puede quemar el aislamiento de los devanados o deformar partes, en el inversor, el sobrecalentamiento puede quemar módulos de potencia y electrónica.
 - Consecuencias ambientales: Una falla de enfriamiento frecuentemente viene acompañada de fugas de refrigerante, El refrigerante típico contiene etilenglicol u otras sustancias tóxicas, que al derramarse contaminan suelos y cuerpos de agua. Además, si ocurre un incendio por sobrecalentamiento, se liberarán gases nocivos y posiblemente líquidos peligrosos.

3.3.6. **Sistema de Gestión de Baterías (BSM):**

- Fallas Funcionales.
 - Pérdida de monitoreo y control seguro: el BMS deja de cumplir su función de supervisar voltajes, temperaturas y corrientes de la batería, así como de controlar equilibrado de celdas y contactores. Funcionalmente, el sistema de almacenamiento queda "sin cerebro": no hay garantías de protección frente a sobrecarga, y descargas extremas, ni aviso de fallas. Esto típicamente lleva al sistema a un modo seguro o a operar sin protecciones.
 - Indicaciones y mediciones erróneas: una falla del BMS puede dar lecturas incorrectas del estado de carga, SOH (estado de salud) o temperaturas. Por ende, el conductor recibe información equivocada. Por ejemplo, el BMS podría reportar que queda 50% de energía cuando en realidad la batería está casi vacía, o no alertar sobre un sobrecalentamiento real.

- Control de carga/descarga anómala: el BMS puede fallar en su tarea de equilibrar celdas y regular corrientes. Funcionalmente esto se nota en ciclos de carga incompletos o en limitaciones de potencia inusuales durante la marcha.
- Modos de Fallas.
 - Fallo de sensores (voltaje/temperatura): el BMS depende de múltiples sensores en el pack de baterías. Si un sensor de temperatura se desconecta o da lecturas inválidas, el BMS podría asumir un sobrecalentamiento inexistente y apagar el sistema, o al contrario no detectar un calor peligroso. Estas fallas pueden ser causadas por conexiones flojas, corrosión en conectores de sensores o defectos electrónicos.
 - Error en la comunicación (CAN Bus): el BMS se comunica con otros controladores. Un fallo en la comunicación puede causar pérdida de datos críticos. Por ejemplo, si la orden de "reducción de potencia" o la señal de "listo para cargar" no se transmiten/reciben, la coordinación entre sistemas falla. Esto puede llevar a condiciones inseguras o a que el vehículo se detenga al perder la comunicación con su batería.
 - Fallos de componentes electrónicos internos: el BMS incluye placas de circuito con microcontroladores, amplificadores de medición, etc. Un sobrevoltaje, humedad o defecto de fabricación puede dañar estos componentes. Por ejemplo, la sección de medida de corriente podría fallar y reportar cero corrientes continuamente; el BMS entonces no sabría si se está cargando/descargando. O un regulador de poder del BMS puede quemarse, dejando al sistema sin alimentación.
- Efectos de Falla:
 - Desconexión preventiva y detención del vehículo: la mayoría de BMS, ante detección de una anomalía grave o pérdida de comunicación, optan por abrir los contactores principales de la batería para un "fail-safe". El efecto práctico es que el bus se apagará o no permitirá el encendido, inmovilizándolo hasta que se resuelva el problema. Esto es intencionado para seguridad, pero implica que una falla del BMS por sí sola puede dejar inutilizado al vehículo (impacto operativo inmediato).
 - Riesgo de daño a la batería por falta de protección: si el BMS falla de forma que no interrumpe condiciones peligrosas, la batería queda expuesta. Por ejemplo, sin BMS operativo, nada impedirá que un cargador externo siga metiendo corriente aun si las celdas ya superaron su voltaje máximo, posible sobrecarga con incendio.
 - Limitaciones de rendimiento inesperadas: Un BMS defectuoso puede imponer restricciones erráticas, como reducir la potencia de salida o limitar la corriente de carga sin motivo consistente.

- Implicaciones ambientales indirectas: si un BMS defectuoso causa la degradación acelerada de la batería. La batería podría necesitar reemplazo antes de tiempo generando gastos económicos.

3.3.7. **Sistema de Carga.**

- Fallas Funcionales.
 - Imposibilidad de cargar la batería: El sistema no transfiere energía a la batería, ya sea por falla total (no carga) o parcial (carga lenta o detención prematura), impidiendo recuperar el SOC requerido.
 - Fallo del conector: El sistema no detecta ni asegura correctamente el acoplamiento del enchufe, bloqueando la carga o permitiendo desconexión insegura bajo energía.
 - Conexión eléctrica deficiente por suciedad, corrosión o sulfatación del conector: La presencia de polvo, humedad, sulfatación o grasa en el puerto de carga puede impedir un contacto eléctrico adecuado entre los pines de potencia y los de comunicación.
- Modos de Fallas.
 - Daño o desgaste del puerto de carga: Cojinetes, pines o contactos deteriorados aumentan resistencia o bloquean señales de comunicación, impidiendo la transferencia de corriente.
 - Fallo en comunicación BMS cargador: Errores en señales piloto, CAN o PLC provocan la detención del proceso de carga por seguridad.
 - Condiciones ambientales adversas: Tormentas, humedad o temperaturas extremas activan protecciones y detienen la carga para evitar daños eléctricos.
 - Fallo de seguridad: El bloqueo mecánico o sus sensores no funcionan, impidiendo iniciar carga o provocando riesgo de desconexión accidental.
- Efectos de Falla:
 - Autonomía insuficiente o bus fuera de servicio: Si la batería no se recarga en la ventana programada, el bus no está disponible para la operación, generando retrasos y afectando su disponibilidad.
 - Interrupción en ruta: Una carga incompleta no detectada puede causar agotamiento prematuro de la batería durante la operación, obligando a retirar el bus y afectando el servicio.
 - Riesgo eléctrico para personas: Conectores defectuosos, humedad o fallas de aislamiento pueden exponer bornes energizados o generar chispas, afectando a operadores o personal de patio.

- Costos de reparación elevados: El reemplazo de cargadores, conectores o electrónica asociada requiere mano de obra especializada y puede incluir revisión de la infraestructura.

3.3.8. **Frenos de Servicio.**

- Fallas Funcionales.
 - Pérdida total de capacidad de frenado: Ocurre cuando ninguna de las ruedas frena al pisar el pedal, dejando al autobús sin poder disminuir su velocidad mediante el sistema de servicio. Es una falla funcional catastrófica: el vehículo queda sin frenos operativos.
 - Reducción severa de la fuerza de frenado: El frenado existe, pero es muy débil o prolongado el bus tarda una distancia excesiva en detenerse.
 - Frenado desequilibrado: una falla funcional puede presentarse como frenos dispares, por ejemplo, solo frena el eje delantero, pero no el trasero, o viceversa, o un lado frena más que el otro. Esto se manifiesta en que el bus se desvía hacia un lado al frenar o presenta inestabilidad.
 - Freno trabado/no liberado: Aunque el frenado en sí ocurra, existe la falla funcional de que alguna rueda permanezca frenada permanentemente o el sistema no libere la presión correctamente al soltar el pedal. Esto ocasiona exceso de temperatura en el sistema de frenos.
 - Degradación progresiva del frenado por desgaste o deformación de componentes críticos: Esta falla funcional ocurre cuando el sistema pierde efectividad debido al estado físico deteriorado de sus elementos principales, afectando la capacidad de generar fuerza de frenado adecuada. Un caso común es la desviación (alabeo) de los discos de freno, lo que provoca vibraciones, pulsaciones en el pedal y reducción del área real de contacto. Del mismo modo, el desgaste excesivo o irregular de las pastillas, así como la cristalización por sobrecalentamiento, disminuyen significativamente la fricción disponible.
- Modos de Fallas.
 - Fuga de aire en el circuito neumático: Los frenos de servicio en buses dependen de aire comprimido. Una pérdida de presión de aire por fuga provoca que al pisar el pedal no haya suficiente presión para empujar las zapatas/pastillas contra los discos/tambores. El manual especifica verificar que no haya fuga de gas en las juntas de válvulas y tuberías del sistema de frenos.

- Desgaste o mal ajuste de elementos de fricción: Pastillas de freno desgastados en exceso reducen la fricción disponible. Si no se ajustan o sustituyen a tiempo, el vehículo perderá eficacia de frenado. Los tambores o discos muy gastados o rectificadas fuera de medida también contribuyen a la ineficiencia de frenado.
 - Contaminación en las superficies de freno: Si aceite, grasa o líquido llega a las pastillas/discos (por ejemplo, por un retén de eje que gotea aceite al tambor), la capacidad de fricción cae drásticamente. Esto actúa como lubricante indeseado y el resultado es frenado muy débil en esa rueda.
 - Fallos en el sistema antibloqueo (ABS): si el módulo ABS falla puede llevar a que en frenadas de emergencia las ruedas se bloqueen, causando derrape y falta de control direccional.
- Efectos de Falla:
 - Altísimo riesgo de accidente: La pérdida total o parcial significativa de frenos de servicio es quizás la falla más crítica en seguridad. Un autobús sin frenos efectivos puede arrollar pendientes o colisionar porque no puede detenerse a tiempo. Históricamente, fallas de frenos en vehículos pesados han causado accidentes graves, incluso fatales.
 - Activación del freno de emergencia automático: los buses con frenos neumáticos tienen frenos de estacionamiento de resorte que se activan automáticamente si la presión de aire cae demasiado normalmente <6 bar (según datos de fabricante). Si la falla es por pérdida de aire (fuga o compresor parado), eventualmente el freno de estacionamiento se aplicará solo como última medida de seguridad para inmovilizar el vehículo.
 - Desvío y pérdida de control al frenar: con frenado desbalanceado (por ejemplo, frenos funcionando solo en un lado o en un eje), el bus se desviará de su trayectoria cuando se apliquen los frenos. En una frenada de emergencia, esto podría hacerlo girar y volcar, o invadir carriles contrarios.

3.3.9. **Compresor de Aire Neumático.**

- Fallas Funcionales.
 - Falla total de presurización: El compresor no genera presión en el sistema neumático. La presión de los depósitos desciende y no se recupera, dejando al vehículo sin aire para frenos y otros sistemas.
 - Presurización insuficiente o lenta: El compresor funciona, pero no logra alcanzar la presión de corte o tarda demasiado en llenar el sistema. Se

mantiene la alarma de baja presión y el aire se agota rápidamente en frenadas sucesivas.

- Ciclo de trabajo anómalo: El compresor permanece encendido continuamente o no arranca cuando corresponde. Esto indica fallas en control o demanda excesiva y compromete la operación normal.
- Ruidos o vibraciones excesivas: Aunque aún produzca aire, presenta golpeteos o vibración por fallas internas (rodamientos, biela, pistón), lo que anticipa una falla inminente del equipo.

- Modos de Fallas.

- Avería mecánica interna: Desgaste o daño de pistón, cilindro, válvulas o rodamientos. Puede incluir desgaste excesivo por falta de lubricación o ingreso de partículas.
- Falla del motor eléctrico o alimentación: El motor que acciona el compresor no gira por embobinados dañados, fusible fundido o cables partidos, dejando el compresor sin capacidad de operar.
- Válvula reguladora defectuosa: El compresor queda trabajando sin parar o no entra en carga, provocando falta de presión o riesgo de sobrepresión (válvula de alivio constantemente cerrada o abierta).
- Fugas severas en el sistema neumático: Las pérdidas de aire en tuberías o componentes obligan al compresor a trabajar sin lograr reponer presión, llevándolo a sobrecalentamiento y eventual daño.
- Secador de aire obstruido: Un filtro o secador tapado restringe el flujo de aire, provocando carga lenta, baja presión o ingreso de humedad al sistema.
- Sensor de presión defectuoso: Lecturas incorrectas impiden que el compresor encienda o apague cuando corresponde, generando presiones fuera del rango seguro.

- Efectos de Falla:

- Pérdida de frenos neumáticos: La presión cae bajo el mínimo operativo, comprometiendo los frenos de servicio y aumentando drásticamente el riesgo de accidente por aumento de la distancia de frenado.
- Detención forzosa del vehículo: El bus debe detenerse cuando se activa la alarma de baja presión. No puede seguir circulando hasta recuperar presión o reparar la falla.
- Activación automática del freno de estacionamiento: Si la presión es demasiado baja, los frenos de resorte se aplican automáticamente, inmovilizando el vehículo incluso en circulación.
- Daños por funcionamiento continuo: Un compresor trabajando sin descanso por fuga o falla de su válvula de alivio puede recalentarse, dañar sellos, quemar el motor eléctrico o incluso generar riesgo de incendio localizado.

3.3.10. Sistema de Dirección.

- Fallas Funcionales.
 - Pérdida total de capacidad de dirección (bloqueo): El sistema de dirección deja de responder por completo, impidiendo girar las ruedas directrices. En esta condición el volante puede quedarse trabado o desconectado, de modo que al girarlo no se transmite movimiento a las ruedas.
 - Dirección excesivamente dura (pérdida de asistencia): La volante gira, pero requiere una fuerza anormalmente alta debido a la falta de asistencia hidráulica. Esta falla funcional ocurre cuando la dirección asistida deja de funcionar, provocando que el conductor deba hacer un gran esfuerzo para maniobrar.
 - Vibraciones, tirones o desviaciones en la dirección: La dirección funciona, pero de manera irregular o inestable. El volante puede vibrar fuertemente, sentirse impreciso o presentar tirones al girar, y el vehículo puede tender a desviarse de la trayectoria. Esto indica que el sistema no garantiza un control direccional suave y preciso. **El manual documenta** esta falla funcional bajo “vibración del volante”, asociada típicamente a desgastes o desajustes mecánicos.

- Modos de Fallas.
 - Bajo nivel de aceite hidráulico o fugas en el circuito: La pérdida de fluido de dirección por una fuga o un nivel insuficiente de aceite en el depósito provoca una caída de presión en el sistema, causando dirección dura o intermitente. Las fugas pueden ocurrir en las tuberías, mangueras, sellos o conexiones del circuito hidráulico debido a daños, envejecimiento o abrazaderas flojas. **El manual recomienda** comprobar que no haya fugas de aceite en la bomba, tuberías y partes de la dirección asistida durante las inspecciones. De hecho, ante una “fuerza de giro pesada”, lo primero es verificar el nivel de líquido de dirección y rellenar si es necesario, ya que aceite insuficiente en el sistema es una causa común de endurecimiento. Si el nivel sigue bajando, es indicio de una fuga activa; una rotura de un tubo o un sello defectuoso permitirán la pérdida de aceite.
 - Filtro obstruido o fluido hidráulico inadecuado: El filtro del sistema de dirección (ubicado típicamente en el depósito de aceite asistido) puede saturarse con el tiempo por impurezas, impidiendo la correcta circulación del fluido. Un filtro parcialmente taponado provoca restricción en la succión de la bomba, lo que deriva en asistencia

insuficiente (volante duro) o ruido de bomba esforzada. **El manual indica** que un filtro bloqueado hace que “no se consiga fácil absorción de aceite”, debiendo limpiarse o reemplazarse. Asimismo, usar un aceite de dirección con viscosidad incorrecta (p.ej. demasiado espeso para bajas temperaturas) dificulta el flujo hidráulico y la respuesta de la dirección, especialmente en clima frío. El fabricante recomienda utilizar únicamente aceite hidráulico de la viscosidad especificada el **ATF III H** y sustituir el aceite hidráulico inadecuado inmediatamente si se estuviera usando uno erróneo.

- El desgaste, desajuste o falta de mantenimiento en los elementos de la dirección: Esto puede generar vibraciones, tironeo y una respuesta imprecisa. Holguras en las **rótulas de los terminales de dirección** o en los **palebolitos** provocan temblores en el volante y pérdida de estabilidad. Un desgaste excesivo en los **dientes de la cremallera** produce juego en la dirección y dificulta mantener el bus en línea recta. La falta o deterioro de los **fuelles**, encargados de proteger y conservar la lubricación de la cremallera y sus articulaciones, acelera el desgaste interno y endurece el giro. Golpes o deformaciones en componentes del conjunto también afectan la geometría del eje delantero, generando desvíos y volante “pesado”. Del mismo modo, una alineación incorrecta contribuye a que el volante no retorne al centro. Entre los síntomas destacan vibraciones, ruidos en baches, desgaste irregular de neumáticos y dirección dura cuando los fuelles no protegen adecuadamente la lubricación de las articulaciones.

- Efectos de Falla:

- Pérdida de control direccional: Ciertos modos de falla, en especial los mecánicos catastróficos, pueden desencadenar la pérdida instantánea de la capacidad de maniobrar el vehículo. Esto representa uno de los riesgos de seguridad más altos, pues el conductor podría ser incapaz de evitar un obstáculo o mantener la trayectoria, llevando a un accidente grave.
- Interrupción del servicio y maniobras de emergencia: Desde un punto de vista **operativo** ante cualquier problema serio en la dirección, la operación del bus se ve inmediatamente afectada. Si la dirección asistida falla (volante muy duro) durante la ruta, el conductor tendrá dificultades para seguir conduciendo con normalidad especialmente al doblar esquinas o estacionar por lo que probablemente deba detener el vehículo tan pronto como sea seguro.
- Impacto ambiental por derrames de fluido hidráulico: Aunque el sistema de dirección en sí es principalmente mecánico/hidráulico y no emite contaminantes durante su funcionamiento normal, una falla puede generar efectos ambientales adversos. En particular, las fugas o

roturas que derramen aceite hidráulico al medio ambiente representan un problema: este aceite es un residuo peligroso que contamina el suelo y el agua si no se contiene adecuadamente.

- Costos de reparación y mantenimiento (Impacto Económico): La recuperación de un sistema de dirección averiado puede implicar gastos elevados. Algunos componentes, como la bomba hidráulica o la caja de dirección (engranaje integral ZF), tienen precios significativos. Además, algunas consecuencias de fallas progresivas de dirección incluyen desgaste acelerado de neumáticos, obligando a cambiarlos con mayor frecuencia. En síntesis, las fallas en la dirección conllevan costos económicos directos importantes.

**CAPITULO 4: ELABORACION DE UN PLAN DE MANTENIMIENTO PARA BUS
ELECTRICO ZHONGTONG.**

4.1. **PROPUESTA DE PLAN DE MANTENIMIENTO DEL BUS ZHONGTONG.**

A partir del análisis desarrollado en los capítulos anteriores, y considerando los resultados del estudio de criticidad, los modos de falla identificados y el contexto operacional del Terminal Rutas Las Playas, en este capítulo se presenta la elaboración de un plan de mantenimiento específico para los buses eléctricos Zhongtong. Este plan tiene como objetivo principal asegurar la disponibilidad operativa del activo, reducir la ocurrencia de fallas inesperadas y fortalecer la seguridad tanto del operador como de los pasajeros.

La propuesta se fundamenta en los principios del Mantenimiento Centrado en la Confiabilidad (RCM), priorizando los sistemas y componentes críticos del bus eléctrico, especialmente aquellos cuya falla implica detención inmediata del vehículo, altos costos de reparación o riesgos para la seguridad. A diferencia de los planes genéricos entregados por el fabricante, el enfoque adoptado incorpora el contexto real de operación, la frecuencia de uso, las condiciones de servicio urbano y la experiencia del personal de mantenimiento.

El plan de mantenimiento se estructura en distintas frecuencias de intervención, combinando inspecciones de rutina y tareas preventivas programadas. En primer lugar, se definen actividades de mantenimiento diario orientadas principalmente a la inspección visual y funcional del bus, con énfasis en detectar condiciones anómalas antes de la operación. Estas tareas buscan prevenir fallas incipientes y asegurar que el vehículo se encuentre en condiciones seguras para iniciar el servicio.

Adicionalmente, se incorporan planes de mantenimiento semanales y por kilometraje, los cuales consideran revisiones más detalladas sobre sistemas críticos como el tren de tracción eléctrica, el sistema de almacenamiento de energía, el sistema de frenos y los sistemas auxiliares. Este enfoque permite ajustar las intervenciones al desgaste real de los componentes, optimizando recursos y evitando mantenimientos innecesarios o tardíos.

Finalmente, se integra un checklist previo a la conducción, diseñado como una herramienta práctica para el operador, que refuerza la detección temprana de fallas y promueve una cultura de mantenimiento preventivo. En conjunto, esta propuesta busca transformar el mantenimiento del bus eléctrico Zhongtong desde un enfoque reactivo hacia una gestión planificada, sistemática y alineada con los principios de confiabilidad y gestión de activos.

4.1.1 **Plan de Mantenimiento Diario. (Inspecciones de Rutina).**

INSPECCIONES DE MANTENIMIENTOS DIARIAS (Antes de la operación)																															
Componentes del sistema:	Tarea de mantenimiento:	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30
Inspección general (visual)	Inspección visual perimetral del vehículo (luces, puertas, carrocería, estado general).	I	I	I	I	I	I	I	I	I	I	I	I	I	I	I	I	I	I	I	I	I	I	I	I	I	I	I	I	I	I
Sistema de carga (puerto de carga)	Verificar visualmente el puerto de carga .	I	I	I	I	I	I	I	I	I	I	I	I	I	I	I	I	I	I	I	I	I	I	I	I	I	I	I	I	I	I
Sistema de carga (puerto de carga)	Comprobar que el cable de carga y su conector se encuentren en optimas condiciones.	I*	I*	I*	I*	I*	I*	I*	I*	I*	I*	I*	I*	I*	I*	I*	I*	I*	I*	I*	I*	I*	I*	I*	I*	I*	I*	I*	I*	I*	I*
Neumáticos	Comprobar estado de los neumáticos (presión, desgaste, tuercas sueltas).	R	R	R	R	R	R	R	R	R	R	R	R	R	R	R	R	R	R	R	R	R	R	R	R	R	R	R	R	R	R
Sistema de dirección	Revisar nivel de aceite hidráulico de dirección (si aplica dirección asistida hidráulicamente).	R	R	R	R	R	R	R	R	R	R	R	R	R	R	R	R	R	R	R	R	R	R	R	R	R	R	R	R	R	R
Sistema de frenos (neumático)	Verificar presión del aire en el sistema de frenos antes de iniciar marcha.	R	R	R	R	R	R	R	R	R	R	R	R	R	R	R	R	R	R	R	R	R	R	R	R	R	R	R	R	R	R
Depósito de aire (frenos)	Drenar condensado de agua del depósito de aire (purga manual del tanque de aire).	R	R	R	R	R	R	R	R	R	R	R	R	R	R	R	R	R	R	R	R	R	R	R	R	R	R	R	R	R	R

Tabla 4-1: Plan de mantenimiento diario (inspecciones de rutina antes de operación).

Fuente: Elaboración propia, basada en recomendaciones del fabricante y adecuación al contexto operacional del Terminal Ruta Las Playas, 2025.

4.1.2. **Plan de mantenimiento Semanales.**

MANTENIMIENTOS SEMANALES																															
Componentes del sistema:	Tarea de mantenimiento:	DIAS																													
		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30
Sistema de dirección	Inspección física de componentes de dirección (rótulas, barras, juegos).							I							I							I							I		
Sistema de dirección	Revisar fijaciones, uniones cardánicas y soportes de la columna de dirección.							I							I							I							I		
Sistema de dirección	Verificar estado de los fuelles de guardapolvo de la cremallera y terminales.							I							I							I							I		
Sistema de suspensión	Revisión de holguras en bujes y pernos de suspensión.							I							I							I							I		

4.1.3 **Plan de mantenimientos Mensuales / Km.**

		KM (X1000)										MESES	
Componentes del sistema:	Tarea de mantenimiento:	1	10	20	30	40	50	60	70	80	90	100	
Motor de tracción	Verificar ausencia de fugas en la caja reductora	I	I	I	I	I	I	I	I	I	I	I	O CADA 1 MES
Motor de tracción	Revisar arneses y conectores de alto/bajo voltaje del motor para que estén limpios y asegurados	I*	I*	I*	I*	I*	I*	I*	I*	I*	I*	I*	O CADA 1 MES
Motor de tracción	Termografía de bobinas y conexiones bajo carga para detectar puntos calientes anómalos.	R*	R*	R*	R*	R*	R*	R*	R*	R*	R*	R*	O CADA 1 MES
Motor de tracción	Cambiar lubricante del reductor de velocidad (aceite de engranajes) y su filtro de aceite.											R*	
Motor de tracción	Limpieza del respiradero (vent) de la caja reductora		R	OP	R	OP	R	OP	R	OP	R	OP	
Motor de tracción	Termografía de la unidad (motorreductor) bajo carga.			R*		R*		R		R*		R*	
Batería de tracción	Revisar estado de los terminales y conectores de batería de alto voltaje; limpiar si es necesario.	I*	I*	I*	I*	I*	I*	I*	I*	I*	I*	I*	CADA 1 MES
Batería de tracción	Leer datos del BMS: voltaje por módulo, estado de carga, balanceo de celdas.	I*	I*	I*	I*	I*	I*	I*	I*	I*	I*	I*	CADA 1 MES
Batería de tracción	Uso de termografía sobre paneles de distribución y cableado HV para detectar puntos calientes.	R*	R*	R*	R*	R*	R*	R*	R*	R*	R*	R*	CADA 1 MES
Batería de tracción	Verificar códigos de falla en BMS mediante escáner electrónico.	R	R	R	R	R	R	R	R	R	R	R	
Batería de tracción	Comprobación de tensión, aislamiento y balanceo de celdas con herramienta de diagnóstico.		R*		R*		R*		R*		R*		
Batería de tracción	Prueba de carga/descarga parcial para evaluar capacidad.		I		I		I		I		I		
Sistema de dirección	Verificación y ajuste de tornillería de dirección (caja, soportes).	I		I		I		I		I		I	
Sistema de dirección	Comprobar fugas de aceite en cremallera/bomba de dirección	I	I	I	I	I	I	I	I	I	I	I	

Sistema de dirección	Inspeccionar muelles de goma/soportes del motor de dirección.	I	I	I	I	I	I	I	I	I	I	I	
Sistema de dirección	Cambiar fluido de dirección hidráulica y filtro según especificación						C						C O CADA 24 MESES
Sistema de frenos	prueba de estanqueidad del sistema neumático.	I	I	I	I	I	I	I	I	I	I	I	
Sistema de frenos	Inspección endoscópica del depósito de fluido y limpieza de este.				R			R				R	O CADA 12 MESES
Compresor neumático	Cambio de aceite lubricante del compresor.		C		C		C		C			C	O CADA 6 MESES
Compresor neumático	Verificación de la válvula de alivio de presión.			I		I		I			I		I
Compresor neumático	Cambio de filtro secador de aire del compresor.						C						C
Eje trasero (Diferencial)	Comprobar nivel y calidad de aceite del diferencial.	R			R			R				R	
Eje trasero (Diferencial)	Cambiar aceite diferencial trasero.							C					O CADA 12 MESES
Eje trasero (Reductor)	Cambiar aceite reductor trasero.					C					C		O CADA 12 MESES
Eje trasero (Reductor)	Comprobar nivel y calidad de aceite del reductor.	R			R			R				R	
Sistema de refrigeración	Inspección integral del sistema de enfriamiento (mangueras, radiador, bomba).	I	I	I	I	I	I	I	I	I	I	I	O CADA 1 MES
Sistema de refrigeración	Reemplazo de refrigerante (mantenimiento preventivo según especificación).												R O CADA 24 MESES
Sistema de refrigeración	Verificación termográfica de intercambiadores (identificar zonas obstruidas).		R*		R*		R*		R*			R*	
Batería de tracción / BMS	Mantenimiento de batería y balanceo de celdas (según BMS).	R*		R*		R*		R*		R*		R*	O CADA 3 MESES
Sistema eléctrico de tracción	Inspección termográfica de conexiones y componentes de alta tensión (batería, cables, inversor, motor).	R*		R*		R*		R*		R*		R*	O CADA 3 MESES
BMS (Sistema de gestión de batería)	Diagnóstico semestral del BMS vía software.	R*		R*		R*		R*		R*		R*	

Equipo de seguridad	Verificación de extintores, martillos de seguridad y botiquín. (Verificar vida útil)									I					I	O CADA 12 MESES
----------------------------	--	--	--	--	--	--	--	--	--	----------	--	--	--	--	----------	-----------------

R: REALIZAR.
R*: REALIZAR POR PERSONAL AUTORIZADO.
I: INSPECCIONAR, CAMBIAR Y/O CORREGIR.
I*: INSPECCIONAR POR PERSONAL AUTORIZADO.
C: CAMBIAR, REEMPLAZAR.
OP: OPCIONAL.

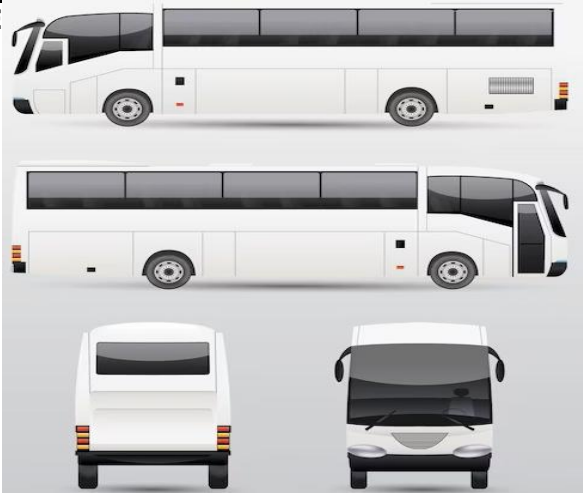
Tabla 4-3: Plan de mantenimiento mensual y por kilometraje (km/mes).

Fuente: Elaboración propia, basada en recomendaciones del fabricante y adecuación al contexto operacional del Terminal Ruta Las Playas, 2025.

Notas técnicas: Se recomienda usar cámaras endoscópicas para inspeccionar áreas internas de motores y ejes, y realizar termografías periódicas en baterías, inversores y puntos de conexión de alta tensión. Los diagnósticos electrónicos (Ej. lectura de códigos BMS/ABS/ECTS) deben hacerse mensualmente para anticipar fallas. Siguiendo estos procedimientos, el mantenimiento preventivo será exhaustivo y acorde a las mejores prácticas industriales

4.1.4. Check List Previo a Conducción.

CHECK LIST ACTIVO / SOMNOLENCIA Y FATIGA									
CONDUCTOR:			FECHA:			FIRMA:			N°
KM:		PATENTE							
CHEQUEO GENERAL					CHEQUEO EXTERIOR / SEGURIDAD				
ÍTEM	DESCRIPCIÓN CHEQUEO	B	M	NA	ÍTEM	DESCRIPCIÓN CHEQUEO	B	M	NA
1	Documentos del vehículo / operador				1	Estado de neumáticos			
2	Nivel de carga y autonomía				2	Estado de llantas			
3	Indicadores de batería de tracción sin alarmas				3	Estado de puertas			
4	Climatización				4	Estado de escalones de acceso			
5	Desempañadores				5	Alarma de retrocesos			
6	Estado de plumillas				6	cargador externo desconectado			
7	Cinturón de seguridad				7	Letrero LED de recorrido			
8	Estado parabrisas				8	Estado de vidrios laterales			
9	Espejos laterales				9	Rueda de repuesto			
10	Luces de retroceso				10	Estado placas patentes			
11	Luces altas y bajas				11	Limpieza general exterior			
12	Luz de freno y señalización				12	Compartimentos exteriores cerrados			
13	Dirección (Holgura, dureza anormal volante)				13	Gata, llave y cuñas			
14	Freno de pedal (verificar recorrido)				14	Extintor, Botiquín			
15	Nivel liquido refrigerante				15	Triángulos			
16	Nivel de agua limpia parabrisas				16	Chaleco reflectante			
OBSERVACIONES:									

PREGUNTAS PREVIAS PARA CONDUCIR				REPORTE DE DAÑO (MARCAR DAÑO EN DIAGRAMA)	
Pregunta	SI	NO	Observaciones	OBSERVACIONE	
¿Presento signos de sueño o fatiga?					
¿Me siento en malas condiciones físicas o anímicas?					
¿Estoy tomando medicamentos que afecten la conducción?					
¿Dormí menos de 6 horas continuas?					
¿He consumido alcohol o drogas?					

En caso de que **alguna de las preguntas del apartado de Somnolencia y Fatiga registre al menos una respuesta afirmativa (SÍ)**, el conductor **deberá detener inmediatamente el inicio de la conducción**, informar su condición de manera directa a su **supervisor o jefatura correspondiente** y **abstenerse de operar el vehículo** hasta que se evalúe su situación y se autorice formalmente la continuidad de la operación.

Tabla 4-4: Check List previo a la conducción (control operativo previo).

Fuente: Elaboración propia, diseñada para control operativo previo a la conducción en flota del Terminal Ruta Las Playas, 2025.

**CAPITULO 5: ANÁLISIS DE COSTOS DE IMPLEMENTACIÓN DEL PLAN DE
MANTENIMIENTO PARA BUSES ELÉCTRICOS ZHONGTONG.**

5.1. EVALUACIÓN ECONÓMICA COMPARATIVA DE COMPONENTES CRÍTICOS Y RECURSOS PARA MANTENIMIENTO PREDICTIVO.

Con el fin de sustentar la viabilidad técnica y económica del plan de mantenimiento propuesto, se realizó una evaluación comparativa de los principales componentes críticos del sistema de alta tensión del bus eléctrico Zhongtong modelo LCK6850EVG. En particular, se analizaron la batería de tracción, el motor de tracción y el inversor de potencia, debido a que concentran un alto valor económico y su falla impacta de manera directa la disponibilidad operacional del vehículo.

Para efectos de comparación, los valores en CLP se estiman a partir de un tipo de cambio referencial utilizado en esta evaluación (1 USD = 906 CLP). Los montos deben entenderse como referenciales y ajustables según cotización final y fecha de adquisición.

COMPONENTE	VALOR (USD)	VALOR (CLP)
BATERIA DE TRACCION (CATL)	\$ 35.000	\$ 32.000.000
MOTOR DE TRACCION (S.I.P)	\$ 4.500	\$ 4.076.550
INVERSOR DE POTENCIA	\$ 4.000	\$ 3.623.600

Tabla 5-1: Valor económico comparativo de componentes críticos (alta tensión).

Fuente: Elaboración propia, en base a valores referenciales de reposición recopilados para este estudio y tipo de cambio aplicado, 2025.

En términos generales, los resultados muestran que la batería de tracción representa, con amplia diferencia, el componente de mayor costo, seguida por el motor de tracción y el inversor. En consecuencia, una falla no detectada en cualquiera de estos sistemas puede implicar costos de reposición elevados y periodos prolongados de indisponibilidad del bus.

En contraste con el valor de reposición de estos componentes, los costos asociados a la implementación de técnicas de mantenimiento predictivo basadas en inspecciones no destructivas, como la termografía infrarroja y la inspección visual especializada, resultan comparativamente menores. Esto se observa tanto en capacitación del personal como en adquisición de equipos de apoyo.

CURSOS (CERTIFICACIÓN)	VALOR (CLP)
TERMOGRAFIA	\$ 875.000
INSPECCION VISUAL	\$ 600.000

Tabla 5-2: Costos de capacitación/certificación para mantenimiento predictivo.

Fuente: Elaboración propia, en base a valores referenciales de reposición recopilados para este estudio y tipo de cambio aplicado, 2025.

EQUIPOS	VALOR (CLP)
CAMARA TERMOGRAFICA	\$ 666.990
LAMPARA ENDOSCOPICA	\$ 114.990
LINTERNA INDUSTRIAL	\$ 220.990

Tabla 5-3: Equipamiento de apoyo para inspección predictiva

Fuente: Elaboración propia, en base a valores referenciales de reposición recopilados para este estudio y tipo de cambio aplicado, 2025.

Desde una perspectiva de mantenimiento centrado en la confiabilidad, la aplicación sistemática de termografía en sistemas de alta tensión permite monitorear el estado de componentes críticos sin intervención directa ni detención prolongada del activo, lo que resulta especialmente relevante en flotas de transporte público. En síntesis, la inversión requerida en capacitación y equipamiento es marginal frente al costo de reemplazo de un componente de alta tensión, por lo que su incorporación al plan de mantenimiento contribuye a reducir el riesgo de fallas imprevistas, minimizar costos correctivos de alto impacto y mejorar la disponibilidad y seguridad operacional del sistema.

CONCLUSIÓN.

La incorporación de buses eléctricos en el transporte público urbano representa un avance significativo hacia sistemas de movilidad más sustentables, eficientes y alineados con los objetivos de descarbonización. Sin embargo, esta transición tecnológica exige un cambio profundo en la forma en que se gestionan los activos, particularmente en lo relativo al mantenimiento, debido a la alta complejidad técnica, el elevado costo de los componentes críticos y la dependencia de sistemas eléctricos y electrónicos de alta tensión.

En este trabajo de titulación se logró diseñar un **plan de mantenimiento basado en confiabilidad (RCM)** aplicado a buses eléctricos Zhongtong que operan en el terminal Rutas Las Playas, integrando herramientas de la ingeniería de mantenimiento tales como el análisis de criticidad, diagramas de Pareto, diagrama de Ishikawa y el análisis de modos y efectos de falla. Estas metodologías permitieron identificar de manera estructurada los sistemas y componentes que presentan mayor impacto en la disponibilidad operacional, los costos de reparación y la seguridad de los operadores y pasajeros.

El análisis de criticidad evidenció que los sistemas de **tracción eléctrica, almacenamiento de energía (batería y BMS), inversor de potencia, sistema neumático de frenos y dirección** concentran el mayor riesgo operacional, tanto por su función dentro del activo como por las consecuencias asociadas a su falla. Este resultado justificó la necesidad de priorizar estos sistemas mediante estrategias preventivas y predictivas más rigurosas, tales como inspecciones visuales sistemáticas, termografía infrarroja, monitoreo de variables eléctricas y controles periódicos por kilometraje y tiempo.

Asimismo, se determinó que el plan de mantenimiento entregado por el fabricante resulta insuficiente para las condiciones reales de operación, al carecer de inspecciones diarias estructuradas, indicadores de desempeño (MTBF, MTTR, disponibilidad) y una adecuada adaptación al contexto operacional local. Frente a ello, el plan propuesto en esta investigación incorpora rutinas diarias, semanales, mensuales y por kilometraje, alineadas con los principios del RCM y orientadas a prevenir fallas funcionales antes de que impacten la operación.

El análisis económico asociado a la implementación del plan demuestra que, si bien existen costos iniciales relacionados con capacitación, herramientas de diagnóstico y aumento de actividades preventivas, estos se ven compensados por la reducción de fallas mayores, la disminución de tiempos fuera de servicio y la mitigación de riesgos asociados a reparaciones correctivas de alto costo. En este sentido, el plan de mantenimiento propuesto no debe ser entendido como un gasto, sino como una **inversión estratégica en la gestión del activo**, enfocada en maximizar la confiabilidad, la seguridad y la vida útil del bus eléctrico.

En conclusión, el desarrollo de un plan de mantenimiento centrado en la confiabilidad para buses eléctricos Zhongtong permite mejorar significativamente la disponibilidad operacional del sistema de transporte, fortalecer la seguridad y optimizar los recursos técnicos y económicos de la organización. Este trabajo entrega una base técnica sólida que puede ser replicada o ajustada a otras flotas de buses eléctricos, contribuyendo al fortalecimiento de la electromovilidad y a una gestión de mantenimiento moderna y sostenible en el tiempo.

BIBLIOGRAFÍA

[1] ZhongTong Bus Holding Co., Ltd. Manual técnico bus eléctrico ZhongTong modelo LCK6850EVG. China, abril de 2021.

[2] Pistarelli, C. Mantenimiento industrial: gestión estratégica y confiabilidad. Editorial Técnica Industrial, Buenos Aires, 2010.

[3] Moubray, J. Reliability-Centered Maintenance. Butterworth-Heinemann, Oxford, 1997.

[4] SAE International. SAE JA1011: Evaluation Criteria for Reliability-Centered Maintenance (RCM) Processes. SAE International, 2009.

[5] SAE International. SAE JA1012: A Guide to the Reliability-Centered Maintenance (RCM) Standard. SAE International, 2009.

[6] Ishikawa, K. Guide to Quality Control. Asian Productivity Organization, Tokio, 1986.

[7] Stamatis, D. H. Failure Mode and Effect Analysis: FMEA from Theory to Execution. ASQ Quality Press, Milwaukee, 2003.

[8] Ministerio de Energía de Chile. Estrategia Nacional de Electromovilidad. Gobierno de Chile, Santiago, 2017.

Disponible en: <https://energia.gob.cl/electromovilidad>

Consulta: 2025.

[9] Larez, A. ¿Por qué podrían estar fallando tus planes de mantenimiento industrial? E-Nova Levante.

Disponible en: <https://enovelevante.es/mantenimiento-industrial-por-que-podrian-estar-fallando-tus-planes-de-mantenimiento-industrial/>

Consulta: 2025.

[10] Centro de Innovación Tecnológica – Universidad Peruana de Ciencias Aplicadas (CIT-UPC). Tofman: hacia el futuro de los sistemas de fabricación inteligentes.

Disponible en: <https://cit.upc.edu/es/portfolio-item/tofman-hacia-el-futuro-de-los-sistemas-de-fabricacion-inteligentes/>

Consulta: 2025.

[11] Mendizábal, Á. Cómo implantar un programa de mantenimiento preventivo.

Disponible en: <https://angelmendizabal.com/mantenimiento/como-implantar-un-programa-de-mantenimiento-preventivo/>

Consulta: 2025.

[12] Pirani Risk. Diagrama de Ishikawa: relaciones entre causas.

Disponible en: <https://www.piranirisk.com/hs-fs/hubfs/diagrama-de-ishikawa-relaciones-entre-causas.webp>

Consulta: 2025.

[13] ManWinWin. FMEA – Failure Mode and Effects Analysis.

Disponible en: <https://www.manwinwin.com/wp-content/uploads/2024/03/FMEA.jpg>

Consulta: 2025.