



**UNIVERSIDAD
DE ANTIOQUIA**

**Implementación de RCM a las Estaciones de Carga de Vehículos Eléctricos (EVSE) marca
StarCharge® para la empresa Vomgroup SAS en su operación en Antioquia**

Luis Guillermo Rendón Jaramillo

Trabajo de grado presentado para optar al título de *Ingeniero Mecánico*

Asesor

Sebastián López Gómez, Magíster (MSc) en Ingeniería

Universidad de Antioquia
Facultad de Ingeniería
Ingeniería Mecánica
Medellín, Antioquia, Colombia
2025



- Referencia [1] L. G. Rendón Jaramillo, “Implementación de RCM a las Estaciones de Carga de Vehículos Eléctricos (EVSE) marca Starcharge® para la empresa Vomgroup SAS en su operación en Antioquia”, Trabajo de grado profesional, *Ingeniería Mecánica*, Universidad de Antioquia, Medellín, Antioquia, Colombia, 2025.
- Estilo IEEE (2020)



Centro de documentación de ingeniería (CENDOI)

Repositorio Institucional: <http://bibliotecadigital.udea.edu.co>

Universidad de Antioquia - www.udea.edu.co

El contenido de esta obra corresponde al derecho de expresión de los autores y no compromete el pensamiento institucional de la Universidad de Antioquia ni desata su responsabilidad frente a terceros. Los autores asumen la responsabilidad por los derechos de autor y conexos.

TABLA DE CONTENIDO

RESUMEN	12
ABSTRACT.....	13
I. INTRODUCCIÓN	14
II. OBJETIVOS.....	15
A. Objetivo general.....	15
B. Objetivos específicos	15
III. MARCO TEÓRICO.....	16
A. Vehículos Eléctricos.....	16
1) Historia y evolución de los vehículos eléctricos y su infraestructura de carga.....	16
2) Línea de tiempo de hitos clave	17
3) Clasificación de los cargadores eléctricos para vehículos:	18
a) Según el nivel de carga	18
b) Según el tipo de conector	19
c) Según la disponibilidad o uso	20
4) El proceso de carga de un Vehículo Eléctrico (VE).....	20
a) Conexión física y comunicación inicial.....	20
b) Clasificación por niveles y modos de carga.....	21
c) Conversión de energía y entrega de carga	21
d) Comunicación de control durante la carga	21
e) Seguridad eléctrica y desconexión	21
f) Registro del consumo y facturación.....	22
5) Clasificación general de subsistemas	22
B. Introducción al mantenimiento	22

1) Mantenimiento correctivo	23
2) Mantenimiento preventivo	23
3) Mantenimiento predictivo	23
4) Mantenimiento proactivo	23
C. Mantenimiento centrado en confiabilidad (RCM)	23
1) Historia del RCM	24
2) Expansión y Regulación del RCM en la Industria	24
3) Principios fundamentales del RCM	26
a) Preservación de Funciones	26
b) Identificación de Modos de Falla.....	26
c) Priorización Basada en Consecuencias.....	26
d) Selección de Tareas de Mantenimiento	27
4) Metodología del Mantenimiento Centrado en Confiabilidad (RCM)	27
a) Identificación de funciones y estándares de desempeño.....	27
b) Determinación de fallas funcionales	28
c) Análisis de modos de falla.....	28
d) Evaluación de consecuencias de falla	28
e) Selección de tareas proactivas	28
f) Acciones por defecto (si no hay tarea viable).....	29
5) Identificación del Contexto Operacional en el Mantenimiento Centrado en Confiabilidad (RCM).....	30
a) Observación directa del entorno físico	31
b) Revisión de datos operacionales históricos	31
c) Entrevistas a operadores y técnicos de planta	31
d) Revisión de la documentación técnica del fabricante.....	32

e) Taxonomía	32
6) Análisis de Modos y Efectos de Falla (FMEA) en el RCM.....	33
a) Modo de falla	33
b) Efecto de falla	33
7) Etapas del FMEA en RCM.....	33
a) Descomposición funcional del sistema.....	33
C) Elaboración de un plan de mantenimiento y sus seis componentes fundamentales	35
1) Contexto operacional.....	36
2) Funciones y estándares de desempeño	36
3) Análisis de modos de falla y sus causas	36
4) Evaluación de consecuencias y criticidad.....	36
5) Selección de tareas de mantenimiento.....	36
6) Implementación, monitoreo y mejora continua.....	36
D) Aplicación del RCM en Estaciones de Carga para Vehículos Eléctricos (EVSE).....	37
1)El RETIE (Reglamento Técnico de Instalaciones Eléctricas).....	37
a) Instalación adecuada de los sistemas eléctricos	37
b) Mantenimiento preventivo y predictivo	37
c) Revisión y auditoría periódica	38
d) Protección contra sobrecargas y cortocircuitos.....	38
e) Formación y capacitación continua del personal.....	38
E. International Organization for Standardization (ISO). ISO 9001:2015	38
1) Mejora Continua.....	39
2) Estructuración y documentación de procesos	39
3) Gestión del riesgo y oportunidades.....	39
4) Cultura de calidad y compromiso organizacional	39

IV. METODOLOGÍA.....	40
A. Fase 1: Recolección y análisis de datos históricos.....	40
1) Identificación de estaciones de carga.....	40
2). Contexto de estaciones de carga.....	42
3) Registros de falla y mantenimientos.....	51
4) Conocimiento y experiencia técnica de operadores involucrados en el mantenimiento de los equipos.....	57
5) Revisión de normas aplicables.....	59
6) Taxonomía del EVSE STARCHARGE®.....	60
B. Fase 2: Análisis a equipos de alta criticidad (Matriz de Criticidad).....	61
1) Análisis a equipos de alta criticidad (Matriz de Criticidad).....	61
2) Definición de criterios de evaluación.....	61
3) Niveles de criticidad por criterio y consecuencia.....	65
4) Matriz de frecuencia.....	67
5) Matriz de riesgo y criticidad.....	68
a) Intervenciones por subsistemas.....	69
b) Matriz de criticidad por piezas.....	73
6) Prioridad de análisis.....	74
C. Fase 3: Análisis de Modos y Efectos de Falla (FMEA).....	75
1) Análisis FMEA.....	75
2) Identificación y evaluación de los posibles modos de falla y sus efectos en los equipos..	76
3) Definición de efectos de falla, consecuencias.....	80
D. Fase 4: Diseño de Estrategias de Mantenimiento.....	84
1) Propuestas de mantenimiento.....	87
E. Cronograma de actividades.....	91

F. Presupuesto estimado.....	91
V. RESULTADOS	92
VI. CONCLUSIONES.....	101
REFERENCIAS.....	103
ANEXOS.....	106

LISTA DE TABLAS

TABLA I LÍNEA DE TIEMPO.....	17
TABLA II CLASIFICACIÓN GENERAL DE SUBSISTEMAS EV	22
TABLA III. PRINCIPIOS DEL RCM EN NORMATIVA Y ESTÁNDARES	24
TABLA IV IDENTIFICACIÓN DE ESTACIONES DE CARGA.....	41
TABLA V CRONOGRAMA DE MANTENIMIENTO	52
TABLA VI. REGISTRO DE FALLAS AÑOS 2023 Y 2024.....	53
TABLA VII FALLAS EN LOS EV (2023-2024).....	61
TABLA VIII DEFINICIÓN DE CRITERIOS DE EVALUACIÓN	62
TABLA IX VALORES REGISTRADOS EN CRITERIOS DE EVALUACIÓN.....	63
TABLA X NIVELES DE CRITICIDAD.....	66
TABLA XI VALORES DE RIESGOS.....	67
TABLA XII LÍMITES DE FRECUENCIA	67
TABLA XIII MATRIZ DE FRECUENCIA.....	68
TABLA XIV MATRIZ DE RIESGO	68
TABLA XV AJUSTE DE MATRIZ DE RIESGOS.....	68
TABLA XVI FALLAS POR SUBSISTEMAS	69
TABLA XVII FRECUENCIAS POR SUBSISTEMAS.....	70
TABLA XVIII NIVEL DE FRECUENCIAS POR SUBSISTEMAS	70
TABLA XIX NIVEL DE FRECUENCIA POR PIEZAS O ESTÁNDAR DE COMUNICACIÓN	71
TABLA XX MATRIZ DE FRECUENCIA POR PIEZAS O ESTÁNDAR DE COMUNICACIÓN	72
TABLA XXI CRITICIDAD POR PIEZA O ESTÁNDAR DE COMUNICACIÓN	73
TABLA XXII RECORTE DE FUNCIONES DE COMPONENTES MANTENIBLES.....	76
TABLA XXIII RECORTE DE ANEXO 1; FMEA MP, MODOS DE FALLA	77
TABLA XXIV RECORTE ANEXO 1; FMEA MP, EFECTOS DE FALLA.....	81
TABLA XXV RECORTE ANEXO 1; FMEA MP, CONSECUENCIAS DE FALLA	82
TABLA XXVI RECORTE ANEXO 1; FMEA MP, ACCIONES DE MTTO	84
TABLA XXVII. HERRAMIENTAS NECESARIAS PARA EL PLAN DE MTTO	85

TABLA XXVIII PROPUESTA DE NUEVO CRONOGRAMA DE MTTO	88
TABLA XXIX INSPECCIONES MENSUALES A EVSE STARCHARGE®.....	89
TABLA XXX CRONOGRAMA DE ACTIVIDADES	91
TABLA XXXI PROPUESTA DE MANTENIMIENTOS TRIMESTRALES STARCHARGE®	96
TABLA XXXII PROPUESTAS DE MTTOS ADICIONALES SEMESTRALES Y ANUALES STARCHARGE®	98

LISTA DE FIGURAS

Fig. 1. Principales conectores de carga para VE.....	20
Fig. 2. Principales conectores de carga para VE.....	¡Error! Marcador no definido.
Fig. 3. Definición del contexto operacional.....	30
Fig. 4. Taxonomía de equipos con sus niveles.....	32
Fig. 5. Proceso de un FMEA.....	35
Fig. 6. Modelos y ubicaciones geográficas en el departamento de Antioquia EVSE DCFC.....	41
Fig. 7. App SafetyCulture.....	51
Fig. 8. Plantilla de registro de fallas.....	53
Fig. 9. Configuración de módulos de potencia DC.....	57
Fig. 10. Taxonomía de EVSE STARCHARGE®.....	60
Fig. 11. Resultados fase 1.....	92
Fig. 12. Porcentajes evaluados de criterios de evaluación.....	93
Fig. 13. Resultados de criticidad de piezas.....	94
Fig. 14. Resultados cuantitativos del FMEA.....	95
Fig. 15. Equipos con necesidad de rediseño.....	99
Fig. 16. Propuesta de actividades al año para los equipos STARCHARGE®.....	100
Fig. 17. Número de actividades al año según el árbol lógico.....	100

SIGLAS, ACRÓNIMOS Y ABREVIATURAS

IEEE	Institute of Electrical and Electronics Engineers
RCM	Reliability Centered Maintenance
EVSE	Electric Vehicle Supply Equipment
EV	Electric Vehicle
DCFC	Direct Current Fast Charger
BMS	Battery Management System
CCS	Combined Charging System
SOC	State of Charge
FMEA	Failure Mode and Effects Analysis
UdeA	Universidad de Antioquia

RESUMEN

La Implementación del Mantenimiento Centrado en Confiabilidad (RCM) se adopta en la industria para maximizar la disponibilidad y la eficiencia operativa de los activos críticos, reduciendo al mismo tiempo los costos operativos y gestión de mantenimientos, esto se logra identificando y priorizando las fallas según su impacto en la operación asegurando que se realicen intervenciones preventivas de manera estratégica y rentable. Esta metodología realiza un análisis del activo y sus componentes por medio de una taxonomía, al categorizar los equipos según su función, ubicación y criticidad, evaluando los modos de falla de cada componente, para diseñar un plan de mantenimiento preventivo personalizado, con el objetivo de evitar la consecuencia crítica. Además de ofrecer una visión clara de los recursos necesarios para el mantenimiento, lo que permite optimizar el uso de repuestos. En este proyecto, se implementará el RCM en las estaciones de carga para vehículos eléctricos StarCharge® ubicadas en el departamento de Antioquia. Se espera que esta estrategia no solo mejore la disponibilidad de las estaciones, reduzca las fallas imprevistas y disminuya los costos de mantenimiento a largo plazo, sino que también fortalezca la gestión de activos y la competitividad de la organización en el sector.

Palabras clave — **Mantenimiento, RCM, gestión de activos, efecto falla.**

ABSTRACT

The implementation of Reliability-Centered Maintenance (RCM) is adopted in the industry to maximize the availability and operational efficiency of critical assets, while simultaneously reducing operating and maintenance management costs. This is achieved by identifying and prioritizing failures based on their impact on operations, ensuring that preventive interventions are carried out strategically and cost-effectively. This methodology performs an analysis of the asset and its components through a taxonomy, by categorizing equipment according to its function, location, and criticality. It evaluates the failure modes of each component in order to design a customized preventive maintenance plan aimed at avoiding critical consequences. Additionally, it provides a clear view of the resources needed for maintenance, which allows for the optimization of spare parts usage. In this project, RCM will be implemented in StarCharge® electric vehicle charging stations located in the department of Antioquia. This strategy is expected not only to improve station availability, reduce unexpected failures, and decrease long-term maintenance costs, but also to strengthen asset management and the organization's competitiveness in the sector.

Keywords —Maintenance, RCM, asset management, failure effect.

I. INTRODUCCIÓN

La eficiencia operativa y la confiabilidad de los equipos son pilares en la industria moderna. Un suministro energético eficiente y accesible para el transporte impacta directamente la competitividad económica de un país. En este contexto, el Mantenimiento Centrado en la Confiabilidad (RCM) se posiciona como una metodología para mantener el desempeño de los equipos de suministro de energía para vehículos eléctricos (*EVSE*). Esta metodología identifica y previene fallas potenciales, prioriza las funciones críticas de los activos y diseña estrategias de mantenimiento que garantizan su desempeño óptimo.

STAR CHARGE®, fundada en 2013, es una empresa global líder en el desarrollo y fabricación de soluciones innovadoras de carga para vehículos eléctricos. Con presencia internacional, su tecnología está acelerando la transición hacia un futuro sostenible en el transporte. En Colombia, ha contribuido al desarrollo de la infraestructura en alianza con empresas líderes en suministro energético, lo que ha generado la necesidad de personal calificado en mantenimiento y reparación de estos activos.

VOMGRUP S.A.S, empresa respaldada por STARCHARGE®, ofrece servicios de atención de fallas y mantenimiento preventivo y correctivo en las estaciones de carga del país. Actualmente, gestiona el seguimiento de los activos con *SafetyCulture*, un software para inspecciones y auditorías que, siendo esta una herramienta potente no es especializada para mantenimiento como lo puede ser un software especializado en RCM.

El objetivo de esta propuesta es implementar un plan de mantenimiento RCM para los equipos STAR CHARGE® en Antioquia, reduciendo fallas funcionales y maximizando su disponibilidad operativa. Para ello, se analizarán registros históricos de fallas mediante el método FMEA, se diseñará un plan de mantenimiento preventivo y predictivo, y se implementará un sistema de monitoreo continuo para evaluar la efectividad del plan.

II. OBJETIVOS

A. Objetivo general

Desarrollar un plan de mantenimiento bajo la metodología RCM, para los EVSE, públicos y privados, de 60 kw y 180 kw.

B. Objetivos específicos

- Describir contexto y situación actual de los EVSE, considerando aspectos de infraestructura, problemas comunes, frecuencia de carga y necesidad del cliente.
- Desarrollar taxonomía de los EVSE, con características técnicas, detallando sus componentes, clasificando su función y rol dentro de sus diferentes subsistemas.
- Realizar análisis FMEA, evaluar modos de falla potenciales de los componentes clave, identificar posibles efectos y priorizar acciones de mantenimiento preventivo.
- Definir actividades de mantenimiento preventivo y predictivo por medio de un árbol lógico de decisiones.

III. MARCO TEÓRICO

A. Vehículos Eléctricos

Un vehículo eléctrico (VE) según [1], es un medio de transporte impulsado por uno o más motores eléctricos en lugar de un motor de combustión interna. Estos motores utilizan energía almacenada en baterías recargables, generalmente de ion de litio, que se cargan mediante una red eléctrica externa. A diferencia de los vehículos convencionales, los VE no emiten gases contaminantes durante su operación, lo que los convierte en una alternativa más limpia y eficiente desde el punto de vista energético.

Los componentes principales de un VE incluyen el paquete de baterías, el controlador electrónico, el motor eléctrico y el sistema de carga. El controlador regula el flujo de energía entre la batería y el motor, respondiendo a las señales del conductor. Los sistemas de frenado regenerativo también permiten recuperar parte de la energía cinética durante la desaceleración. Además de su eficiencia, los VE presentan menores costos de operación y mantenimiento, ya que tienen menos piezas móviles. Sin embargo, su autonomía y tiempos de recarga aún representan desafíos para su adopción masiva. Los VE representan una convergencia de avances en electrónica de potencia, almacenamiento de energía y control inteligente del vehículo.

1) Historia y evolución de los vehículos eléctricos y su infraestructura de carga: La historia de los vehículos eléctricos (VE) se remonta al siglo XIX, cuando comenzaron los primeros intentos de electrificación del transporte. En 1832, el escocés Robert Anderson diseñó un carruaje impulsado por baterías no recargables, considerado uno de los primeros prototipos eléctricos [2]. Un avance determinante ocurrió en 1859, cuando el físico francés Gastón Planté desarrolló la batería recargable de plomo-ácido, base fundamental para los VE funcionales posteriores [3].

Hacia 1881, se presentó un triciclo eléctrico en París y, en 1890, William Morrison fabricó un automóvil eléctrico en Iowa que alcanzaba velocidades de hasta 23 km/h [3]. Para el año 1900, los VE alcanzaron gran popularidad, representando aproximadamente un tercio del mercado automotor en Estados Unidos, gracias a su operación silenciosa, fácil encendido y menor mantenimiento comparado con los vehículos de combustión interna [4]. No obstante, la mejora en la autonomía, disponibilidad de combustible y potencia de los motores de combustión provocaron

un declive rápido. En 1912, se registraron más de 33.000 VE en EE.UU., pero hacia 1920 prácticamente habían desaparecido [3].

Durante la crisis energética de los años 70 resurgió el interés en los VE. Un ejemplo de esta etapa fue el CitiCar, producido por Sebring-Vanguard, un microvehículo con una autonomía cercana a los 100 kilómetros **¡Error! No se encuentra el origen de la referencia.** Posteriormente, en la década de 1990, General Motors introdujo el EV1, considerado el primer eléctrico moderno producido en serie, impulsando avances en la electrónica automotriz y el diseño aerodinámico [5]. Ehsani, Gao y Emadi destacan que esta etapa marcó un cambio tecnológico clave en la arquitectura de los VE, con mejoras sustanciales en motores, sistemas de control y eficiencia energética [1].

En cuanto a la infraestructura de carga, los primeros intentos incluían conexiones básicas en el hogar. En 1904, Thomas Edison construyó una estación doméstica de carga en corriente continua (DC), visionando un sistema propio de abastecimiento energético [6]. En el siglo XXI, la infraestructura evolucionó hacia redes públicas de carga alterna (AC) y carga rápida DC. Un hito importante ocurrió en 2012, cuando Tesla lanzó su red de Supercharger, estaciones capaces de suministrar hasta 100 kW, facilitando la recarga en viajes largos [7]. Para 2021, los VE y su infraestructura habían alcanzado una expansión global sin precedentes

Hoy, los VE se consolidan como una alternativa sostenible, apoyados en políticas ambientales, innovación en baterías y redes de carga cada vez más eficientes y accesibles.

2) Línea de tiempo de hitos clave:

TABLA I
LÍNEA DE TIEMPO

Año	Evento/Hito	Referencia
1832	Robert Anderson desarrolló el primer carruaje eléctrico no recargable en Escocia.	[1]
1859	Gaston Planté inventó la batería recargable de plomo-ácido, clave para el desarrollo de los VE.	[2]
1881	Se presenta el primer triciclo eléctrico funcional en París.	[2]
1890	William Morrison construyó el primer coche eléctrico en EE. UU., con una velocidad de 23 km/h.	[2]

1900	Los VE representan cerca del 30 % del mercado automotor en EE.UU.	[3]
1904	Thomas Edison instala una estación doméstica de carga en corriente continua (DC).	[5]
1912	Se registran 33.842 vehículos eléctricos en Estados Unidos, el pico histórico de esa época.	[2]
1920	Declive casi total de los VE debido al auge de los motores de combustión interna.	[2]
1974	Lanzó el CityCar de Sebring-Vanguard durante la crisis energética; autonomía de 100 km.	[4]
1996	General Motors lanza el EV1, primer VE moderno producido en serie.	[4]
2010	Ehsani, Gao y Emadi publican obra fundamental sobre diseño moderno de VE y arquitectura electrónica.	[7]
2012	Tesla lanza la red de Superchargers, estaciones de carga rápida DC de hasta 100 kW.	[6]
2021	El Departamento de Energía de EE.UU. publica revisión histórica y estado actual del vehículo eléctrico.	[3]

3) *Clasificación de los cargadores eléctricos para vehículos:* La infraestructura de recarga para vehículos eléctricos (VE) se ha diversificado para cubrir diferentes necesidades de carga, tanto residenciales como comerciales o de alta demanda. Los cargadores se pueden clasificar según diversos criterios técnicos, entre ellos el nivel de carga, el tipo de corriente, la capacidad de potencia, el tipo de conector y su uso específico.

a) *Según el nivel de carga:* Los sistemas de carga para vehículos eléctricos (VE) se clasifican comúnmente en tres niveles (1, 2 y 3), en función del tipo de corriente utilizada, la potencia entregada, la velocidad de carga y su aplicación práctica. Esta clasificación permite identificar cuál cargador es más adecuado según el entorno, la infraestructura eléctrica disponible y el tipo de vehículo, según

- Nivel 1 – Carga lenta (AC, 120 V)

La carga de nivel 1 utiliza corriente alterna (AC) monofásica a 120 voltios, directamente desde un enchufe doméstico convencional. Ofrece una potencia entre 1.4 y 2.4 kW, lo que se traduce en una velocidad de carga de entre 6 y 8 kilómetros de autonomía por hora conectada. Es

ideal para vehículos pequeños o híbridos enchufables y es común en domicilios particulares debido a su bajo costo de instalación [3][7].

- Nivel 2 – Carga semi-rápida (AC, 208–240 V)

Los cargadores de nivel 2 también utilizan corriente alterna, pero a un voltaje superior (208 a 240 V), y entregan una potencia que puede variar entre 7.4 kW y 22 kW, permitiendo cargar hasta 100 km de autonomía por hora. Esta modalidad es ampliamente adoptada en entornos comerciales, residenciales multifamiliares y estaciones públicas, ya que ofrece un balance entre costo, velocidad de carga y accesibilidad [4][7].

- Nivel 3 – Carga rápida o carga en corriente continua (DC Fast Charging)

La carga de nivel 3 utiliza corriente continua (DC) y entrega potencias que oscilan entre 50 kW y más de 350 kW, permitiendo cargar el 80 % de la batería en 20 a 40 minutos. Este tipo de carga requiere infraestructura especializada, por lo que se encuentra en estaciones de servicio, autopistas o puntos de recarga rápida. Es fundamental para flotas comerciales y viajes de larga distancia. Dentro de esta categoría se incluyen estándares como CCS, CHAdeMO y el sistema propietario de Tesla [6][7].

b) Según el tipo de conector:

- Tipo 1 (SAE J1772): Estándar en Norteamérica para niveles 1 y 2. Compatible con la mayoría de los VE japoneses y estadounidenses.
- Tipo 2 (Mennekes): Estándar europeo, admite carga monofásica y trifásica. Utilizado por fabricantes como BMW, Volkswagen, y Renault [7].
- CCS (Combined Charging System): Combina conector tipo 1 o 2 con pines adicionales para carga DC. Es el estándar dominante en Europa y América [6].
- CHAdeMO: Estándar japonés para carga rápida DC. Usado por Nissan, Mitsubishi y otros modelos asiáticos [7].

Area	U.S.A.	Europe	China	Japan	
Standard	SAE	IEC	GB/T	CHAdeMO	Tesla
AC	 J1772	 62196-2	 20234.2	 J1772	
DC	 J1772	 62196-3	 20234.3	 CHAdeMO	 Tesla

Fig. 1. Principales conectores de carga para VE

Nota. Fuente https://www.researchgate.net/figure/Main-EV-charging-connectors-97-98_fig1_343252117.

c) Según la disponibilidad o uso:

- Domésticos: Nivel 1 o 2. Bajo costo y fácil instalación. Apropriados para uso nocturno o carga prolongada [3].
- Públicos: Nivel 2 o 3. Instalados en centros urbanos, estaciones de servicio, autopistas.
- Comerciales/Industriales: Carga rápida para flotas, autobuses eléctricos o camiones de carga [4][7].

4) El proceso de carga de un Vehículo Eléctrico (VE)

a) *Conexión física y comunicación inicial*: El proceso comienza con la conexión física del conector del EVSE al vehículo eléctrico (VE). En esta etapa, se activan los pines de control según la norma SAE J1772 o IEC 61851-1. El pin Proximity Pilot (PP) detecta la inserción del conector y previene su extracción durante la carga, mientras que el pin Control Pilot (CP) establece la señal de comunicación entre el VE y el cargador [9].

Esta señal de control permite una primera negociación de parámetros de carga, como el límite de corriente permitido, y prepara el sistema para iniciar el flujo energético. Las primeras versiones de esta comunicación eran analógicas (pulsos PWM), pero actualmente, los estándares modernos, como ISO 15118, introducen comunicación digital bidireccional segura [10].

b) Clasificación por niveles y modos de carga: La carga de un vehículo eléctrico se puede clasificar según normas como la IEC 61851-1 y la SAE J1772 en diferentes niveles o modos, dependiendo del entorno, voltaje, corriente y tiempo requerido [9]; [11]. La elección del modo depende del tipo de estación de carga (residencial, pública o comercial) y de la capacidad del cargador del vehículo, que puede estar integrado (on-board) o externo (off-board) [12].

c) Conversión de energía y entrega de carga: En la carga en corriente alterna (AC), el cargador a bordo (OBC) del vehículo convierte la energía AC en corriente continua (DC) para alimentar la batería. En cambio, en carga rápida en DC, esta conversión la realiza el propio EVSE, lo que reduce el tiempo de carga significativamente [13].

El BMS (Battery Management System) del vehículo regula el flujo de carga, monitorea el estado de carga (SOC), la temperatura de la batería, la tensión de cada celda y envía señales de control al EVSE en caso de anomalías [14].

d) Comunicación de control durante la carga: Durante todo el proceso, existe una comunicación continua entre el VE y el EVSE. La norma ISO 15118 regula esta comunicación y permite funcionalidades como:

- Plug & Charge (autenticación automática)
- Carga inteligente
- Carga bidireccional (V2G - Vehicle to Grid)
- Facturación automática

El protocolo OCPP (Open Charge Point Protocol) también se emplea para la comunicación entre el EVSE y los sistemas de gestión central de los operadores de red o proveedores de energía [15].

e) Seguridad eléctrica y desconexión: Las normas IEC 61851 y UL 2231 requieren que el EVSE incluya protecciones eléctricas, tales como:

- Interruptores diferenciales (RCD)
- Detección de fallas a tierra
- Desconexión automática ante sobrecalentamiento o cortocircuito

Además, el conector permanece bloqueado físicamente durante la carga, y solo se libera cuando el BMS indica que la carga ha terminado [10][14].

f) Registro del consumo y facturación: Al finalizar el proceso, el sistema registra la energía consumida (en kWh), los tiempos de conexión y los datos del usuario si está autenticado. Estos datos son esenciales en entornos públicos o comerciales, donde se genera facturación mediante software de gestión [12].

La normativa ISO 15118-20 contempla ya estos servicios, incluyendo la interoperabilidad entre distintos fabricantes y redes de carga [15].

5) Clasificación general de subsistemas:

TABLA II
CLASIFICACIÓN GENERAL DE SUBSISTEMAS EV

N	Subsistema
1	Alimentación AC
2	Electrónica de Potencia (DC)
3	Sistema de Enfriamiento
4	Cables y Conectores de Carga
5	Gabinete Mecánico
6	Electrónica de Control
7	Interfaz de Usuario (HMI)
8	Comunicación y Red
9	Seguridad / Protecciones
10	Medición (Contadores)
11	Software / Firmware

B. Introducción al mantenimiento

El mantenimiento es un conjunto de actividades técnicas y administrativas destinadas a preservar la funcionalidad y confiabilidad de los activos físicos en una organización. Según la

norma UNE-EN 13306:2018, el mantenimiento se define como la combinación de todas las acciones técnicas, administrativas y de gestión durante el ciclo de vida de un activo con el objetivo de mantenerlo en un estado en el que pueda desempeñar la función requerida [16]. Esta norma clasifica el mantenimiento en distintas categorías según su enfoque y aplicación:

1) *Mantenimiento correctivo*: Este tipo de mantenimiento se lleva a cabo cuando un equipo ha fallado y requiere reparación para restablecer su operatividad. Se divide en:

- *Correctivo no planificado*: Se realiza sin previsión previa cuando ocurre una falla inesperada.
- *Correctivo planificado*: Se programa para minimizar el impacto de la falla en la operación.

2) *Mantenimiento preventivo*: Consiste en intervenciones programadas para reducir la probabilidad de fallas en los equipos. Se clasifica en:

- *Mantenimiento sistemático*: Se realiza en intervalos fijos de tiempo o de uso.
- *Mantenimiento basado en condición*: Se ejecuta cuando los parámetros de operación del equipo indican un posible fallo inminente.

3) *Mantenimiento predictivo*: Este enfoque se basa en el monitoreo continuo del estado de los equipos mediante tecnologías como análisis de vibraciones, termografía o ultrasonido, permitiendo detectar fallas antes de que ocurran y optimizar los recursos de mantenimiento.

4) *Mantenimiento proactivo*: Busca eliminar las causas raíz de las fallas mediante el rediseño de componentes, mejoras en la lubricación o eliminación de fuentes de contaminación. Es una estrategia avanzada que complementa el mantenimiento predictivo.

C. Mantenimiento centrado en confiabilidad (RCM)

El Mantenimiento Centrado en la Confiabilidad (RCM, por sus siglas en inglés) es una metodología sistemática que busca garantizar que los sistemas continúen operando conforme a las necesidades de los usuarios en su contexto operativo específico.

1) *Historia del RCM:* A mediados del siglo XX, con el auge de la aviación comercial y la industria militar, se evidenció que los métodos tradicionales de mantenimiento preventivo basados en el tiempo no eran suficientes para garantizar la seguridad y disponibilidad de los equipos. Fue en este contexto donde nació el Mantenimiento Centrado en Confiabilidad (RCM, Reliability-Centered Maintenance), desarrollado por la industria aeronáutica como respuesta a la necesidad de mejorar la confiabilidad y reducir costos operativos [17].

En la década de 1960, la Federal Aviation Administration (FAA), junto con aerolíneas como United Airlines y Boeing, inició un estudio exhaustivo sobre los métodos de mantenimiento aplicados a las aeronaves. Durante estos estudios se descubrió que muchas fallas no estaban directamente relacionadas con el tiempo de operación, lo que contradecía la creencia generalizada de que los componentes debían ser reemplazados periódicamente para evitar fallas catastróficas [18].

Este hallazgo fue crucial, ya que demostró que el mantenimiento basado únicamente en intervalos de tiempo era ineficiente y costoso. Como resultado, Stan Nowlan y Howard Heap, en 1978, publicaron el documento Reliability-Centered Maintenance, en el cual establecieron los principios fundamentales de lo que hoy se conoce como RCM [19]. En este informe, se planteó que el mantenimiento debía centrarse en la confiabilidad del sistema en lugar de solo en la vida útil de los componentes individuales.

2) *Expansión y Regulación del RCM en la Industria:* A partir de la década de 1980, varias organizaciones comenzaron a formalizar los principios del RCM en normativas y estándares. Entre las más importantes se encuentran en la siguiente tabla.

TABLA III.
PRINCIPIOS DEL RCM EN NORMATIVA Y ESTÁNDARES

Cita	Definición
Referencia [20]	<p>El proceso RCM se estructura en torno a siete preguntas clave que abordan las funciones del activo, los modos de falla potenciales, las causas y consecuencias de dichas fallas, y las tareas de</p> <ol style="list-style-type: none"> 1. ¿Cuáles son las funciones y estándares de desempeño del activo en su contexto operacional? 2. ¿De qué maneras puede fallar en cumplir su función? 3. ¿Qué causa cada una de esas fallas funcionales?

<p>SAE JA1011 (1999)</p>	<p>mantenimiento apropiadas para prevenirlas.</p>	<p>4. ¿Qué sucede cuando ocurre cada falla? 5. ¿Cómo afecta cada falla a la operación? 6. ¿Qué puede hacerse para predecir o prevenir la falla? 7. ¿Qué debe hacerse si no se puede encontrar una tarea adecuada de mantenimiento?</p>
<p>SAE JA1012 (1999)</p>	<p>[21] Establece directrices para el Mantenimiento Centrado en Confiabilidad (RCM), un enfoque que promueve la gestión proactiva y sistemática de activos con el objetivo de asegurar su confiabilidad. Esta norma resalta la importancia de identificar modos de falla y realizar análisis de confiabilidad enfocados en el mantenimiento, así como evaluar los efectos de las fallas (FMEA)(SAE, 1999).</p>	<p>- Define cuándo y cómo aplicar el RCM clásico o simplificado. - Explica cómo seleccionar los activos críticos que requieren análisis RCM. - Detalla los criterios para establecer tareas de mantenimiento proactivo (preventivo, predictivo o rediseño). - Proporciona ejemplos de aplicación en sectores como manufactura, energía y transporte.</p>
<p>ISO 55000 (2014)</p>	<p>[22] Establece principios para la gestión de activos, alineados con el enfoque RCM.</p>	<p>1. Valor: La gestión de activos debe aportar valor a la organización. 2. Alineación: Debe estar alineada con los objetivos estratégicos de la empresa. 3. Liderazgo: Requiere compromiso de la alta dirección. 4. Garantía de desempeño: Se debe evaluar continuamente el desempeño de los activos. 5. Toma de decisiones basada en riesgos: Identificación y mitigación de riesgos en la gestión de activos.</p>
<p>IEC 60300-3-11</p>	<p>[23] Proporciona directrices para la implementación del RCM en sistemas industriales y eléctricos.</p>	<p>- Proporciona un marco metodológico para la aplicación del RCM en sistemas eléctricos e industriales. - Define criterios para evaluar la criticidad de los activos y determinar estrategias de mantenimiento. - Integra herramientas como el Análisis de Modos de Falla y Efectos (FMEA) y el Análisis de Causa Raíz (RCA). - Optimiza la disponibilidad y seguridad operativa de los sistemas industriales.</p>
<p>ISO 14224 (2016)</p>	<p>[24] Establece una metodología estandarizada para la recolección y el intercambio de datos de confiabilidad y mantenimiento en</p>	<p>- Define taxonomías de equipos, subsistemas y modos de falla, lo que facilita clasificar activos de forma uniforme. - estandariza cómo se registran los datos de fallas.</p>

la industria de petróleo, gas natural y, por extensión, en sistemas eléctricos y electrónicos.	- Nutre directamente el análisis RCM, ayudando a priorizar tareas preventivas, predictivas o de rediseño. - Permite determinar si la falla es detectable, si genera consecuencias críticas, y cuál es la estrategia más costo-efectiva.
--	--

3) Principios fundamentales del RCM:

a) *Preservación de Funciones*: El RCM parte de la premisa de que todo equipo tiene funciones específicas que debe mantener para cumplir con las necesidades operativas y de seguridad. “La falta de una función” —es decir, la incapacidad del activo para desempeñarse según el diseño— se define como una falla. Por ello, el primer paso es identificar y documentar cada función crítica del sistema, incluyendo las condiciones normales de operación y los límites de desempeño aceptables. Este enfoque asegura que todas las actividades de mantenimiento estén orientadas a proteger lo que el activo hace en lugar de centrarse únicamente en las piezas [25].

b) *Identificación de Modos de Falla*: Una vez establecidas las funciones, el RCM requiere determinar todos los modos de falla que puedan comprometer cada función identificada. Un modo de falla es la manera específica en que ocurre la pérdida de función. Este análisis utiliza técnicas de FMEA (Failure Modes and Effects Analysis) para mapear cada componente, describir su modo de falla y asociar las causas subyacentes —por ejemplo, desgaste mecánico, corrosión, fatiga— y sus mecanismos de generación [25]. De este modo, se obtiene un panorama completo de cómo, cuándo y por qué puede fallar cada parte.

c) *Priorización Basada en Consecuencias*: No todos los modos de falla tienen el mismo impacto. El RCM clasifica las consecuencias asociadas a cada modo de falla en términos de seguridad, medio ambiente, operación y costes económicos [25]. A partir de este análisis, se establece una prioridad de intervención:

- Fallas que pongan en riesgo la integridad o el entorno (alto riesgo de seguridad/ambiental) reciben máxima prioridad.
- Modos de falla que interrumpan la producción o el servicio pasan a segundo nivel.

- Aquellos que solo acarrearán costes de reparación o repuesto, sin afectación crítica, quedan en un nivel inferior.

Este orden garantiza que los recursos de mantenimiento se asignen primero a las áreas de mayor impacto potencial

d) Selección de Tareas de Mantenimiento: Finalmente, para cada modo de falla priorizado, se elige la tarea de mantenimiento más adecuada, aplicando criterios de factibilidad técnica y justificación económica [25]. Las opciones incluyen:

- **Restauración programada** (reemplazo o reparación antes de la falla prevista).
- **Mantenimiento basado en condición** (monitoreo de parámetros críticos y actuación al detectar degradación).
- **Failure-finding** (inspección o prueba periódica para descubrir fallas ocultas en sistemas de reserva).

4) Metodología del Mantenimiento Centrado en Confiabilidad (RCM): El Mantenimiento Centrado en Confiabilidad es una metodología sistemática cuyo objetivo es garantizar que los sistemas físicos continúen desempeñando sus funciones en su contexto operativo actual. Esta metodología se aplica para desarrollar estrategias de mantenimiento seguras, rentables y técnicamente efectivas [25][26].

La metodología del RCM se puede estructurar en siete pasos fundamentales, que abarcan desde la identificación de funciones hasta la toma de decisiones sobre tareas preventivas, predictivas y correctivas.

- a) Identificación de funciones y estándares de desempeño:* Todo proceso de RCM comienza con una clara definición de las funciones del sistema o componente en su contexto actual de operación. Esto incluye tanto funciones principales (lo que el sistema debe hacer) como funciones secundarias (seguridad, confort, eficiencia) [25]; [26], complementa que es necesario establecer los estándares de rendimiento esperados: capacidad, velocidad, eficiencia o precisión, así como los límites operativos aceptables.

b) Determinación de fallas funcionales: En este paso se identifican todas las formas en que un equipo puede dejar de cumplir una función, lo que se conoce como falla funcional. Esta definición va más allá de una rotura física e incluye degradaciones, errores intermitentes o condiciones fuera de especificación [25][26], añade que aquí también se deben considerar fallas que aún no causan paro, pero que impactan la calidad o el rendimiento del sistema.

c) Análisis de modos de falla: Los modos de falla son las causas físicas o mecánicas específicas por las que se presenta una falla funcional (p. ej., corrosión, fatiga, desgaste). El RCM requiere listar cada modo posible por función y componente [25][26], recomienda el uso de herramientas como FMEA (Análisis de Modos y Efectos de Falla) o diagramas causa-efecto para visualizar estos escenarios y mejorar su detección.

d) Evaluación de consecuencias de falla: El análisis de consecuencias permite priorizar los modos de falla en función del impacto que tendrían sobre la seguridad, el medio ambiente, la producción o los costos [25][26] destaca que esta etapa ayuda a enfocar los recursos en aquellas fallas que tienen consecuencias inaceptables. Las fallas se clasifican típicamente en cuatro tipos:

- Falla con consecuencias ocultas.
- Falla con consecuencias operativas.
- Falla con consecuencias no operativas.
- Falla con consecuencias de seguridad o ambientales.

e) Selección de tareas proactivas: Para cada modo de falla con consecuencias significativas, se determina si es viable aplicar una tarea de mantenimiento proactiva (preventiva o predictiva) [25][26] sugiere seguir tres criterios clave:

- Factibilidad técnica** (¿puede la tarea prevenir la falla?).
- Eficiencia económica** (¿es menos costosa que las consecuencias de la falla?).
- Disponibilidad de recursos y repuestos.**

Las tareas posibles incluyen:

- Reemplazo programado.
- Reacondicionamiento.
- Inspección basada en condición.

- Tareas de *failure finding* para fallas ocultas.

f) Acciones por defecto (si no hay tarea viable): Si no se puede aplicar una tarea efectiva, el RCM prescribe acciones por defecto:

iv) Monitoreo de desempeño.

v) Aceptación del riesgo con estrategias de mitigación [25][26] enfatiza que aceptar una falla no debe ser una omisión, sino una decisión informada que debe registrarse y justificarse técnicamente.

g) Desarrollo del plan de mantenimiento y revisión continua: Finalmente, se consolidan las decisiones anteriores en un programa estructurado de mantenimiento. Este programa debe incluir frecuencia, responsables, documentación técnica y criterios de revisión. Tanto [25][26], coinciden en que el RCM es un proceso vivo, por lo que el plan debe revisarse periódicamente en función de datos operativos, fallas reales, auditorías internas y análisis de desempeño.

5) *Identificación del Contexto Operacional en el Mantenimiento Centrado en Confiabilidad (RCM)*: La identificación del contexto operacional es una etapa crítica en la metodología RCM. No basta con conocer qué función debe cumplir un activo; también es imprescindible saber en qué condiciones lo hace, quién lo opera, con qué frecuencia, y cuál es el entorno que lo rodea. Esta información permite que el análisis de modos de falla y la selección de tareas se realicen de forma precisa, priorizando la confiabilidad en función de las necesidades reales de operación. Tal como señalan [25], el éxito de cualquier estrategia de mantenimiento comienza con comprender profundamente el entorno operativo del equipo. El contexto operacional se refiere al ambiente físico, técnico y funcional en el que opera un activo esta información estaría agrupada en la siguiente figura.

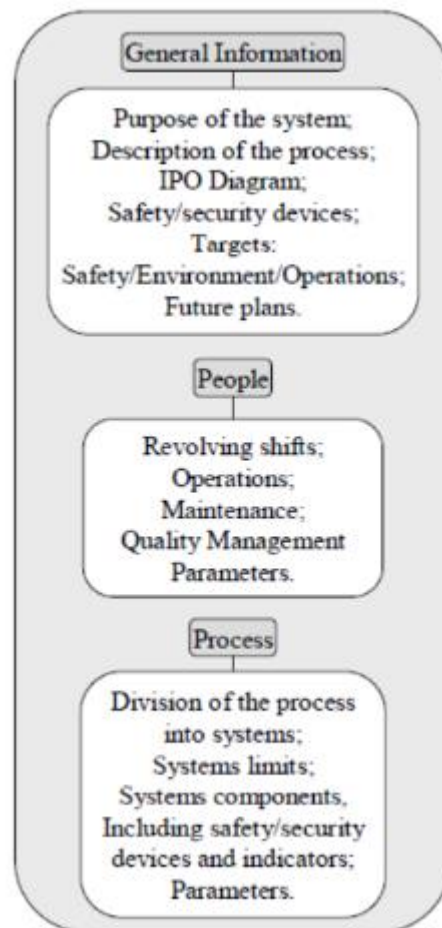


Fig. 2. Definición del contexto operacional

Nota. Fuente Moubray, 1997.

Según estas definiciones podemos definir:

a) *Observación directa del entorno físico*: Este método consiste en realizar inspecciones in situ para evaluar las condiciones ambientales y operacionales reales a las que está expuesto el equipo o sistema. [25, P. 24–25]. Señala que observar directamente el entorno permite identificar factores como polvo, humedad, vibración, temperaturas extremas, agentes corrosivos o acceso restringido, los cuales influyen de manera decisiva en la tasa de fallas y en la selección de tareas de mantenimiento. [26, P. 42] Refuerza esta idea al afirmar que el análisis del entorno permite adaptar los programas de mantenimiento a situaciones operativas específicas que los manuales del fabricante no contemplan, como ciclos de trabajo irregulares o condiciones de sobrecarga. La observación directa es también útil para detectar fallas latentes o riesgos operacionales que no están documentados.

b) *Revisión de datos operacionales históricos*: Este segundo método implica analizar registros previos de operación, mantenimiento y fallas del equipo. La historia de eventos reales ofrece una visión del comportamiento del sistema bajo determinadas condiciones. Los datos históricos permiten descubrir patrones de falla, ciclos de operación crítica y momentos de alta demanda que influyen directamente en la confiabilidad del equipo [25]. Por su parte, [26] considera que los datos históricos permiten calcular métricas clave como el MTBF (tiempo medio entre fallas) y la disponibilidad operativa.

c) *Entrevistas a operadores y técnicos de planta*: La consulta directa con el personal que interactúa diariamente con el equipo es una buena fuente de información contextual. Resalta que los operadores y técnicos suelen conocer de primera mano condiciones de uso inusuales, ajustes realizados informalmente, fallas recurrentes o eventos no registrados formalmente [25]. Estas entrevistas permiten recopilar conocimiento que no está disponible en manuales ni sistemas informáticos, como estrategias de operación no estándar, procedimientos de arranque/parada particulares o limitaciones logísticas [26].

d) *Revisión de la documentación técnica del fabricante:* La información provista por el fabricante (manuales, especificaciones, instrucciones de instalación y mantenimiento) constituye la línea base sobre la cual se evalúa el desempeño esperado del equipo. Aclara, sin embargo, que esta documentación se basa en condiciones ideales de operación, y por tanto debe ser contrastada y ajustada con base en la realidad del sitio [25]. Recomienda utilizar esta documentación como referencia para definir los parámetros operativos nominales, rangos tolerables y ciclos de mantenimiento estándar, pero advierte que no debe aplicarse de forma mecánica ni uniforme [26].

e) *Taxonomía:* Permite clasificar y estructurar los activos físicos de una organización de manera jerárquica, clara y funcional, debe permitir una comprensión integral del contexto operativo, la función de cada activo y su criticidad dentro del sistema, establecer categorías funcionales claras (como sistemas, subsistemas y componentes), como se puede apreciar en la figura 3, lo que facilita la identificación de fallas funcionales y modos de falla específicos, base del análisis RCM.

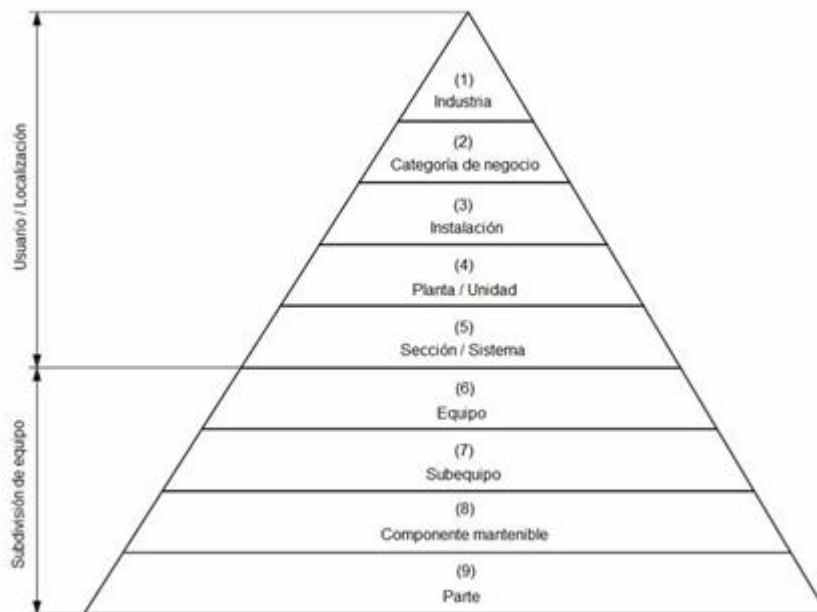


Fig. 3. Taxonomía de equipos con sus niveles

Nota. Fuente <https://www.iso.org/standard/64076.html>

La taxonomía es un lenguaje común para la clasificación de activos, que asegura consistencia en la gestión de datos de confiabilidad y mantenimiento en sectores industriales [24].

6) *Análisis de Modos y Efectos de Falla (FMEA) en el RCM*: El FMEA es una herramienta en el RCM, ya que permite identificar y clasificar las posibles fallas funcionales de un sistema, sus causas técnicas y las consecuencias asociadas. El FMEA no solo sirve para listar fallas, sino que constituye un puente entre el contexto operacional y la definición de estrategias de mantenimiento adecuadas [25][26], las siete preguntas del RCM se plantean y desarrollan principalmente durante la etapa del Análisis de Modos de Falla (FMEA), al igual que se puede observar en la figura 4.

a) *Modo de falla*: Un modo de falla es “la manera específica en que se pierde una función” [25, p. 45]. No necesariamente implica rotura total, sino cualquier condición que impida el desempeño esperado: variaciones en presión, pérdida de velocidad, errores intermitentes, ruidos anómalos, entre otros.

b) *Efecto de falla*: El efecto de falla describe lo que ocurre como consecuencia directa del modo de falla. Esto puede incluir:

- Pérdida de producción.
- Riesgos para la seguridad o el medio ambiente.
- Daños en otros componentes.
- Afectación de calidad.

7) *Etapas del FMEA en RCM*: Coinciden en que el FMEA dentro del RCM sigue una lógica estructurada que incluye las siguientes etapas [25][26].

a) *Descomposición funcional del sistema*: Antes de identificar fallas, se realiza una descomposición jerárquica del sistema en sus funciones clave. Esta estructura funcional permite vincular modos de falla a funciones específicas.

a. Identificación de modos de falla por función

Cada función se analiza para identificar las distintas formas en que puede dejar de cumplirse. Aquí se abordan las primeras dos preguntas del RCM:

1. ¿Cuáles son las funciones del activo en su contexto operativo?
2. ¿De qué maneras puede fallar en cumplir sus funciones (fallas funcionales)?

b. Determinación de causas técnicas

Se detallan las causas técnicas probables de cada modo de falla, como desgaste por fricción, sobrecalentamiento, contaminación, desalineación, errores humanos, etc. Esta etapa es utilizada para orientar la selección de tareas de mantenimiento. Aquí se aborda la tercera pregunta del RCM.

3. ¿Qué causa cada falla funcional (modos de falla específicos)?

c. Evaluación de efectos y consecuencias

Se evalúa el impacto potencial de cada modo de falla en términos de:

- Seguridad de las personas.
- Riesgo ambiental
- Impacto en la operación.
- Costos asociados

Y se plantea las preguntas 4,5 y 6 clave. Aquí se responden tres preguntas clave:

4. ¿Qué sucede cuando ocurre cada falla?
5. ¿Importa si ocurre la falla?
6. ¿Cómo afecta esta falla la operación, la seguridad o el ambiente?

d. Registro estructurado

Toda la información se documenta en una tabla o matriz FMEA, aplicación del árbol lógico del RCM para definir las tareas adecuadas y se responde la séptima pregunta:

- Función.
- Modo de falla.
- Causa
- Efecto
- Consecuencia
- Tipo de tarea sugerida.
- Modo de falla.

7. ¿Qué se puede hacer para prevenir o detectar la falla?

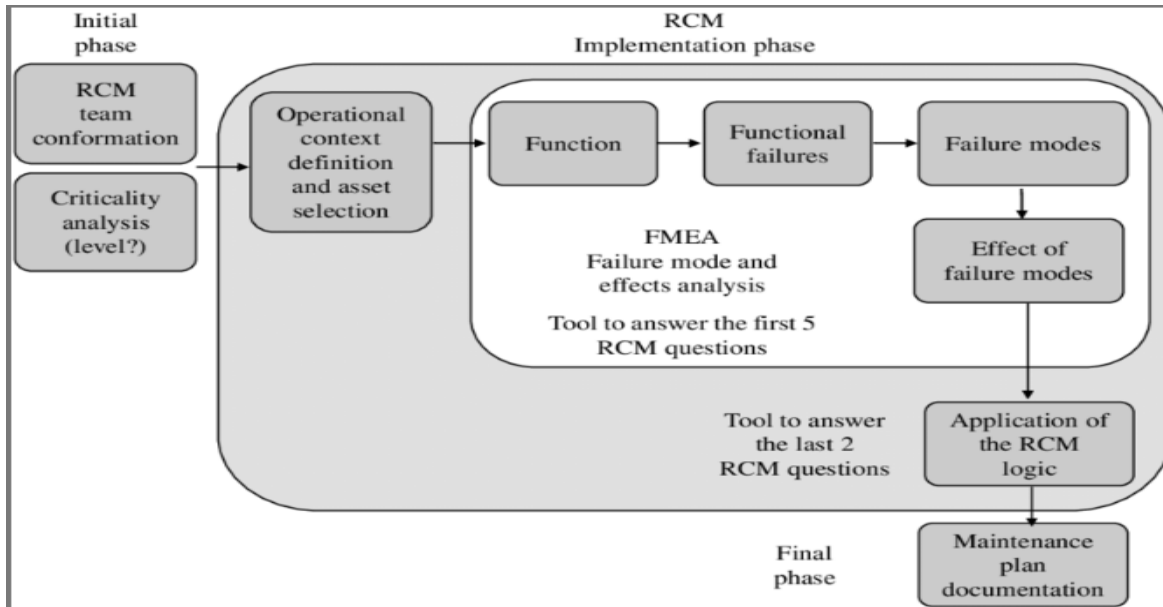


Fig. 4. Proceso de un FMEA

Nota: fuente <https://www.researchgate.net/publication/343678170>

C) Elaboración de un plan de mantenimiento y sus seis componentes fundamentales

La elaboración de un plan de mantenimiento eficaz es el resultado de un proceso sistemático que parte del análisis del contexto operacional del activo y se estructura en torno a principios de confiabilidad y criticidad. Según [28], este proceso debe integrarse en un modelo de mejora continua, asegurando coherencia entre la estrategia del negocio y la gestión técnica de activos. Además, de acuerdo con la metodología RCM descrita por [25], este plan debe construirse en etapas lógicas desde la función del sistema hasta la definición de tareas específicas, basándose en la evaluación de modos de falla y sus consecuencias.

A partir de estas fuentes, se identifican seis componentes fundamentales para la elaboración de un plan de mantenimiento confiable y adaptable:

1) *Contexto operacional*: El punto de partida es la definición precisa del entorno físico, normativo y funcional en el que opera el activo. Incluye condiciones de carga, frecuencia de uso, entorno ambiental, estándares regulatorios y políticas organizacionales [28]. Esto asegura que las decisiones posteriores se ajusten a la realidad de operación.

2) *Funciones y estándares de desempeño*: Se identifican las funciones primarias y secundarias del activo, junto con los niveles esperados de desempeño. Esta etapa responde a la primera pregunta del RCM: ¿Qué debe hacer el sistema y cuáles son sus estándares? [25].

3) *Análisis de modos de falla y sus causas*: Cada función es analizada en términos de las posibles fallas funcionales y los modos específicos en los que podría ocurrir una interrupción o degradación de la función. Esto permite comprender qué puede fallar y por qué [26].

4) *Evaluación de consecuencias y criticidad*: Las fallas se clasifican según su impacto sobre la seguridad, medio ambiente, operación y costos. Este paso es esencial para priorizar intervenciones y seleccionar las tareas adecuadas según la lógica del árbol de decisiones RCM [25].

5) *Selección de tareas de mantenimiento*: A partir del análisis anterior, se define qué tareas específicas deben implementarse: mantenimiento preventivo, predictivo, rediseño o acciones correctivas. La selección se basa en viabilidad técnica, costo-efectividad y efectividad de detección [26].

6) *Implementación, monitoreo y mejora continua*: Finalmente, el plan debe ejecutarse dentro de un sistema que permita el seguimiento de indicadores de desempeño (KPIs), revisión periódica y retroalimentación constante. Esta fase cierra el ciclo del modelo propuesto por [28] permitiendo ajustes dinámicos basados en resultados reales.

D) Aplicación del RCM en Estaciones de Carga para Vehículos Eléctricos (EVSE)

En el contexto de la movilidad eléctrica, el RCM se adaptaría como una herramienta clave para garantizar la confiabilidad de las estaciones de carga para vehículos eléctricos. Estas estaciones deben operar de manera continua y segura para evitar interrupciones en el servicio. La aplicación del RCM en estos sistemas permite Cumplir con normativas como:

1) *El RETIE (Reglamento Técnico de Instalaciones Eléctricas)*: Es una normativa colombiana que establece los requisitos técnicos para la instalación de sistemas eléctricos en todo tipo de infraestructuras, con el objetivo de garantizar la seguridad, eficiencia y calidad de las instalaciones eléctricas en el país. Esta normativa busca proteger tanto a las personas como a las instalaciones de posibles riesgos eléctricos, promoviendo un ambiente seguro [29].

En el contexto de las Estaciones de Carga para Vehículos Eléctricos (EVSE), el cumplimiento con el RETIE es crucial debido a los riesgos asociados con las instalaciones eléctricas, tales como cortocircuitos, sobrecargas, descargas eléctricas y otros peligros que podrían generar fallas en el suministro eléctrico, incendios o incluso accidentes con los usuarios.

Para garantizar el cumplimiento con en las estaciones de carga para vehículos eléctricos, es necesario:

a) *Instalación adecuada de los sistemas eléctricos*: Las estaciones deben contar con sistemas de protección como interruptores, fusibles, disyuntores y dispositivos de puesta a tierra, todos ellos conforme a los requisitos establecidos por RETIE.

b) *Mantenimiento preventivo y predictivo*: El RCM ayuda a que los equipos de carga se mantengan en condiciones óptimas mediante un plan de mantenimiento que permita prevenir fallas o defectos que pudieran comprometer la seguridad eléctrica de la instalación.

c) Revisión y auditoría periódica: La aplicación del RCM también permite realizar auditorías regulares y asegurarse de que la estación de carga esté funcionando dentro de los parámetros establecidos por el RETIE, además de estar preparada para cualquier inspección o certificación de cumplimiento.

d) Protección contra sobrecargas y cortocircuitos: Las estaciones deben estar diseñadas para resistir sobrecargas y prevenir daños a los vehículos eléctricos que se conecten. El RETIE establece parámetros específicos para este tipo de protecciones, que deben ser implementados y mantenidos de acuerdo con un enfoque de confiabilidad.

e) Formación y capacitación continua del personal: De acuerdo con el RETIE, es importante que los operarios de las estaciones de carga reciban formación en cuanto a los estándares de seguridad eléctrica, lo cual se puede gestionar a través del mantenimiento basado en confiabilidad para asegurar que las estaciones se mantengan siempre dentro de las normativas vigentes.

E. International Organization for Standardization (ISO). ISO 9001:2015

Es un estándar internacional que establece los requisitos para un sistema de gestión de calidad (SGC) efectivo, aplicable a cualquier organización, independientemente de su tamaño o sector. Su objetivo principal es garantizar que los procesos internos se gestionen de forma consistente para cumplir con las expectativas del cliente y mejorar continuamente el rendimiento organizacional [30]. En el contexto de la gestión de mantenimiento para estaciones de carga de vehículos eléctricos, la implementación de ISO 9001 aporta beneficios como:

Enfoque en el Cliente: La norma promueve una cultura orientada al cliente, lo que en el ámbito del mantenimiento se traduce en garantizar que los servicios prestados (por ejemplo, la disponibilidad y confiabilidad de las estaciones de carga) cumplan con estándares de calidad, confiabilidad y seguridad para el usuario final.

1) *Mejora Continua*: ISO 9001 se basa en el ciclo PDCA (Planificar, Hacer, Verificar, Actuar), incentivando a la organización a evaluar y mejorar constantemente sus procesos. Esta filosofía se acopla con las prácticas del RCM, ya que ambos enfoques buscan identificar, analizar y corregir fallas antes de que se conviertan en problemas mayores.

2) *Estructuración y documentación de procesos*: La norma exige que todos los procesos estén debidamente documentados, lo que facilita la trazabilidad, la auditoría y la gestión del conocimiento dentro de la organización. Esto resulta esencial para el mantenimiento de equipos críticos, donde la documentación de procedimientos, intervenciones y resultados es fundamental para el control y la mejora continua.

3) *Gestión del riesgo y oportunidades*: ISO 9001 invita a la identificación y gestión de riesgos y oportunidades que puedan afectar la calidad de los procesos. En el contexto del mantenimiento, esta perspectiva permite adoptar medidas proactivas para mitigar fallas o deficiencias en los equipos, lo que refuerza la confiabilidad operativa.

4) *Cultura de calidad y compromiso organizacional*: La implementación de esta norma fomenta una cultura de calidad en toda la organización, implicando a todos los niveles jerárquicos. Esto se refleja en la capacitación del personal, la comunicación efectiva y el compromiso con la excelencia, elementos fundamentales para garantizar que las estaciones de carga funcionen de manera óptima y segura.

IV. METODOLOGÍA

Para abordar la problemática de las fallas recurrentes y los tiempos de inactividad en los equipos STAR CHARGE® ubicados en el departamento de Antioquia, se propone una metodología de investigación de enfoque mixto que integra técnicas cualitativas y cuantitativas. Este enfoque permitirá una comprensión integral del estado actual de los equipos y la implementación efectiva de un plan de Mantenimiento Centrado en la Confiabilidad (RCM).

Fases de la Metodología: A continuación, se especifica la actividad a realizar seguido de su descripción.

A. Fase 1: Recolección y análisis de datos históricos

1) *Identificación de estaciones de carga:* Los cargadores STAR CHARGE®, a tratar son sistemas de recarga para vehículos eléctricos (EV) diseñados para ofrecer soluciones de carga rápida en corriente continua (DC). Su función principal es suministrar energía eléctrica a vehículos eléctricos de forma segura, eficiente y rápida, reduciendo significativamente el tiempo de carga comparado con estaciones de nivel 1 o nivel 2 (carga lenta o semi rápida). Están orientados tanto a instalaciones públicas como privadas, y su rango de potencia abarca desde 60 kW hasta 180 kW, son compatibles con estándares internacionales como CCS (Combined Charging System) y CHAdeMO, ubicados en puntos estratégicos alrededor de toda el área metropolitana de Antioquia, ([ver figura 5](#)) y ([tabla 4](#)).



Fig. 5. Modelos y ubicaciones geográficas en el departamento de Antioquia EVSE DCFC

TABLA IV.
IDENTIFICACIÓN DE ESTACIONES DE CARGA

N°	N°DE SERIE Y TIPO DE CONECTOR	Tipo de Estación	Ubicación Geográfica	Nivel de Carga	Usuario Final	Entorno Operativo	Frecuencia de Uso	Observaciones Técnicas
1	SN2402241468 (GB/T) 20200319DC017 (GB/T)	Pública/flota	Girardota	DCFC	Flota/ Urbano	Urbano	baja	P: 180 Kw P de Entrada : CA380V ± 15% P de Salida : CC 240A Nivel de Protección : IP54 Fecha de producción : 02/2024
2	SN2211280225 GB/T SN2211280213 GB/T	Privada	cabañas (bello)	DCFC	Flota	Industrial	Alta	P: 60 Kw V de Entrada : 380V a.c I de Entrada : AC 96A V de salida : 200 Vdc -1000Vdc I de salida : DC 200A Max Nivel de Protección : IP54 Fecha de producción : 11/2022
3	20201012DC016 GB/T	Privada	Itagüí	DCFC	Flota	Industrial	Baja	P: 180 Kw P de Entrada : CA380V ± 15% P de Salida : CC 240A Nivel de Protección : IP54 Fecha de producción : 03/2020

4	20201012DC029 GB/T	Privada	Envigado	DCFC	Flota	Urbano	Baja	P: 180 Kw P de Entrada : CA380V ± 15% P de Salida : CC 240A Nivel de Protección : IP54 Fecha de producción : 03/2020
5	20200117DC008 GB/T 20200117DC009 GB/T	Privada	Itagüí	DCFC	Flota	Industrial	Alta	P: 120 Kw V de Entrada : 380Vac V de salida : 300 - 750 Vdc Nivel de Protección : IP54 Fecha de producción : 1/ 2020
6	20200811DC021 GB/T	Flota	Caldas	DCFC	Flota	Urbano	Alto	P: 180 Kw P de Entrada : CA380V ± 15% P de Salida : CC 240A Nivel de Protección : IP54 Fecha de producción : 03/2020
7	20200117DC002 GB/T	Privada	Sabaneta	DCFC	Comercial	Urbano	Alto	P: 120 Kw V de Entrada : 380Vac V de salida : 300 - 750 Vdc Nivel de Protección : IP54 Fecha de producción : 1/ 2020
8	20210408DC005 CCS 1- CCS 2 20201012DC028 GB/T	Pública	La pintada	DCFC	Comercial	Urbano	Bajo	P: 180 Kw P de Entrada : CA380V ± 15% P de Salida : CC 240A Nivel de Protección : IP54 Fecha de producción : 03/2020
9	2020117DC004 GB/T	Privada	Itagüí	DCFC	Flota	Urbano	Alto	P: 120 Kw V de Entrada : 380Vac V de salida : 300 - 750 Vdc Nivel de Protección : IP54 Fecha de producción : 1/ 2020

2). Contexto de estaciones de carga:

Estación N°1

Ubicación: municipio de Girardota, vía el hatillo.

Clima promedio: Alrededor de 21°C

Humedad relativa: Alta, generalmente superior al 70%

Lugar: Estación de combustible, se ubica a unos 50 metros de las islas de gasolina, y a unos 10 metros de la sub estación.

RED: Cuenta con un servicio de internet vía LAN y respaldo de red móvil

Vigilancia: No cuenta con personal de vigilancia las 24h, pero si con un sistema de monitoreo por cámara directo a los dos equipos.

Modelos: Los dos cargadores disponibles son modelo TITAN 180 KW.

Operarios: Son libres de operar lo que significa que cualquier persona autorizada por las empresas o flotas contratistas del servicio pueden utilizarla, por ende, la maquina les presta el servicio a varios operarios empresas de servicio público, mensajería entre otras.

Frecuencia de carga: La frecuencia de carga es media con un promedio de 15 cargas diarias, en su mayoría VE de (60 - 80) Kwh.

Cliente final: Terpel Voltex

Esta estación de carga se encuentra ubicada en una estación de gasolina Terpel, por la vía principal del hatillo, en una zona cercana a bodegas industriales y parqueadero de vehículos de carga pesada, es una zona donde se presencia alto nivel de ruido, riesgo de líquidos inflamables y poca señal de red móvil, se instalaron dos cargadores en el año 2023 para el cliente Voltex, una empresa aliada de Terpel encargada de proveer puntos de carga para vehículos eléctricos de empresas de mensajería, servicio público, ubers entre otras. La instalación de los EVSE 180 Kw cada uno separado a 15 m, capaces de cargar 4 vehículos al tiempo y una zona de parqueo capaz de albergar 8 vehículos, la subestación se encuentra en la parte trasera de los cargadores, con su debida protección en caso de vandalismo o ingreso no permitido.

Estación N°2

Ubicación: Cabañas, bello.

Clima promedio: Alrededor de 21°C

Humedad relativa: Alta, generalmente superior al 70%

Lugar: Patios de carga, empresa Nutresa. Se ubica a 50 metros de la subestación.

RED: No cuentan con Red local, el equipo trabaja con línea móvil Claro.

Vigilancia: Cuenta con servicio de vigilancia las 24 h.

Modelos: Los dos cargadores disponibles son modelos Athena 60 kw.

Operarios: Los equipos solo son manipulados las 24h por 3 operarios distribuidos en tres turnos.

Frecuencia de carga: Alta frecuencia de carga, se presta el servicio para 40 VE con capacidad de baterías 82 Kwh. Los equipos trabajan un promedio de 16 h, alternando en horarios de llegada de vehículos.

Cliente final: Grupo Nutresa.

Esta es una estación se encuentra ubicada dentro de las instalaciones de Zenú, en una zona amplia y con capacidad de parqueo de 15 vehículos, estos cargadores Athena fueron lanzados hace poco tiempo por el fabricante, con un firmware nuevo y una pantalla más visible para el operario y una estructura más pequeña que los Titan 180 Kw, con una potencia de 60 Kw la zona presenta dos cargadores ubicados a 15 metros uno del otro y capacidad de cargar 4 vehículos de capacidad de 82 Kwh en un promedio de 1 hora dependiendo del porcentaje de batería, el cliente final es el grupo Nutresa, pero los encargados de la operación y logística de carga y control vehicular es la empresa Operar, esta dio la orden de que solo tuviera un operario manipulando el cargador en su respectiva jornada laboral, esto para evitar malas prácticas de operación y manipulación al equipo, cada uno de esto se le realizo su respectiva inducción para la correcta operación del cargador, esta zona no presenta buena señal de Red móvil por estar alejada de antenas, la carcasa exterior fabricada para este equipo tuvo que ser modificada por presentar obstrucción a la ventilación del equipo, y presencia de altas temperaturas en la cavidad interna, presentando fallas en los módulos al poco tiempo de instalación.

Estación N°3

Ubicación: Itagüí

Clima promedio: Alrededor de 21°C

Humedad relativa: Alta, generalmente superior al 70% y 80%

Lugar: Zona de carga patios empresa Postobón, se ubica a 200 metros de la subestación.

RED: No cuentan con Red local, el equipo trabaja con línea móvil Claro.

Vigilancia: Cuenta con servicio de vigilancia las 24 h.

Modelos: Un equipo disponible modelo TITAN 180 KW.

Operarios: El equipo es manipulado por 2 operarios disponibles de 6am a 8 pm.

Frecuencia de carga: Mediana frecuencia de carga, con un promedio de carga de 8 vehículos diarios, con una capacidad oscilante entre (162 – 282) kwh.

Cliente final: Postobón.

Este cargador ubicado en las instalaciones de la sede de Postobón Itagüí, con una zona de carga para 8 vehículos, el modelo Titan 180 Kw, cumple con las exigencias de trabajo requeridas para los vehículos y tractomulas que cargan en la instalación, fue instalado en una zona para la carga de vehículos livianos, sin tener presente que los vehículos que utilizarían el cargador serían vehículos de carga pesada con un largo considerable, dificultando así el parqueo de los vehículos, a sus alrededores hay presencia de vegetación lo cual lo hace propenso a la humedad, el equipo es manipulado solo por dos operarios presentes los cuales tienen el trabajo de recibir el camión en la zona de descargue y llevarlo hasta el cargador, este personal fue capacitado para la correcta manipulación del equipo, y a su vez cuidar la integridad del mismo, la zona es vigilada y monitoreada por lo cual no hay peligro inminente de vandalismo, y cuenta con buena señal de Red móvil por estar ubicado cerca de una antena principal de señal, este equipo solo es de uso interno de la empresa y no se permite la carga a vehículos no autorizados por la misma, lo cual para realizarle el seguimiento de carga a cada vehículo es entregado un Tags marcado con la placa del mismo y autorizado por la plataforma para llevarle así su métrica necesaria.

Estación N°4

Ubicación: Envigado

Clima promedio: Alrededor de 21°C

Humedad relativa: Alta, generalmente superior al 70% y 80%

Lugar: Patios de carga empresa vía terrestre, se ubica a unos 80 metros de la subestación.

RED: Cuenta con un servicio de internet vía LAN y respaldo de red móvil

Vigilancia: No cuentan con servicio de vigilancia, pero el ingreso a las instalaciones es prohibido.

Modelos: Un equipo disponible modelo TITAN 180 KW.

Operarios: El equipo es operado por 5 operarios, los cuales son los conductores de los autobuses eléctricos.

Frecuencia de carga: Media frecuencia de carga con un promedio de 5 vehículos diarios, con una capacidad de batería de 82 kWh.

Cliente final: Vía terrestre

Es una estación de carga ubicada en las instalaciones de Vía terrestre una empresa de servicio público de transporte urbano y rural, este cargador es utilizado para buses de capacidad de 25 personas y capacidad de batería de 82 kWh, su zona de parqueo es grande y bien ubicada

para su requerimiento, a pesar de ello tienen factores críticos como concurrentes apagones eléctricos y reportes de explosión de transformadores cerca de la zona, a sus alrededores hay vegetación y zona humedad y escombros cerca del cargador, se le realizó la instalación de un techo con pérgola ya que hay presencia de lluvias constantes, los encargados de realizar la carga de los vehículos son los mismos conductores de los buses, los cuales se les entregó a cada uno la tarjeta autorizada por la plataforma para la carga y se les realizó la inducción de cómo operar el equipo, y acciones de prevención y emergencia, en caso de cualquier eventualidad siempre será reportado con el coordinador de flota encargado de la comunicación directa con la plataforma y con el contratista directo del equipo. La intensidad de trabajo mayor se da en horas de la mañana y noche cuando cargan los buses para el día.

Estación N°5

Ubicación: Itagüí

Clima promedio: Alrededor de 21°C

Humedad relativa: Alta, generalmente superior al 70% y 80%

Lugar: Patios de carga Bavaria, ubicados a 10 metros de tablero eléctrico auxiliar.

RED: No cuentan con Red local, el equipo trabaja con línea móvil Claro.

Vigilancia: Cuenta con servicio de vigilancia las 24 horas, aparte de un rígido sistema de monitoreo a la zona.

Modelos: Titan 120 kw

Operarios: El equipo es operado únicamente por 5 operarios las 24 horas.

Frecuencia de carga: Alta frecuencia de carga, la empresa cuenta con 50 VE de 5 a 11 toneladas, con una capacidad de baterías oscilante entre los (82 – 262) Kwh.

Cliente final: Bavaria.

Estación ubicada en las instalaciones de Bavaria Itagüí en los patios de parqueo de los vehículos de la empresa, estos cargadores son críticos por la alta demanda de trabajo por la gran cantidad de vehículos eléctricos con que cuenta la empresa, tanto los de la zona de Antioquia como de otras regiones que llegan a reabastecer carga, por lo tanto los equipos se encuentran operativos las 24 horas, con lapsos de descansos cortos, pero es necesario y obligatorio por contrato cumplir con una exigencia de confiabilidad de equipo de un 99,5 % y una pronta solución y rapidez en la atención a falla en caso de ocurrencia, estos equipos son operados por coordinadores de flota y en

muchas ocasiones hasta por los conductores de los vehículos, es una zona con rigurosa vigilancia por lo que los equipos no son expuestos a vandalismo, en un patio grande de parqueo capaz de permitir el estacionamiento de 10 vehículos de carga pesada, se encuentra bien delimitado mas sin embargo la estación tubo una falla en el momento de la instalación y diseño de la carcasa protectora ya que esta impide realizar un correcto mantenimiento, y a su vez a pesar de tener instrucciones y capacitaciones para la operación del equipo el permitir la manipulación a conductores no capacitados ha facilitado esto para daños pertinentes en el equipo.

Estación N°6

Ubicación: Caldas

Clima promedio: Alrededor de 19°C

Humedad relativa: Alta, generalmente superior al 77% y 83%

Lugar: Estación de combustible, se ubica a unos 50 metros de las islas de gasolina, y a unos 30 metros de la sub estación.

RED: Cuenta con un servicio de internet vía LAN y respaldo de red móvil

Vigilancia: No cuenta con personal de vigilancia las 24h, pero si con un sistema de monitoreo por cámara directo a los dos equipos,

Modelos: Cargador disponible modelo TITAN 180 KW,

Operarios: Equipo libre de operar lo que significa que cualquier persona autorizada por las empresas o flotas contratistas del servicio pueden utilizarla, por ende, la maquina les presta el servicio a varios operarios empresas de servicio público, mensajería entre otras.

Frecuencia de carga: La frecuencia de carga es alta con un promedio de 50 cargas diarias, en su mayoría VE de (60 - 80) Kwh.

Cliente final: Terpel

Estación de carga ubicada en las afueras de la ciudad en caldas, en la estación de gasolina de Terpel ubicada a unos 50 metros de las islas y otros pocos metros de una chatarrería industrial, se presenta riesgos por la presencia de la estación de gasolina y residuos de polvo metálico, humo de cortes o soldaduras, emisiones de cámara pesada, además de contaminación auditiva, este cargador Titan 180 Kw, se encuentra vigilado por sistema monitoreado de cámaras, mas no por personal de vigilancia, es operado por los conductores que llegan abastecer carga de sus vehículos en su mayoría son conductores de Uber y empresas de mensajería, una de las principales fallas

encontradas era la poca señal de Red móvil que llegaba a la zona , por lo cual como base principal y requisito para un correcto funcionamiento y confiabilidad del equipo se pidió conexión a internet vía cable ethernet, al igual que un instructivo de operación en la parte posterior del Tótem de carga donde se especifique los pasos para una correcta operación del equipo.

Estación N°7

Ubicación: Sabaneta

Clima promedio: Alrededor de 21°C

Humedad relativa: Alta, generalmente superior al 70% y 80%

Lugar: Zona urbana de sabaneta, parqueadero posterior de Localiza Rent car.

RED: Cuenta con un servicio de red móvil Tigo.

Vigilancia: No tiene servicio de vigilancia, y está expuesto a cualquier persona que pueda manipularlo, vandalismo y personas diferentes a la identidad de localiza.

Modelos: TITAN 120 kw.

Operarios: Equipo libre de operar lo que significa que cualquier persona autorizada por las empresas o flotas contratistas del servicio pueden utilizarla, por ende, la maquina les presta el servicio a varios operarios empresas de servicio público, mensajería y la empresa Localiza.

Frecuencia de carga: Alta frecuencia de carga con un promedio de 50 VE diarios,

Cliente final: Localiza rent car

Estación de carga ubicada en las afueras de la empresa Localiza rent car, es un cargador instalado para el cliente Localiza y renting Colombia, para cargar los vehículos eléctricos que se rentaban al personal público, pero termino implementándose la carga para vehículos de empresas de Uber, mensajerías y otras empresas privadas, este cargador es expuesto a largos periodos de operación las 24 horas, es activado por medio de tarjetas aprobadas por la plataforma, y manipulado por los conductores que requieren de su servicio, no posee la guía necesaria o el instructivo de uso o manipulación del equipo y está expuesto a vandalismo o cualquier persona que pase por sus alrededores, no cuenta con servicio de vigilancia ya que el personal encargado mantiene dentro de las instalaciones y la ubicación del equipo no permite una constante vigilancia como se requiere, cuenta con un servicio de Red móvil para su conexión a la plataforma, y una zona de parking con capacidad de permitir el estacionamiento a dos vehículos livianos.

Estación N°8

Ubicación: Vía la pintada

Clima promedio: Alrededor de 28°C

Humedad relativa: Alta, generalmente superior al 85%

Lugar: Zona de servicio vía concepción

RED: Cuenta con un servicio de red móvil Tigo.

Vigilancia: No tiene servicio de vigilancia, y está expuesto a cualquier persona que pueda manipularlo, vandalismo y personas diferentes a utilizarlo.

Modelos: TITAN 180 kw.

Operarios: Equipo libre de operar lo que significa que cualquier persona autorizada por las empresas o flotas contratistas del servicio pueden utilizarla, por ende, la maquina les presta el servicio a varios operarios empresas de servicio público, mensajería y cualquier persona con vehículo eléctrico.

Frecuencia de carga: Baja frecuencia de carga 4 a 6 cargas diarias, con VE de capacidad de baterías de 82 kwh.

Cliente final: Contratistas concepción y estación pública.

Estación de carga ubicada en la vía la pintada (concepción), en zona de servicio un lugar reservado para contratistas y trabajadores de la constructora, esta zona de carga cuenta con dos cargadores uno fue instalado única y exclusivamente para los vehículos que requerían carga del personal de la concepción y otro para el público en general, a pesar de no ser tan visitada la zona se tiene un aproximado de registro de cargas de 4 a 6 cargas diarias, esta zona no cuenta con servicio de vigilancias constante ni presenta seguimiento por cámara lo cual, expone de manera significativa la integridad de los equipos, los operarios de la zona y conductores se les realiza la inducción de manejo y cuidado del equipo, diferente al otro equipo de utilidad pública el cual no posee información alguna o poster de manejo dificultando la carga para la persona que requiera de su servicio. El equipo es conectado a la plataforma por medio de Red móvil y debido a la ubicación de carga se dificulta mucho la señal de dicho operados.

Estación N°9

Ubicación: Itagüí

Clima promedio: Alrededor de 21°C

Humedad relativa: Alta, generalmente superior al 70% y 80%

Lugar: Zona de parqueo y descargue, empresa de mandar y servir.

RED: Cuenta con un servicio de internet vía LAN

Vigilancia: Es vigilado por los operarios que utilizan el cargador y cámaras de vigilancia.

Modelos: TITAN 120 kw

Operarios: Es operado por todos los conductores de la empresa no tiene en si un personal destinado solo para su uso.

Frecuencia de carga: Alta frecuencia de carga, la empresa cuenta con 30 VE, con una capacidad de baterías de 82 kwh

Cliente final: Mandar y servir.

Estación de carga ubicada en la zona de descargue de la empresa mandar y servir de mensajería, por la vía ducto de guayabal, es un cargador operado por todos los conductores de los vehículos eléctricos y no presenta un instructivo de carga, más sin embargo se les realizo la inducción de cómo se manipula y opera el cargador y algunas actividades de emergencia, el lugar de carga no está bien adecuado para mantener la integridad del cargador en cuanto a la gran cantidad de polvo y tierra que se encuentra en él, lo que se puede ver reflejado en filtros de aire frecuentemente obstruidos y calentamientos al equipo, este equipo no posee vigilancia mas que los trabajadores de la empresa ya que está ubicado en las afueras de la empresa, corre el riesgo a ser manipulado por transeúntes de la calle y o vandalismo, no tiene un poste de parada, zona delimitada de parqueo o topes de parada lo cual, imposibilita para el conductor la prevención y el cuidado de la integridad del equipo, al estar ubicado al frente de la empresa le facilita la conexión al equipo a la plataforma por medio de cable Ethernet, pero el constante cambio de conductores y la falta de instructivos o capacitación para los nuevos conductores permite una mala manipulación y procedimientos de carga lo cual será reflejado en fallas al activo.

3) *Registros de falla y mantenimientos*: Para identificar patrones recurrentes de fallas y comportamientos en el mantenimiento de las estaciones de carga rápida, se recopilaron los registros históricos generados en los últimos dos años a través de la aplicación SafetyCulture, utilizada por la empresa VOUMGRUP SAS para la gestión operativa y de mantenimiento. Esta herramienta digital permite documentar inspecciones, reportes de fallas, tareas correctivas y actividades preventivas, como se puede apreciar por medio de plantillas (ver figura 6). Lo que facilita una trazabilidad de los eventos asociados a cada estación de carga. Los mantenimientos son programados por el coordinador de operaciones de manera semestral, (ver tabla 5). El análisis de esta información permitirá establecer tendencias, puntos críticos de intervención y prioridades para el diseño de un plan de mantenimiento.

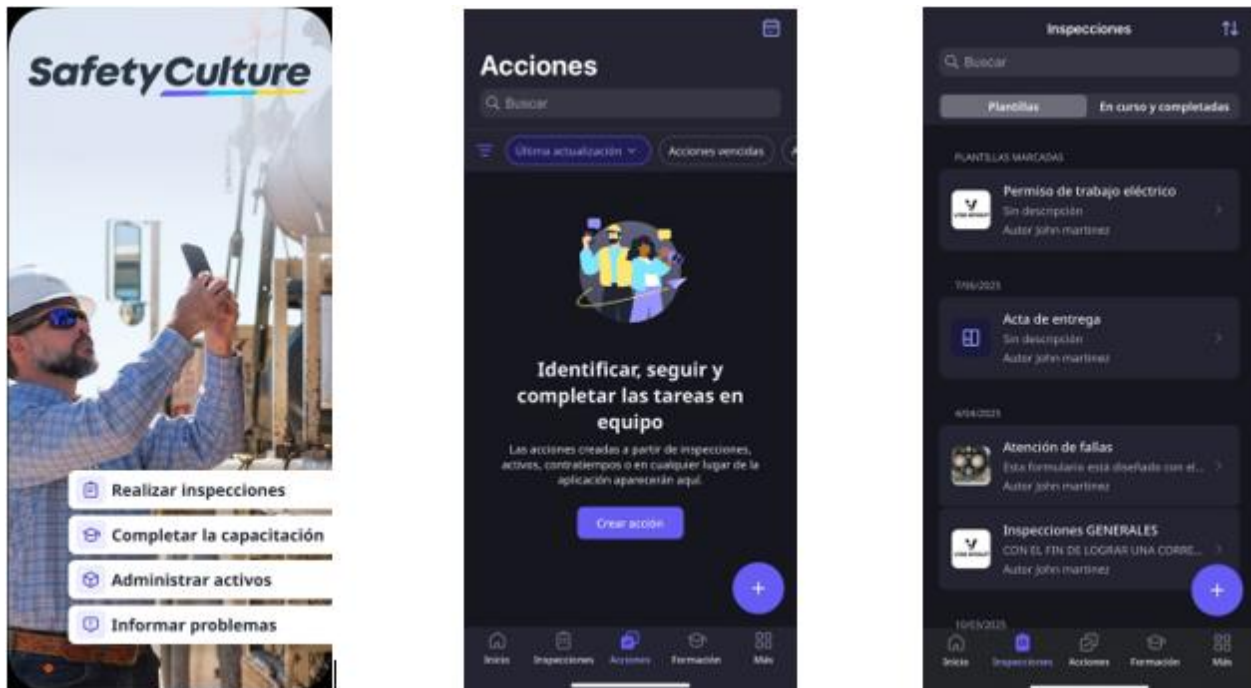


Fig. 6. App SafetyCulture

TABLA V CRONOGRAMA DE MANTENIMIENTO

CRONOGRAMA DE MANTENIMIENTOS														
ESTACIÓN	#DE CARGADORES	TÉCNICO	ENE	FEB	MAR	ABR	MAY	JUN	JUL	AGO	SEP	OCT	NOV	DIC
CERVECERIA UNION	2	LUIS RENDON												
ZENU	2	LUIS RENDON												
BAVARIA ENVIGADO	1	LUIS RENDON												
MANDARY SERVIR	1	LUIS RENDON												
LA PINTADA	2	LUIS RENDON												
VIA TERRESTRE	1	LUIS RENDON												
POSTOBON ITAGUI	1	LUIS RENDON												
ANCOSUR	1	LUIS RENDON												
LA MONTAÑA	2	LUIS RENDON												
LOCALIZA	1	LUIS RENDON												

Quando se realizan reportes de falla por el cliente, la notificación es directamente con el ingeniero y coordinador de operaciones el cual al dar previo aviso rectifica los permisos de trabajo necesarios para operar en la zona, una vez diligenciados el personal que atiende la falla realiza la inspección adjuntando todos los datos pertinentes a dicha falla en la app bajo la plantilla de fallas, ilustrada en la figura 8, en esta se selecciona los tipos de falla y a que subsistema pertenece la falla, quien atiende la falla, estación donde se presentó la falla, hora de inicio e igualmente si al finalizar la visita el equipo se encuentra operativo y el tiempo que se demoró en la intervención del mismo, esta información permite ser descargada bajo un archivo pdf, para luego ser ingresada al historial de cada equipo y al cliente. En la tabla 6, se evidencia las fallas registradas en los últimos dos años a los equipos.

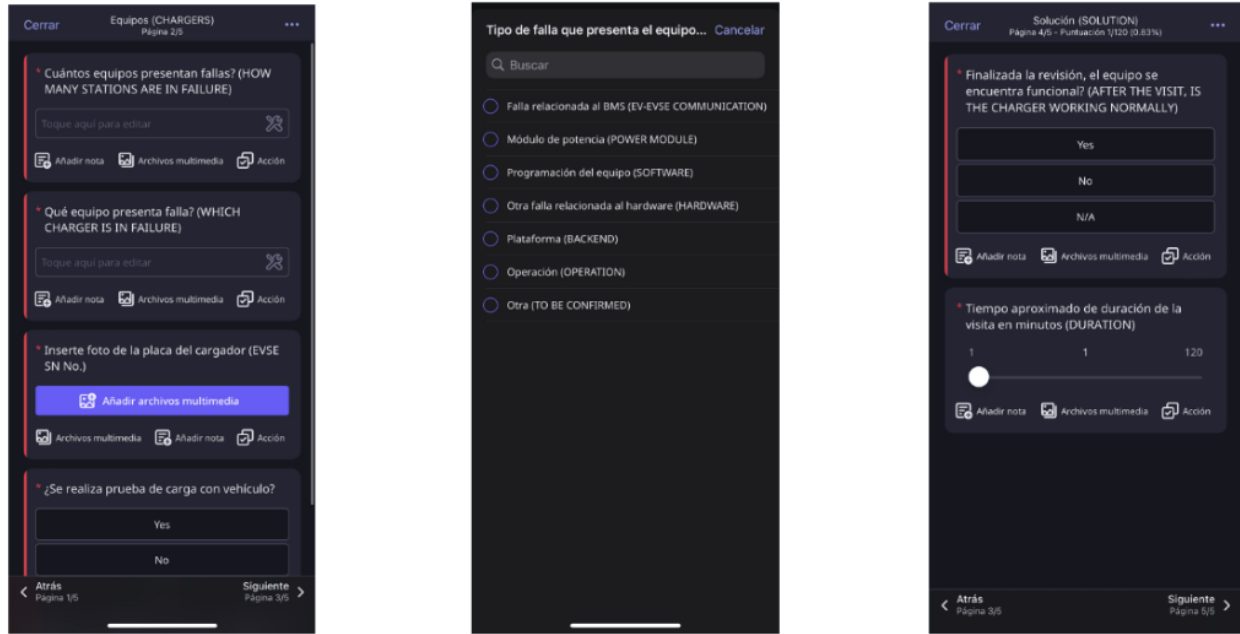


Fig. 2. Plantilla de registro de fallas

TABLA VI.

REGISTRO DE FALLAS AÑOS 2023 Y 2024

Fecha del Evento	Estación / Ubicación	subsistema	Pieza en falla	Tiempo de visita (h)	QUEDA OPERATIVO O SI/NO	TIEMPO DE REPARACION
10/03/2023	2020117DC004 / Itagüí	Comunicación y red	Ocpp	1	SI	-
25/03/2023	2020117DC004/ Itagüí	Cables y conectores de carga	Conector de carga	2	NO	4/05/2023
6/04/2023	20201012DC016/ Itagüí	Sistema de enfriamiento	Sensor de temperatura	1	SI	-
20/04/2023	20201012DC016 / Itagüí	Electrónica de potencia (DC)	Módulo de potencia	1	SI	7/08/2023
20/04/2023	20200117DC009/ Itagüí	Electrónica de potencia (DC)	Contacto izquierdo	2	NO	28/05/2023
6/05/2023	20200117DC002/ Sabaneta	Electrónica de control	Pila de tarjeta madre	1	SI	-
22/06/2023	20201012DC016 / Itagüí	Electrónica de potencia (DC)	Módulo de potencia	1	NO	8/11/2023

27/06/2023	20201012DC028/ Pintada	Alimentación AC	INTERRUPTOR	1	SI	-
27/06/2023	2020117DC004/ Itagüí	Comunicación y red	Operador móvil	1	SI	-
8/07/2023	20200117DC008/ Itagüí	Cables y conectores de carga	Conector de carga	4	NO	2/08/2023
4/08/2023	20201012DC028/ Pintada	Electrónica de potencia (DC)	Módulo de potencia	1	SI	29/11/2024
16/08/2023	2020117DC004/ Itagüí	Electrónica de potencia (DC)	Módulo de potencia	1	SI	8/10/2023
5/09/2023	20201012DC029/ Envigado	SOFTWARE	Parámetros de carga	1	SI	-
5/09/2023	2020117DC004/ Itagüí	Comunicación y red	CODIGOS Tags	1	SI	-
20/11/2023	20201012DC029/ Envigado	Comunicación y red	Operador móvil	1	SI	-
13/12/2023	20210408DC005/ Pintada	Comunicación y red	Operador móvil	1	SI	-
20/12/2023	20210408DC005/ Pintada	Interfaz de usuario (HMI)	Pantalla LED	2	NO	25/12/2023
29/12/2023	20200117DC002/ Sabaneta	Electrónica de potencia (DC)	Módulo de potencia	1	SI	15/01/2024
29/12/2023	20200117DC002/ Sabaneta	Seguridad / protecciones	sensor de puerta	1	si	
22/01/2024	20200117DC002/ Sabaneta	Comunicación y red	Operador móvil	1	SI	-
22/01/2024	20200117DC002/ Sabaneta	Seguridad / protecciones	sensor de puerta	1	si	
28/01/2024	SN2211280213/ Cabañas	Electrónica de potencia (DC)	Cableado de módulo de potencia	2	SI	2/02/2024
29/01/2024	20200117DC009/ Itagüí	Comunicación y red	OCP	2	SI	-
5/02/2024	20201012DC029/ Envigado	Sistema de enfriamiento	Sensor de temperatura	1	SI	-

9/02/2024	20210408DC005/ Pintada	Electrónica de control	PDU	2	NO	8/10/2024
17/02/2024	2020117DC004/ Itagüí	Electrónica de potencia (DC)	Módulo de potencia	1	SI	3/08/2024
3/03/2024	20200319DC017/ Girardota.	Comunicación y red	Operador móvil	1	SI	-
30/03/2024	2020117DC004/ Itagüí	Electrónica de potencia (DC)	Cableado de módulo de potencia	2	NO	4/04/2024
15/04/2024	2020117DC004/ Itagüí	Electrónica de potencia (DC)	Módulo de potencia	1	SI	8/10/2024
4/06/2024	SN2211280225/ Cabañas	Cables y conectores de carga	Conector de carga	4	NO	8/06/2024
6/06/2024	SN2211280225 / Cabañas	Electrónica de potencia (DC)	Módulo de potencia-Bobina DC	5	SI	8/06/2024
14/06/2024	20200117DC002/ Sabaneta	Comunicación y red	CODIGOS Tags	1	SI	-
15/06/2024	2020117DC004/ Itagüí	Electrónica de potencia (DC)	Módulo de potencia	1	SI	8/10/2024
18/06/2024	SN2211280225/ Cabañas	SOFTWARE	Parámetros de equipo	1	SI	-
20/06/2024	20200319DC017/ Girardota.	Interfaz de usuario (HMI)	Sensor de RFID	2	SI	-
20/06/2024	SN2211280225/ Cabañas	Medición (contadores)	Medidor eléctrico	2	SI	-
21/06/2024	2020117DC004/ Itagüí	Electrónica de potencia (DC)	Módulo de potencia	1	SI	8/10/2024
21/07/2024	20200117DC008/ Itagüí	Seguridad / protecciones	FUSIBLE 400A	1	SI	-
4/08/2024	20201012DC028/ Pintada	Electrónica de potencia (DC)	Contactador derecho	1	NO	16/10/2024
8/08/2024	20201012DC028/ Pintada	Cables y conectores de carga	Conector de carga	2	NO	16/10/2024

16/08/2024	SN2211280225/ Cabañas	Comunicación y red	OCP	2	SI	-
20/08/2024	SN2211280213/ Cabañas	Comunicación y red	OCP	2	SI	-
20/08/2024	SN2211280225/ Cabañas	Comunicación y red	OCP	2	SI	-
21/08/2024	20200117DC008/ Itagüí	Electrónica de potencia (DC)	Contactador izquierdo, 4 módulos de potencia	5	NO	1/01/2025
16/09/2024	SN2211280213/ Cabañas	Comunicación y red	OCP	2	SI	-
20/09/2024	SN2211280213/ Cabañas	SOFTWARE	Parámetros de equipo	1	SI	-
20/09/2024	20200117DC008/ Itagüí	Cables y conectores de carga	Conector de carga	4	NO	2/12/2024
8/10/2024	20200811DC021/ Caldas	Comunicación y red	Operador móvil	1	SI	-
16/10/2024	SN2211280213/ Cabañas	SOFTWARE	FIRMWARE	2	SI	-
18/10/2024	SN2211280213/ Cabañas	Cables y conectores de carga	Conector de carga	2	NO	25/10/2024
20/10/2024	SN2211280213/ Cabañas	Electrónica de control	Fuente de alimentación	2	NO	25/10/2024
7/11/2024	20200117DC008/ Itagüí	Seguridad / protecciones	Interruptor de emergencia	5	SI	-
27/11/2024	20200811DC021/ Caldas	Seguridad / protecciones	Interruptor de emergencia	2	SI	-
28/11/2024	20201012DC028/ Pintada	Electrónica de control	PDU	2	NO	-
12/12/2024	20200117DC008/ Itagüí	Sistema de enfriamiento	ventilador	2	NO	-

Una de las observaciones que se plantea en la tabla es si el equipo queda operativo sí o no, en estos casos especiales hay varios modos de falla en los cuales se centra en el lado del cual el equipo presento la falla, ejemplo: si el equipo presento la falla de conector de carga lado izquierdo,

ese lado queda inhabilitado hasta realizar mantenimiento correctivo u donde aparece la fecha en la casilla de reparación; otra de las fallas presentes son los módulos de potencia, cada cargador tiene entre 2 a 8 módulos de potencia dependiendo del modelo presente, cada uno de estos entrega 30kw DC, si uno de estos falla , se puede realizar la extracción del mismo y configurar el equipo de manera que opere bajo los módulos restantes como se puede apreciar en la figura 9.

Field	Value
1#gun	10111111
2#gun	10111111
Connector Number (1)	1
Connector Number (2)	2
Module Number (group 1)	3
Module Number (group 2)	3
Max output voltage	750.0
Min output voltage	200.0
Max output current	250.00
Battery temperature threshold	0
Gun temperature threshold	75
Charging mode (0-auto, 1-manual)	0

Fig. 3. Configuración de módulos de potencia DC

4) *Conocimiento y experiencia técnica de operadores involucrados en el mantenimiento de los equipos:* VOMGROUP SAS es una empresa que se dedica al Mantenimiento y reparación especializado de equipo eléctrico, con una experiencia en cargadores de poco más de 5 años, al igual que prestar el servicio de importación de los mismo equipos, y prestar el servicio contratista a varias empresas pioneras del sector eléctrico en varios países de Latinoamérica pero principalmente en Colombia, el conocimiento se ha adquirido por medio de guías dadas por el fabricante, con una comunicación directa con el personal técnico.

La empresa requiere que cada uno de los técnicos haya adquirido por medio del certificado RETIE los siguientes conocimientos:

Seguridad eléctrica

- Principios de protección contra contactos directos e indirectos.
- Sistemas de puesta a tierra y protección contra sobretensiones.
- Riesgos eléctricos: arco eléctrico, cortocircuitos, electrocución.
- Procedimientos de trabajo seguro en instalaciones energizadas y desenergizadas.
- Uso de EPP (Elementos de Protección Personal) en labores eléctricas.

Diseño y cálculo de instalaciones eléctricas

- Interpretación de planos eléctricos unifilares y multifilares.
- Cálculo de carga eléctrica, caída de tensión, calibre de conductores.
- Selección de protecciones (breakers, fusibles, disyuntores diferenciales).
- Dimensionamiento de sistemas de puesta a tierra.
- Evaluación de la capacidad de las canalizaciones eléctricas.

Instalación y montaje eléctrico

- Montaje de tableros, canalizaciones, cajas, ductos, y dispositivos eléctricos.
- Instalación de sistemas de iluminación, tomacorrientes y fuerza.
- Normas de identificación y señalización.
- Correcto uso de herramientas y equipos para instalación eléctrica.
- Técnicas de soldadura, empalmes y conexiones.

Verificación y pruebas eléctricas

- Medición de resistencia de aislamiento, continuidad y puesta a tierra.
- Verificación de cumplimiento de tensiones, corrientes y balance de fases.
- Detección y corrección de anomalías o desviaciones normativas.
- Elaboración de informes técnicos y protocolos de prueba.

Uso de instrumentos y herramientas de medición

- Multímetros, telurómetros, pinzas amperimétricas, megóhmetros, etc.
- Manejo correcto y calibración de equipos de prueba.

Ética profesional y responsabilidad técnica

- Prácticas seguras, responsables y éticas en instalaciones eléctricas.
- Importancia de la trazabilidad y calidad del trabajo técnico.

5) *Revisión de normas aplicables*: De acuerdo con la normatividad colombiana y las normas regidas por la empresa VOUMGROUP SAS, sólo personal calificado puede realizar mantenimiento eléctrico. Los ingenieros, tecnólogos o técnicos electricistas matriculados son responsables directos de la instalación, atención a fallas y mantenimiento. Deben firmar su matrícula profesional en la documentación y cumplir los lineamientos del RETIE [29]. Como responsable de instalación o la operación realizada. En la práctica, esto se traduce en exigir que los técnicos posean:

- *formación en electricidad* (ingeniería o tecnólogo técnico certificado)
- *capacitación en RETIE y en ISO 9001*
- *habilitación legal* (matrícula vigente ante el Consejo Profesional).

Además, los lugares eléctricos (subestaciones, transformadores, gabinetes) deben estar accesibles “sólo a personal calificado”. En consecuencia, cualquier diagnóstico, mantenimiento o reparación de un cargador EV debe ser hecho por un técnico eléctrico certificado, con experiencia previa en sistemas de media/baja tensión y recarga de baterías.

Además de cumplir con las respectivas normas colombianas el personal debe cumplir los requisitos de los fabricantes de cargadores STAR CHARGE®, que dictan además sus propios protocolos:

- Recibir capacitación en seguridad eléctrica y habilidades profesionales, aprobando un examen antes de operar el equipo.
- Conocer en detalle los principios de carga EV, modos de recarga, métodos de diagnóstico y técnicas de mantenimiento del cargador, así como los procedimientos de emergencia y normas de seguridad nacionales aplicables.
- Operar según procedimientos escritos, usar uniforme y equipo de protección personal (EPPS), durante todo el servicio.

Adicionalmente, STAR CHARGE® exige que todo trabajo se realice con la energía cortada y siguiendo señales de bloqueo de seguridad.

6) *Taxonomía del EVSE STARCHARGE®*: En la presente taxonomía (ver figura 10), se reúne el conjunto de subsistemas y componentes mantenibles del EVSE. Siguiendo [24] se presenta la figura desde la sub división del equipo, presentando el cargador, sus subsistemas y sus componentes mantenibles, para ordenar de manera jerárquica y sistemáticamente los activos, una de las observaciones que se presenta es la omisión de las partes, una de las razones es que, a estas por normas de contratos y confiabilidad de los equipos, solo se les realiza mantenimiento correctivo hasta el componente mantenible si este llegara a fallar, pero no se presenta sustitución de partes.

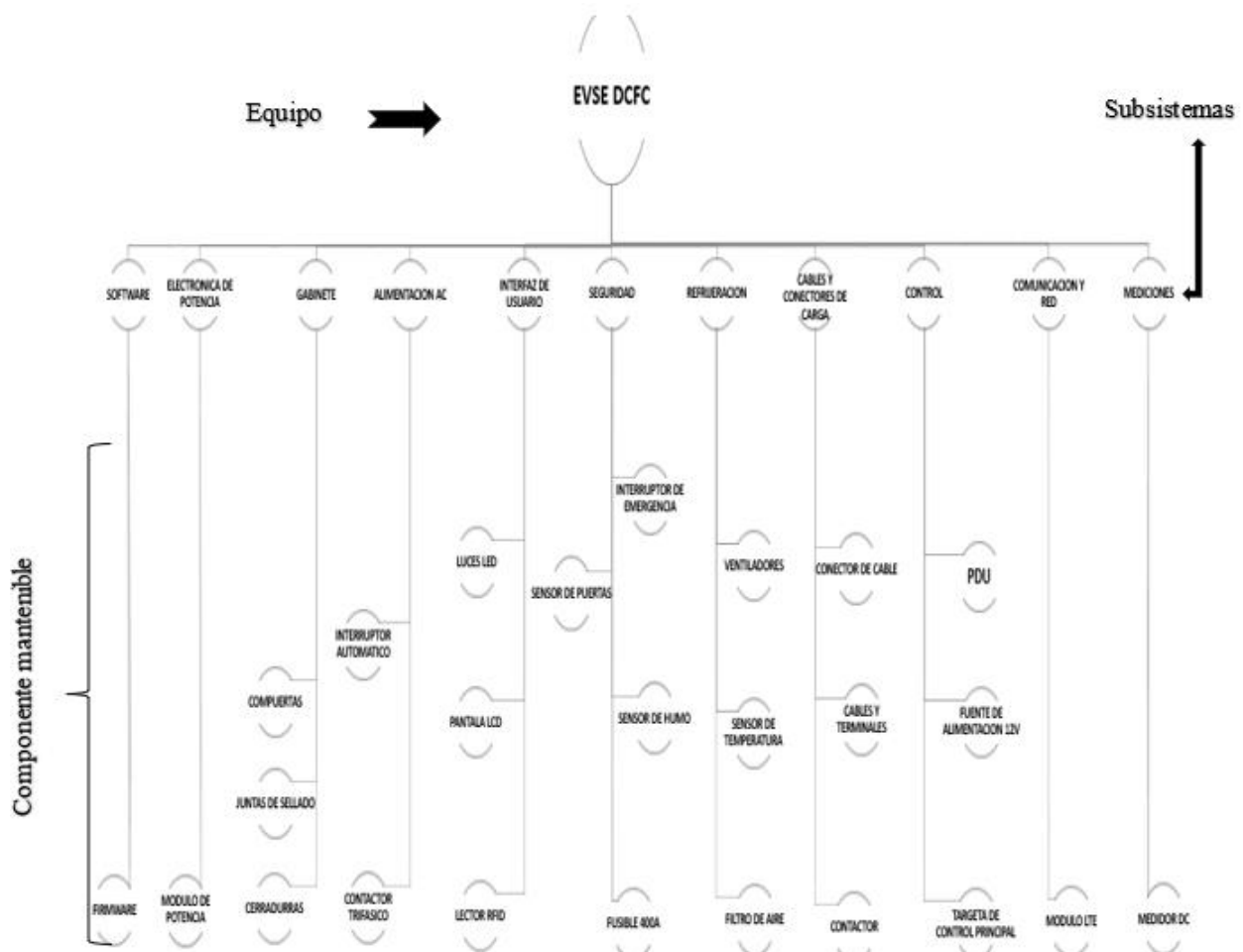


Fig. 4. Taxonomía de EVSE STARCHARGE®

En total se asimila del EVSE 11 subsistemas, los cuales reúnen entre todos 25 componentes mantenibles, estas partes o componentes se reúnen de uno de los equipos más completos que es el TITAN 180 kw, ya que puede variar con menos protecciones dependiendo del modelo. Pero a pesar de ellos todos conservan la misma lógica en su hardware y software.

B. Fase 2: Análisis a equipos de alta criticidad (Matriz de Criticidad)

1) *Análisis a equipos de alta criticidad (Matriz de Criticidad)*: Establecer prioridades de análisis: los equipos que resulten con mayor riesgo deben ser seleccionados para un análisis FMEA posterior.

TABLA VII FALLAS EN LOS EV (2023-2024)

EVSE	N° DE FALLAS
MANDARYSERVIR GB/T 1	10
ZENU GB/T 1	7
LOCALIZA GB/T 1	6
ZENU GB/T 2	6
BAVARIA GB/T 1	6
CONCEPCION GB/T 1	5
POSTOBON GB/T	3
VIA TERRESTRE GB/T 1	3
CONCEPCION CCS1/2	3
BAVARIA GB/T 2	2
TRPEL-LAMONTAÑA GB/T 1	2
TRPEL-CALDAS GB/T 1	2

En esta etapa se identifican los equipos y sistemas críticos dentro de las estaciones de carga StarCharge® instaladas en el Área Metropolitana. La criticidad se define en función del impacto que tendría la falla de un componente sobre la seguridad del personal, el medio ambiente, la continuidad de la operación y los costos operativos.

2) *Definición de criterios de evaluación*: La identificación de estos sistemas se basa en el análisis funcional de cada estación, la revisión de históricos de fallas, y la aplicación de criterios de priorización del RCM, tales como la frecuencia de fallos, la gravedad de sus consecuencias y la capacidad de detección anticipada.

En la presente matriz de criticidad se realiza una encuesta realizada a personas responsables de la operación diaria de los equipos, con el fin de definir los criterios más relevantes para cada cargo, y evaluar las fallas o piezas en la matriz, se realizaron 6 criterios los cuales se pueden apreciar en la tabla 8 de los cuales se descarta uno de acuerdo a su puntaje.

TABLA VIII DEFINICIÓN DE CRITERIOS DE EVALUACIÓN

Sigla	Nombre del Criterio	Definición Técnica Aplicada al Contexto EVSE	Justificación
TDR	Tiempo de Devolución al Servicio	Tiempo total desde la ocurrencia de la falla hasta que el cargador vuelve a operar, incluyendo diagnóstico, logística de repuestos y reparación.	Integra todo el proceso de recuperación funcional. Cargadores con alto TDR tienen un impacto directo en la disponibilidad y confianza del usuario.
IES	Impacto en la Experiencia del Servicio	Nivel en que una falla afecta al usuario final, incluyendo disponibilidad del cargador, tiempos de espera, interrupción del servicio o fallos en el interfaz.	La experiencia de carga (fluidez, disponibilidad, confiabilidad) es clave para la aceptación masiva del vehículo eléctrico.
RPT	Riesgo para el Personal Técnico y Usuario	Probabilidad y severidad de incidentes (eléctricos, mecánicos o térmicos) que puedan afectar al operario o usuario durante la carga.	Los EVSE manejan alta potencia, por lo que se priorizan las fallas con potencial de daño físico (descargas, sobrecalentamientos).
CEC	Costo Económico de la Corrección	Costo total de atención a la falla (mano de obra, transporte, repuestos, horas no facturadas).	Se priorizan fallos cuya reparación implica mayores costos operativos.
DRO	Daño Reputacional Operacional	Impacto de una falla sobre la percepción de confiabilidad de la red EVSE por parte de entidades regulatorias.	Un cargador fuera de servicio por fallas repetidas puede dañar la reputación de la empresa operadora, afectando contratos futuros o confianza del usuario.
IAM	Impacto Ambiental Mantenable	Nivel de contaminación o afectación ambiental generada por la falla o su atención (residuos eléctricos, etc.).	Aunque EVSE no tiene grandes emisiones, algunas fallas pueden provocar incendios. Criterio clave para cumplimiento normativo ambiental y seguridad.

Se entrevistaron 20 personas de diferentes cargos, todos con relación directa a la operación y mantenimiento de los equipos, entre ellos:

- 2 gerentes.
- 3 directores de operación.
- 3 coordinadores de flota.
- 2 supervisores.
- 2 técnicos de mantenimiento.
- 2 operarios de flota
- 5 conductores de plataformas.

Cada participante distribuyó un total de 100 puntos porcentuales entre los seis criterios, según su experiencia y percepción de importancia. Este enfoque de ponderación directa por porcentaje permitió capturar el juicio técnico de cada cargo, evitando que algún criterio quedará excluido (es decir, con 0%), dándole así el valor mínimo permitido 10%. Los datos obtenidos se pueden apreciar en la siguiente.

TABLA IX
VALORES REGISTRADOS EN CRITERIOS DE EVALUACIÓN

Cargo / Nombre	TDR	IES	RPT	CEC	DRO	IAM
(Gte. General)	25%	15%	15%	20%	15%	10%
(GteTécnico)	20%	15%	20%	25%	10%	10%
(Coord. Flota)	20%	20%	20%	20%	10%	10%
(Coord. Flota)	20%	25%	25%	10%	10%	10%
(Coord. Flota)	20%	30%	20%	10%	10%	10%
(Coord. Flota)	25%	30%	15%	10%	10%	10%
(Supervisor)	20%	20%	20%	20%	10%	10%
(Supervisor)	10%	25%	20%	25%	10%	10%
(Opr. Uber)	25%	10%	20%	10%	25%	10%
(Opra Uber)	25%	10%	20%	15%	20%	10%

(Opr. Uber)	20%	25%	25%	10%	10%	10%
(Opr. Uber)	20%	10%	20%	10%	30%	10%
(Opr. Uber)	25%	20%	20%	10%	15%	10%
(Opr. Flota)	30%	15%	20%	10%	15%	10%
(Opr. Flota)	25%	10%	20%	10%	25%	10%
(Téc. Mtto)	30%	20%	20%	10%	10%	10%
(Téc. Mtto)	20%	30%	20%	10%	10%	10%
(Dir. Operaciones)	20%	30%	20%	10%	10%	10%
(Dir. Operaciones)	20%	30%	20%	10%	10%	10%
(Dir. Operaciones)	30%	20%	20%	10%	10%	10%
Total (%)	450%	410%	400%	265%	275%	200%
VALOR EN PESO (%)	23%	21%	20%	13%	14%	10%

Durante el proceso de entrevistas se puede observar que el criterio IAM (Impacto Ambiental) acumuló una ponderación total de 200 puntos (10% promedio por entrevistado), lo que lo posiciona como el criterio de menor importancia relativa frente a los demás.

Esta baja valoración de IAM responde a varios factores:

Baja incidencia ambiental en los eventos de falla: Las fallas típicas en estaciones de carga (como errores de comunicación, cortes eléctricos, fallas en conectores o fuentes de poder) generan mínimos residuos contaminantes o liberaciones al ambiente. Por lo tanto, su impacto ambiental directo es casi nulo.

Ausencia de materiales peligrosos o contaminantes: Los cargadores STARCHARGE® evaluados en este estudio no contienen sustancias tóxicas o residuos líquidos que puedan filtrarse en caso de fallo, lo que disminuye la necesidad de incluir el impacto ambiental como criterio decisivo.

Cumplimiento ambiental ya regulado por otros mecanismos: Las estaciones de carga suelen estar ya sujetas a normativas de instalación eléctrica (como el RETIE en Colombia), que incluyen requerimientos ambientales. Por tanto, se asume que estas condiciones ya están controladas y no dependen de la gestión del activo.

Dado su bajo peso porcentual frente a los objetivos de confiabilidad y disponibilidad, y la nula evidencia de impacto ambiental crítico en los cargadores estudiados, el criterio IAM no será incluido en la matriz de criticidad para este análisis RCM. Su exclusión permite enfocar el análisis en los factores realmente determinantes para la operación, seguridad y economía del sistema.

3) *Niveles de criticidad por criterio y consecuencia:* Una vez obtenido el valor en peso porcentual y su valor asignado a cada criterio por el personal, se determinan los niveles de criticidad según los factores de impacto y consecuencia, tal como se presenta en la Tabla [10](#). Para este análisis, se han establecido tres niveles de criticidad: crítico, semi-crítico y no crítico. El valor total obtenido por cada criterio representa su ponderación crítica, y se divide en tres rangos equitativos con el fin de clasificar cada componente o sistema dentro del nivel correspondiente. De esta manera, se definen umbrales específicos por criterio, los cuales permiten asignar a cada ítem evaluado un nivel de criticidad conforme a su impacto potencial sobre la operación, la seguridad o los costos del sistema.

TABLA X
NIVELES DE CRITICIDAD

Nivel	Tiempo de recuperación funcional	Disponibilidad del equipo	Seguridad del personal	Costo económico	Reputación operacional	Severidad total
Critico	Inhabilitación completa o parcial del cargador por más de 4 semanas.	4,5 Error en la conexión de la Plataforma o señal de Red del equipo inhabilitados por 1 Dia	4,1 descargas eléctricas, quemaduras graves, arcos eléctricos o explosiones menores, con riesgo de muerte o incapacidad permanente.	4 Impactos mayores a \$50.000.000 COP, ya sea por reemplazo total del cargador o por indemnización de daños severos a vehículos (batería, sistema eléctrico, incendio).	2,65 Pérdida de contratos con aliados clave, multas contractuales significativas, demandas legales, o suspensión de licencias operativas por falta de confiabilidad.	2,75 18
Semi-critico	Inhabilitación completa o parcial del cargador entre 2 a 3 semanas.	3,5 Caída de la Plataforma o señal de Red del equipo inhabilitados por 5 horas.	3,1 lesiones moderadas como quemaduras superficiales, cortocircuitos leves, tropiezos por cables expuestos o caídas en zonas húmedas.	3 Costos entre \$10.000.000 y \$50.000.000 COP, que incluyen reparaciones mayores de componentes críticos, compensaciones por interrupciones prolongadas o daños parciales al VE.	1,65 Amonestaciones formales, revisión o renegociación de contratos, pérdida de clientes corporativos, o deterioro de percepción pública con impactos medibles.	1,75 13
No critico	Inhabilitación completa o parcial del cargador menor a una semana.	2,5 Plataforma o señal de Red del equipo inhabilitados 20 min.	2,1 no causan daño físico directo, pero pueden representar riesgos latentes si no se gestionan, como alertas no atendidas o falta de señalización.	2 Costos menores a \$10.000.000 COP, que incluyen reparaciones básicas, recambio de pistolas o componentes auxiliares (pantalla, ventilación,	0,65 Afectación leve y puntual de imagen, sin consecuencias contractuales formales. Posibilidad de recuperación rápida con acciones correctivas	0,75 8

				etc.), o fallas sin daño al usuario.		
--	--	--	--	--------------------------------------	--	--

4) *Matriz de frecuencia*: Esta tabla cruza la severidad total encontrada en la tabla 10, de las consecuencias con la frecuencia u ocurrencia dividida en 3 niveles del modo de falla: n°3 alta probabilidad de ocurrencia; n°2 frecuencia ocasional o media, n°1 baja probabilidad o rara ocurrencia. sirve para determinar qué tan crítico es un modo de falla, y así encontrar los valores de riesgo como se puede apreciar ([ver tabla 11](#)).

TABLA XI
VALORES DE RIESGOS

NIVEL	SEVERIDAD	OCURRENCIA	RIESGO
ALTO	18	3	54
MEDIO	13	2	26
BAJO	8	1	8

Una vez obtenido el valor de riesgo más alto se considera como el límite superior del riesgo alto, y al dividir el valor máximo entre 3 para establecer niveles uniformes ($Nivel = R_{m\acute{a}x} / 3$), se obtiene el límite superior e inferior mostrado en la siguiente ([ver tabla 12](#)).

TABLA XII
LÍMITES DE FRECUENCIA

Nivel de Frecuencia	RANGO %		Interpretación
	LIMITE SUPERIOR	LIMITE INFERIOR	
Alta	54	37	Alta ocurrencia del modo de falla
Media	36	19	Ocurrencia media
Baja	18	0	Modo de falla poco común o eventual

Así, se establece una escala uniforme que facilita la priorización de fallas según su impacto potencial, representándolas visualmente mediante una matriz con códigos de color (verde, amarillo y rojo) para apoyar la toma de decisiones en mantenimiento, como se aprecia en la tabla [13](#).

TABLA XIII
MATRIZ DE FRECUENCIA

3	17	35	54
2	12	26	34
1	8	13	18
RANGO DE INTERVALOS	8	13	18

5) Matriz de riesgo y criticidad

La matriz de riesgo se construye integrando dos componentes: la matriz de consecuencias (o severidad del fallo) y la matriz de frecuencia (probabilidad de ocurrencia). Una vez unidas se analizan los valores dados permitiendo visualizar en qué lugar se encuentra cada criterio, no antes sin evaluar si estos valores de los criterios por su poco tiempo de permanencia y den valores por debajo de la frecuencia entregada en la tabla [14](#), por ende, se busca acomodar este rango de la manera más acorde para poder trabajar con la matriz. ([ver tabla 15](#)).

TABLA XIV
MATRIZ DE RIESGO

NIVEL	TDR	IES	RPT	CEC	DRO	MATRIZ DE CRITICIDAD		
3	4,5	4,1	4	2,65	2,75	17	35	54
2	3,5	3,1	3	1,65	1,75	12	26	34
1	2,5	2,1	2	0,65	0,75	8	13	18

TABLA XV
AJUSTE DE MATRIZ DE RIESGOS

MATRIZ DE CRITICIDAD		
17	30	49
12	26	29
8	13	18

a) *Intervenciones por subsistemas:* Partiendo de la tabla [6](#), se hace una sumatoria de las fallas dividido por subsistemas y así evaluarse en la siguiente matriz esta tabla referencia los subsistemas y la cantidad de intervenciones que se le realizó a cada uno durante el periodo de tiempo (2023,2024), a todos los equipos y analizar así los subsistemas más críticos que presentan más fallas, presentados en la siguiente tabla.

TABLA XVI
FALLAS POR SUBSISTEMAS

Subsistema	N° de intervenciones
Electrónica de potencia (DC)	15
Comunicación y red	14
Cables y conectores de carga	6
Seguridad / protecciones	5
Electrónica de control	4
SOFTWARE	4
Sistema de enfriamiento	3
Interfaz de usuario (HMI)	2
Alimentación AC	1
Medición (contadores)	1

Del análisis de frecuencia de fallas por subsistema en los cargadores rápidos STAR CHARGE®, se concluye que los componentes más críticos desde el punto de vista de mantenimiento, durante el periodo de tiempo 2023 y 2024. Con estos valores se realiza la división de frecuencias de falla en los 3 niveles como se aprecia en la tabla [17](#), donde 3 es la frecuencia alta, dos la ocasional y 1 la baja probabilidad, obtenido los valores se relaciona la tabla 18 para así observar donde se acomoda cada subsistema y sus fallas.

TABLA XVII
FRECUENCIAS POR SUBSISTEMAS

FRECUENCIA ALTA	3	15
OCASIONAL	2	10
RARA OCURRENCIA	1	5

TABLA XVIII
NIVEL DE FRECUENCIAS POR SUBSISTEMAS

Subsistema	N° de intervenciones
Electrónica de potencia (DC)	15
Comunicación y red	14
Cables y conectores de carga	6
Seguridad / protecciones	5
Electrónica de control	4
SOFTWARE	4
Sistema de enfriamiento	3
Interfaz de usuario (HMI)	2
Alimentación AC	1
Medición (contadores)	1

En esta tabla se puede observar que los subsistemas más críticos son la electrónica de potencia (DC) y los sistemas de comunicación y red, con 15 y 14 intervenciones respectivamente en el nivel 3, concentrando la mayor proporción de fallas. Esto indica que estos dos subsistemas presentan una alta carga operativa y son sensibles a las condiciones de uso y entorno, por lo que deben ser analizados en estrategias de mantenimiento predictivo y monitoreo.

En contraste, subsistemas como la alimentación AC, medición e interfaz de usuario (HMI) presentan una baja frecuencia de intervención, lo que puede indicar una mayor confiabilidad o menor exposición operativa directa. Sin embargo, esto no exime su inspección periódica, especialmente en mantenimientos preventivos.

La tendencia general sugiere que los fallos están principalmente asociados a los elementos electrónicos y de comunicación, destacando la necesidad de capacitar al personal técnico en diagnóstico y resolución de fallas en estos sistemas, y mantenimientos en la red y OCPP, así como implementar medidas de protección eléctrica y control de calidad en componentes sensibles.

Una vez analizado los subsistemas se realiza el mismo procedimiento bajo cada pieza con registro de falla en la tabla [19](#) y tabla [20](#).

TABLA XIX
NIVEL DE FRECUENCIA POR PIEZAS O ESTÁNDAR DE COMUNICACIÓN

pieza /sistema	Nº de intervenciones
Módulo de potencia	12
OCPP	6
Operador móvil	6
Conector de carga	5
Contactador	3
Cableado de módulo de potencia	2
CÓDIGOS Tags	2
PDU	2
Interruptor de emergencia	2
Sensor de temperatura	2

Bobina DC	1
INTERRUPTOR	1
FIRMWARE	1
Fuente de alimentación	1
Medidor eléctrico	1
Pantalla LED	1
Parámetros de carga	1
Parámetros de equipo	1
Pila de tarjeta madre	1
RELÉ DE CORTE	1
Sensor de RFID	1

TABLA XX

MATRIZ DE FRECUENCIA POR PIEZAS O ESTÁNDAR DE COMUNICACIÓN

FRECUENCIA ALTA	3	12
OCASIONAL	2	8
RARA OCURRENCIA	1	4

A partir del análisis de frecuencia de fallas por componente, se observa que el módulo de potencia presenta el mayor número de intervenciones (12), lo que lo posiciona como el más crítico dentro de la estructura del cargador, dada su influencia directa sobre el suministro de energía en corriente continua al vehículo. Le siguen en criticidad los módulos relacionados con la comunicación OCPP (6) y el operador móvil (6), evidenciando que los elementos vinculados con el intercambio de datos y control remoto también constituyen puntos sensibles en la operación del sistema.

Componentes como el conector de carga (5) y la Contactador (3) también reflejan una incidencia moderada en las fallas, indicando posibles desgastes físicos o errores por sobrecarga. En contraste, una gran cantidad de elementos presentan una baja recurrencia de fallas (1 o 2 intervenciones), como el sensor RFID, firmware, pantalla LED, Interruptor y otros componentes electrónicos auxiliares. Aunque estos poseen menor impacto estadístico, su análisis no debe ser descartado, especialmente si están asociados a funciones de seguridad o monitoreo.

b) Matriz de criticidad por piezas: Una vez encontrado en qué nivel de frecuencia de falla se encuentra cada una de las piezas con registro histórico de fallas en los cargadores, se realiza la matriz de criticidad reuniendo datos relevantes de las tablas [10](#), [19](#) y [20](#), para así hallar bajo una evaluación de criterios para cada pieza, su RPN y severidad.

RPN es un valor numérico que indica cuán crítico es un riesgo o una falla. Se utiliza para priorizar fallos o modos de falla, ayudando a decidir cuáles deben atenderse primero en un sistema de mantenimiento o mejora de confiabilidad, data de la sumatoria de criterios, ajustando cada valor de acuerdo a los niveles de consecuencia fijados de la tabla [15](#), su severidad data del producto entre el RPN y el nivel de frecuencia en el que se encuentra cada pieza, con este valor se puede hallar la jerarquización de la pieza presente en la siguiente tabla.

TABLA XXI
CRITICIDAD POR PIEZA O ESTÁNDAR DE COMUNICACIÓN

pieza /sistema	TDR	IES	RPT	CEC	DRO	RPN	SEVERIDAD	JERARQUIZACION
Módulo de potencia	3,5	4,1	2	2,65	1,65	13,9	41,7	CRITICO
Conector de carga	4,5	4,1	4	2,65	2,75	18	18	SEMI-CRITICO
PDU	4,5	4,1	3	2,65	2,75	17	17	SEMI-CRITICO
Pantalla LED	3,5	4,1	2	1,65	1,75	13	13	NO-CRITICO
OCPD	2,5	4,1	2	0,65	2,75	12	12	NO-CRITICO
Contactador	4,5	3,1	2	0,65	1,75	12	12	NO-CRITICO
Bobina DC	4,5	3,1	2	0,65	1,75	12	12	NO-CRITICO
Interruptor de emergencia	3,5	2,1	4	1,65	0,75	12	12	NO-CRITICO
Sensor de RFID	3,5	3,1	2	0,65	1,75	11	11	NO-CRITICO
INTERRUPTOR	2,5	3,1	2	0,65	1,75	10	10	NO-CRITICO

Fuente de alimentación	2,5	3,1	2	0,65	1,75	10	10	NO-CRITICO
Medidor eléctrico	2,5	3,1	2	0,65	1,75	10	10	NO-CRITICO
FUSIBLE 400A	2,5	3,1	2	0,65	1,75	10	10	NO-CRITICO
Cableado de módulo de potencia	2,5	2,1	3	0,65	0,75	9	9	NO-CRITICO
Sensor de temperatura	2,5	2,1	3	0,65	0,75	9	9	NO-CRITICO
Operador móvil	2,5	2,1	2	0,65	0,75	8	8	NO-CRITICO
CODIGOS Tags	2,5	2,1	2	0,65	0,75	8	8	NO-CRITICO
FIRMWARE	2,5	2,1	2	0,65	0,75	8	8	NO-CRITICO
Parámetros de carga	2,5	2,1	2	0,65	0,75	8	8	NO-CRITICO
Parámetros de equipo	2,5	2,1	2	0,65	0,75	8	8	NO-CRITICO
Pila de tarjeta madre	2,5	2,1	2	0,65	0,75	8	8	NO-CRITICO

6) *Prioridad de análisis:* Para el desarrollo del análisis de Modos y Efectos de Falla (FMEA) del cargador rápido STAR CHARGE®, se ha priorizado aquellos componentes y subsistemas cuya falla representa el mayor riesgo operativo, de seguridad y económico. La selección se basó en el cálculo del Número de Prioridad de Riesgo (RPN), la Severidad de sus consecuencias y la Jerarquización establecida a partir de la frecuencia histórica de intervenciones y el impacto potencial:

E.1. Módulo de potencia

RPN más alto (13,9) y Severidad crítica (41,7) lo convierten en el elemento de máxima prioridad. Su falla detiene completamente el suministro de corriente continua, compromete la seguridad eléctrica (riesgo de sobrecalentamiento o incendio) y genera costos de reemplazo muy elevados.

E.2. Conector de carga y PDU

Ambos reportan RPN elevados (18 y 17) y son semí-críticos en severidad. El conector es la interfaz directa con el vehículo: su falla implica riesgo de arco eléctrico al desacoplarse bajo tensión. La PDU (unidad de distribución) distribuye y protege la energía interna; si falla, puede dañar múltiples submódulos de potencia.

E.3. Componentes no-críticos (pantalla LED, OCPP, Contactor, bobina DC, seguros, sensores, etc.)

Presentan RPN y severidades inferiores; su fallo interrumpe funciones auxiliares (interfaz de usuario, comunicación, protecciones secundarias) pero no detiene el sistema completo.

C. Fase 3: Análisis de Modos y Efectos de Falla (FMEA)

1) *Análisis FMEA*: Las preguntas planteadas al sistema se le realizan por medio de tablas a cada uno de los 11 subsistemas del equipo, 25 componentes mantenibles, esto ayuda de manera sistemática para analizar y evaluar cada uno de los tipos de falla presentes que puede tener el componente mantenible, y así de manera proactiva, según SAE JA1011 darle un correcto seguimiento y mantenimiento al activo.

Para ello se parte de las funciones que realiza cada uno de los componentes mantenibles dentro del subsistema, como realiza su función de manera clara, expresándolo por medio de un verbo un objeto y su estándar de desempeño, reuniendo así un total de 53, ya que cada componente puede llegar a cumplir de 2 a 5 funciones, como se puede apreciar en el siguiente recorte del anexo [1](#), donde se muestra las funciones del subsistema de alimentación AC.

TABLA
XXII RECORTE DE FUNCIONES DE COMPONENTES MANTENIBLES

SUBSISTEMA	PIEZA	VERBO	OBJETO	ESTÁNDAR DE DESEMPEÑO
ALIMENTACIÓN AC	INTERRUPTOR AUTOMÁTICO	Permitir	Paso de corriente de alimentación AC	(280 – 400) A
		Interrumpir	Corriente de sobrecarga	(420 – 520) A
		Interrumpir	Corriente de cortocircuito	(2000 – 4000) A
		Detectar	Corriente de fuga a tierra	(0,03 – 1,00) A
	CONTACTOR TRIFÁSICO	Permitir	Paso de corriente de alimentación AC	(280 – 400) A
		Liberar	Núcleo magnético	(0 – 165) V AC
		Soportar	Corriente de arranque	(2400 – 4000) A
	PDU	Distribuir	Potencia eléctrica a módulos y auxiliares	(0 – 1000) A
		Aislar	Circuitos en caso de fallo	(0 – 1) s de tiempo de aislamiento

2) *Identificación y evaluación de los posibles modos de falla y sus efectos en los equipos:* En este ítem se realizará la identificación y evaluación sistemática de los posibles modos de falla para cada uno de los subsistemas del cargador rápido DC STAR CHARGE® (60 kW a 180 kW), siguiendo la metodología del RCM establecida en las normas SAE JA1011 y JA1012.

El proceso consiste en: Con la definición de funciones principales de cada subsistema en condiciones normales de operación dadas en la fase 1, clasificar los modos de falla en cuatro categorías según su manifestación:

- Fallas funcionales por encima: condiciones superiores del rango de operación esperado.
- Fallas funcionales por debajo: condiciones inferiores del rango de operación esperado.
- Fallas funcionales intermitentes: ocurren de forma esporádica o variable.
- Fallas funcionales totales: pérdida completa de la función.

Se identificaron 157 modos de falla para cada uno de los componentes mantenibles del EVSE, de los cuales se parte para esclarecer y describir cada uno de ellos, al realizar un por que puede suceder o a que se le debe la causa raíz de cada falla, para este se utiliza un objeto, un adjetivo y un participio, con un lenguaje claro, considerando factores eléctricos, mecánicos, electrónicos, ambientales y humanos.

En la siguiente tabla se muestra cómo se realiza el proceso, utilizando todas las posibles fallas funcionales para dicha función, del componente mantenible solo si aplica, ya que algunas

fallas funcionales por encima o por debajo, no son tomadas en cuenta, pues al componente prestar su función fuera del rango puede ser físicamente imposible o ser tomado como un beneficio así sea fuera de lo requerido, el proceso completo para cada modo de falla se puede ver en el anexo 1.

TABLA XXIII
RECORTE DE ANEXO 1; FMEA MP, MODOS DE FALLA

PIEZA	FUNCIÓN COMPLETA	MODO DE FALLA	JUSTIFICACIÓN TÉCNICA	OBJETO	ADJETIVO CALIFICATIVO/ PARTICIPIO PASIVO	CAUSA RAÍZ ¿POR QUÉ?	MODO DE FALLA
ELECTRÓNICA DE POTENCIA DC MODULO DE POTENCIA DC	Convertir energía AC en energía DC manteniendo la tensión de salida en el rango (200 – 1000) Vdc	TOTAL	No convierte energía AC en energía DC.	Rectificador	Quemado	Debido a sobrecalentamiento	Rectificador quemado debido a sobrecalentamiento
				Módulo convertidor	Quemado	Debido a sobre corriente	Módulo convertidor quemado debido a sobre corriente
				Controlador de tensión	Desprogramado	Debido a fallo de firmware	Controlador de tensión desprogramado debido a fallo de firmware
				Filtro DC	Roto	Debido a vibración mecánica	Filtro DC roto debido a vibración mecánica
				Conector de entrada	Sulfatado	Debido a humedad	Conector de entrada sulfatado debido a humedad
		POR ENCIMA	Convierte energía AC en energía DC manteniendo la tensión de salida por encima de 1000 Vdc.	Controlador de tensión	Descalibrado	Debido a manipulación indebida	Controlador de tensión descalibrado debido a manipulación indebida
				Sensor de voltaje	Saturado	Debido a interferencia electromagnética	Sensor de voltaje saturado debido a interferencia electromagnética
				Rectificador	Desajustado	Debido a expansión térmica	Rectificador desajustado debido a expansión térmica

			Filtro DC	Obstruido	Debido a acumulación de polvo	Filtro DC obstruido debido a acumulación de polvo
			Transformador	Sobreexcitado	Debido a sobretensión de entrada	Transformador sobreexcitado debido a sobretensión de entrada
POR DEBAJO	Convierte energía AC en energía DC manteniendo la tensión de salida por debajo de 200 Vdc.		Controlador de tensión	Descalibrado	Debido a deriva térmica	Controlador de tensión descalibrado debido a deriva térmica
			Sensor de voltaje	Desgastado	Debido a envejecimiento	Sensor de voltaje desviado debido a envejecimiento
			Rectificador	Debilitado	Debido a corrosión interna	Rectificador debilitado debido a corrosión interna
			Filtro DC	Dañado	Debido a descarga eléctrica	Filtro DC dañado debido a descarga eléctrica
			Transformador	Parcialmente en corto circuito	Debido a sobrecalentamiento repetitivo	Transformador parcialmente en corto circuito debido a sobrecalentamiento repetitivo
INTERMITENTE	Convierte energía AC en energía DC por encima y por debajo del rango en periodos superiores a 1 día.		Rectificador	Bloqueado parcialmente	Debido a suciedad en contactos	Rectificador bloqueado parcialmente debido a suciedad en contactos
			Sensor de voltaje	Intermitente	Debido a falso contacto	Sensor de voltaje intermitente debido a falso contacto
			Módulo convertidor	Inestable	Debido a variaciones de red	Módulo convertidor inestable debido a variaciones de red
			Filtro DC	Suelto	Debido a fijación defectuosa	Filtro DC suelto debido a fijación defectuosa

			Controlador de tensión	Oscilante	Debido a interferencia electromagnética	Controlador de tensión oscilante debido a interferencia electromagnética
Mantener temperatura en semiconductores en el rango (0 – 85) °C	TOTAL	No mantiene la temperatura en semiconductores.	Ventilador de refrigeración	Estático	Debido a corto del motor	Ventilador de refrigeración averiado debido a fallo del motor
			Disipador térmico	Obstruido	Debido a acumulación de polvo	Disipador térmico obstruido debido a acumulación de polvo
			Sensor de temperatura	Desconectado	Debido a rotura de cableado	Sensor de temperatura desconectado debido a rotura de cableado
			Controlador térmico	Quemado	Debido a sobretensión	Controlador térmico quemado debido a sobretensión
			Ventilador de refrigeración	Desgastado	Debido a uso prolongado	Ventilador de refrigeración desgastado debido a uso prolongado
	POR ENCIMA	Mantiene la temperatura en semiconductores por encima de 85 °C.	Disipador térmico	Desajustado	Debido a montaje incorrecto	Disipador térmico desajustado debido a montaje incorrecto
			Sensor de temperatura	Descalibrado	Debido a envejecimiento	Sensor de temperatura descalibrado debido a envejecimiento
			Pasta térmica	Secada	Debido a envejecimiento del material	Pasta térmica secada debido a envejecimiento del material
			Conducto de aire	Bloqueado	Debido a objeto extraño	Conducto de aire bloqueado debido a objeto extraño
	INTERMITENTE	Mantiene la temperatura en semiconductores	Ventilador de refrigeración	Intermitente	Debido a falso contacto eléctrico	Ventilador de refrigeración intermitente debido a

			por encima y por debajo del rango en periodos superiores a 1 día.				falso contacto eléctrico
				Sensor de temperatura	Inestable	Debido a vibraciones	Sensor de temperatura inestable debido a vibraciones
				Disipador térmico	Flojo	Debido a tornillos sueltos	Disipador térmico flojo debido a tornillos sueltos
				Controlador térmico	Oscilante	Debido a mal ajuste de control PID	Controlador térmico oscilante debido a mal ajuste de control PID
				Fuente de alimentación	Variable	Debido a fluctuaciones de red	Fuente de alimentación variable debido a fluctuaciones de red

3) *Definición de efectos de falla, consecuencias:* Una vez ya identificado cada uno de los modos de falla vistos en el anexo [1](#), estos en su contexto dará un indicio de que efecto a cierto nivel de detalle puede causar una “consecuencia” positiva o negativa de la ocurrencia de un evento, y se trata con la siguiente información:

Es evidente o no para el operario, cual puede ser su nivel de criticidad mientras se encuentra la falla, que puede causar ya sea al ambiente, al operario o al tener un efecto adverso en la carga a los vehículos, así mismo si realiza algún daño físico al equipo y por último que se debe realizar para restaurar la función del sistema después de y cuánto tiempo puede tardar en la misma restauración, si es cuestión de horas, días o tal vez semanas dependiendo de la necesidad. Todos los efectos son detallados con la misma estructura como se puede apreciar en el siguiente recorte de la Tabla FMEA MP del anexo [1](#) siguiendo la misma lógica para cada uno de los 157 modos de falla.

TABLA XXIV
 RECORTE ANEXO 1; FMEA MP, EFECTOS DE FALLA

MODO DE FALLA	EFECTO DE FALLA
Rectificador quemado debido a sobrecalentamiento	Evidente para el operario, ante disparos concurrentes del cargador, crítico a nivel operativo, el operario intenta realizar la carga con éxito de interfaz de conexión vehículo-cargador, una vez enviada la carga inicial, se emite señal de bloqueo y paro de equipo. Reparación por medio de programación, activando el cargador bajo los módulos operativos. Tiempo de 2 horas en configurar el equipo, y >3 semanas si requiere compra e instalación del módulo en falla
Controlador de tensión desprogramado debido a logs de firmware	Evidente para el operario y semi-crítico en la operación, ya que el equipo permanece bloqueado y cada vez que se le intenta realizar una conexión con vehículo, rechaza la carga dejando inoperativo el equipo, hasta la programación correcta del firmware, bajo los módulos de potencia con los que opera el EVSE, no implica riesgos para el operador, solo pérdida de tiempo en la operación hasta que el técnico pueda parametrizar el equipo, tiempo de reparación 1 hora.
Conector de entrada sulfatado debido a humedad	No es evidente para el operario, y semi-crítico, se inicia la carga de manera correcta y el operario confía de una correcta conexión con cargador -vehículo, al pasar contados minutos, el módulo en falla lanza señal de error y bloquea la carga disparando el conector de carga, imposibilitando cada intento que se realiza la conexión, inhabilitando el equipo completo y pérdida de tiempos de operación, esto tarda en activar el cargador bajo los módulos operativos 1 hora y 1 semana en reparar las entradas del conector
Controlador de tensión descalibrado debido a manipulación indebida	El operario evidencia una temperatura elevada en las salidas de ventilación de los módulos de potencia, riesgo semi-crítico, y posibles disparos al alcanzar la temperatura Max permitida dentro de la cámara de los módulos de potencia, posibles sobrecalentamientos y envejecimiento prematuro de la electrónica y los módulos, daños a futuro en la salida DC de los equipos elevados, tiempo de reparaciones 30 min
Sensor de voltaje saturado debido a interferencia electromagnética	No es evidente para el operario, riesgo alto de daño de semiconductores y disparos por OVP; operaciones afectadas por paros del cargador, sesiones y eventos repetidos en el registro; daño físico por estrés dieléctrico en condensadores DC-link y picado en barras y terminales; restauración con blindaje y filtrado EMI, re-torque de tierras, reemplazo del sensor y recalibración, verificación con inyección y prueba bajo carga; tiempo 4-12 horas o 2-5 días si requiere placa o módulo.

De igual manera y en el mismo cuadro del anexo 1, hojas de FMEA, se continúa definiendo las consecuencias que puede conllevar este modo de falla, evidenciando si este presenta un impacto a la seguridad (SFRY), al medio ambiente (MA), consecuencias operacionales (OPR) o no operacionales (NO-OPR). Esta selección se realiza con un si (S) o no (N).

Estas consecuencias ayudan a identificar la decisión lógica para tomar medidas que deben adoptarse para eliminar o mitigar dichas consecuencias, que son causadas al cargador, estas se realizan por medio del árbol lógico de decisión RCM, la cual, siguiendo un algoritmo, permite identificar fácilmente la actividad o medida, ya sea tarea a condición, reacondicionamiento cíclico, sustitución cíclica, búsqueda de falla o inspección, rediseño o en su defecto ningún mantenimiento, algunas de estas pueden traer dos o más tareas de mantenimiento.

Una vez seleccionadas se busca elegir la política de gestión adecuada y así terminar enlazando el riesgo con la tarea, las cuales son; Mantenimiento preventivo (PM), mantenimiento basado en condición (CBM), operar hasta la falla (RTF), mantenimiento redundante (RED), mantenimiento modificado (MOD).

En el siguiente recorte de la tabla 25 se puede observar la forma en que se trató la selección de estos ítems de trabajo.





TABLA XXV
RECORTE ANEXO 1; FMEA MP, CONSECUENCIAS DE FALLA

EFECTO DE FALLA	Nivel de consecuencia			Consecuencia de falla				Tarea a condición	Reacondicionamiento cíclico	Sustitución cíclica	Búsqueda de falla o inspección	Tareas por defecto		P M	C B M	R T F	R E D	M O D
	No crítico	Semi-crítico	Crítico	SFRY	MA	OPR	NO-OPR					Rediseño	Ningún mantenimiento					
	Evidente para el operario, ante disparos concurrentes del cargador, crítico a nivel operativo, el operario intenta realizar la carga con éxito de interfaz de conexión vehículo-cargador, una vez enviada la carga inicial, se emite señal de bloqueo y paro de equipo. Reparación por medio de		X		N	N	S						X					





requiere no solo del conocimiento de los modos y efectos de falla identificados a través del análisis FMEA, sino también de los medios técnicos, metodológicos y de gestión que permitan ejecutarlas con eficacia.

Definir estas herramientas permite garantizar que las propuestas de mantenimiento no se formulen de manera abstracta, sino que estén soportadas en capacidades reales de medición, análisis y seguimiento. Además, asegura la trazabilidad de la información, la correcta interpretación de los resultados y la viabilidad técnica de las acciones planteadas, estas herramientas se presentan en la siguiente tabla.

TABLA XXVII.
HERRAMIENTAS NECESARIAS PARA EL PLAN DE MTT0

N°	Herramientas	Uso	Ejemplo
1	Portátil	Configuración de ajustes y lectura de registros	
2	Cable ethernet	Configuración de web	
3	J-link	Programación	
4	Tarjeta TF y lector	Programación	

5	Tarjeta USB	Programación	
6	Juego de destornilladores	Montaje, desmontaje y ajuste	
7	Juego de llaves	Montaje, desmontaje y ajuste	
8	Llave de tubo	Montaje, desmontaje y ajuste de prensa estopa	
9	Multímetro	Medición eléctrica	
10	Megometro	Prueba de aislamiento	
11	Cámara termográfica	Medición de temperatura	
12	Pinza amperimétrica	Medición de intensidad de corriente eléctrica	

13	Etiquetas de bloqueo y candados	Bloquear fuentes de energías durante el mantenimiento.	
14	Kit de limpieza	Mantener integridad eléctrica	
15	Soplador	Mantener integridad eléctrica de polvo	
16	EPPS	Implementos de seguridad	

1) *Propuestas de mantenimiento:* Al reunir el contexto operativo de los equipos que operan en la zona de Antioquia, se aprecia los entornos altamente demandantes en algunas zonas, las fallas que se han presentado en el transcurso de los años 2023 y 2024, los tiempos que tardan en volver a brindar al cliente el estándar de desempeño operacional de los EVSE, ya que la necesidad del cliente final es prioridad brindar una mayor disponibilidad (Aprox $\geq 99,5$). Aunque las rutinas de mantenimiento preventivo suelen establecerse en ciclos semestrales como se vienen realizando por VOUMGRUP, una de las sugerencias ante esta implementación de plan de mantenimiento es intensificar los mantenimientos a cada equipo de manera trimestral, de esta manera tener un seguimiento más completo de los equipos y su función a lo largo del tiempo, de esta manera se propone el siguiente cronograma como se puede apreciar en la tabla [28](#).

TABLA XXVIII
PROPUESTA DE NUEVO CRONOGRAMA DE MTTO

CRONOGRAMA DE MANTENIMIENTOS														
ESTACIÓN	# DE EVSE	TÉCNICO	ENE	FEB	MAR	ABR	MAY	JUN	JUL	AGO	SEPT	OCT	NOV	DIC
CERVECERIA UNION	2	MTTO	■			■			■			■		
ZENU	2	MTTO	■			■			■			■		
BAVARIA ENVIGADO	1	MTTO	■			■			■			■		
MANDARY SERVIR	1	MTTO		■			■			■			■	
LOCALIZA	1	MTTO		■			■			■			■	
LA PINTADA	2	MTTO		■			■			■			■	
VIA TERRESTRE	1	MTTO			■			■			■			■
POSTOBONITAGUI	1	MTTO			■			■			■			■
ANCOSUR	1	MTTO			■			■			■			■
LA MONTAÑA	2	MTTO			■			■			■			■

De igual forma es técnica y operacionalmente recomendable establecer una rutina de inspección visual y funcional mensual, como complemento para mantener la integridad del sistema, anticipar fallas, maximizar el tiempo de operación efectiva y minimiza el riesgo legal o de responsabilidad de contratos.

Con esta inspección podemos verificar una integridad a las piezas mantenibles que están sujetos a micro degradaciones progresivas que pueden no manifestarse inmediatamente como fallas, pero que sí presentan síntomas visuales o comportamientos anómalos detectables a través de inspecciones simples, como:

- Conectores flojos, sucios o con pines desgastados.
- Ruidos anómalos de ventiladores (indicio de fallos de enfriamiento).
- Pantallas apagadas, congeladas o con bajo brillo.
- Señalización LED anormal o códigos de error visibles.
- Olor a quemado, vibraciones, o calentamiento excesivo al tacto.

Una de las observaciones según el manual del fabricante son las evidencias fotográficas por ende en el presente trabajo se opta por continuar con la app “SafetyCulture” ya que esta se presta como una buena herramienta para llevar seguimiento, estandarización y reportes para lo planteado.

De acuerdo con esto se plantea la inspección mensual a los equipos en Antioquia en la siguiente tabla.

TABLA XXIX
INSPECCIONES MENSUALES A EVSE STARCHARGE®

INSPECCION MENSUAL STARCHARGE®				
ZONA:		Nombre del técnico:		
CLIENTE:		Fecha:		
CONTENIDO	INSPECCION O ACTIVIDAD A REALIZAR	check list	Añadir fotos	Añadir comentarios
		SI/NO		
Verificación de zona exterior y zona de parqueo	Se encuentra un cartel o lamina con instrucciones de carga para el operador.			
	Se encuentra un extintor de incendios cerca del cargador.			
	Hay algún material inflamable, explosivo u peligroso cerca del cargador.			
	Se encuentra limpio la zona sin: aceite, polvo o humedad.			
	Se encuentra en buen estado la base, soporte y cubierta del cargador.			
	No se encuentran zonas bajas con inundaciones cerca del cargador.			
	Se encuentra correctamente demarcada la zona de carga.			
	Se encuentra en buen estado el tope vehicular o poste de la zona que carga.			
	Se encuentran todas las señales de advertencia de rayos y palabras de peligro eléctrico completas			
Subsistema	Pieza			
Gabinete	Compuertas	La superficie se encuentra lisa, sin (daños mecánicos, deformaciones o oxidación)		
	Cerraduras	Se encuentran en buen estado las chapas sin muestras de forcejeo		
		Se pueden abrir y cerrar el equipo normalmente		
	Juntas de sellado	Se encuentran en buen estado los empaques de las puertas.		
Ajustar todos los empaques del cargador.				
Alimentación AC	Interruptor automático	Se encuentra bien la integridad del Interruptor sin (grietas, decoloración, deformaciones u oxidación)		
		Tiene presencia de ruidos o vibraciones anormales		
		La tensión de entrada se encuentra dentro de los valores normales (350V-430V)		
	Contactor trifásico	Se encuentra bien la integridad del contactor sin (grietas, decoloración, deformaciones o oxidación)		

	PDU	Se encuentra bien la integridad del PDU sin (grietas, decoloración, deformaciones o oxidación)			
Electrónica de potencia	Módulos de potencia	Todos los módulos de potencia encienden normalmente			
		Se encuentra en buen estado las conexiones de entrada y salida de los módulos			
		Todos los ventiladores de los módulos encienden normalmente (No hay presencia de señales LED rojas).			
Cables y conectores de carga	Conector de carga	Se encuentra en buen estado sin golpes ni grietas la pistola de carga.			
		Se encuentra en buen estado sin grietas o muestras de jalones en la prensa estopa el cable de la pistola.			
		No hay señales de oxidación u olores a quemado en los pines internos de la pistola.			
	Cables de señal	Se encuentran en buen estado todos los cables de señal sin (muestras de cortos, sulfatados o sueltos)			
Enfriamiento	Filtro de aire	Se encuentra en buen estado el filtro de aire del cargador sin (rasgones, humedades o suelto)			
	ventiladores	Todos los ventiladores encienden normalmente y están bien asegurados a su base.			
		Hay presencia de algún ruido extraño o vibración anormal en los ventiladores.			
Interfaz de usuario	Pantalla LCD	Enciende normalmente la pantalla LCD y es visible para el operario.			
		Se pueden configurar los parámetros de carga.			
	Lector RFID	Realiza correcta lectura de tags o tarjeta el sensor RFID.			
Comunicación y red	Red	Tiene señal el equipo y cuenta con respaldo de datos.			
Seguridad y protecciones	Sensor de puerta.	Enciende la señal de advertencia cuando se abre la puerta del equipo.			
	Interruptor de emergencia	Enciende la señal de advertencia y corte de corriente cuando se presiona el botón de emergencia			
	Sensor de humo	Se encuentra bien la integridad del sensor de humo sin (grietas, decoloración, deformaciones o oxidación)			
software	firmware	El equipo cuenta con la última actualización de firmware.			

Teniendo un historial base y realizando las inspecciones mensuales a los equipos en un aproximado de tiempo para realizar la check list de 30 a 45 min, todo será documentado en la app, para luego ser descargado y enviado al cliente.

E. Cronograma de actividades

TABLA XXX
CRONOGRAMA DE ACTIVIDADES

ACTIVIDAD	MES					
	Mar.	Abr.	May.	Jun.	Jul.	Ago.
Recolección y Análisis de Datos Históricos.	■	■	■	■	■	■
Análisis a equipos de alta criticidad (Matriz de criticadas).	■	■	■	■	■	■
Análisis de Modos y Efectos de Falla (FMEA).	■	■	■	■	■	■
Diseño de Estrategias de Mantenimiento.	■	■	■	■	■	■

F. Presupuesto estimado

El presupuesto estimado con usos de software, gastos de energía, datos móviles, y personal (asesor de proyecto y estudiante), se valoriza en un costo de dos salarios mínimos vigentes (peso colombiano).

V. RESULTADOS

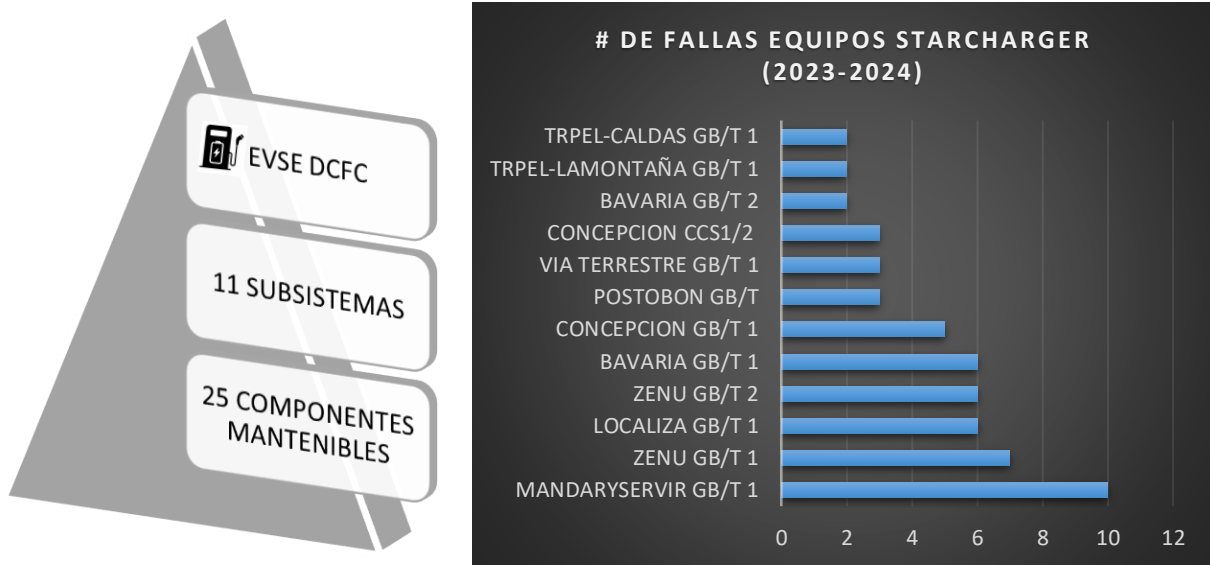


Fig. 5. Resultados fase 1

Se consolidaron los datos históricos de fallas de los 12 equipos StarCharge® (2023–2024), organizando la información de 11 subsistemas y 25 componentes mantenibles bajo la taxonomía de la norma ISO 14224, lo que permitió clasificar de manera estandarizada los activos y sus modos de falla. El análisis mostró mayor recurrencia de incidentes en las estaciones Mandar y servir (10 fallas) y Zenú GB/T1–T2 (6 fallas cada una), frente a ubicaciones como Terpel con solo 2 eventos, identificando así los puntos críticos de indisponibilidad. Esta estructuración permitió trazabilidad, coherencia en la base de datos para orientar decisiones de mantenimiento preventivo y predictivo, junto con las entrevistas, realizadas al personal evaluando los criterios las cuales se presentan en la siguiente figura [12](#).

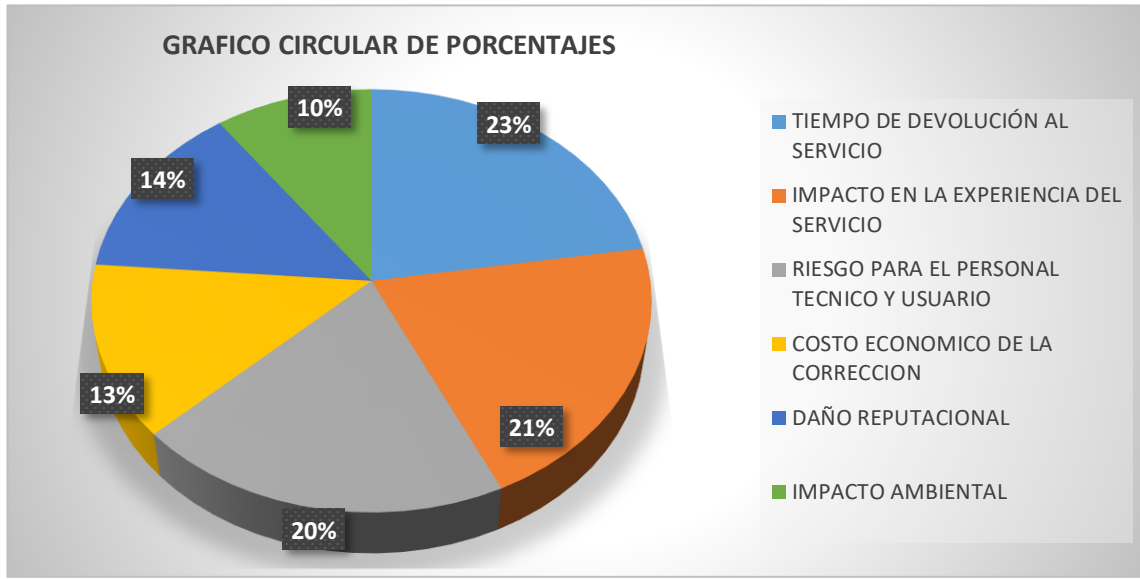


Fig. 6. Porcentajes evaluados de criterios de evaluación

Demostrando que, para todo el personal u operario, siempre será primordial la disponibilidad del equipo, el tiempo que tarda la empresa o el técnico en volver a poner el cargador en puesta en marcha, de esto se concluye con una tabla de criticidad y otra donde se muestra la severidad, representando los componentes más críticos que paran el cargador he imposibilitan la carga al operario en el lapso de tiempo, los cuales se pueden ver a continuación en la siguiente lista del componente con su número de fallas y criticidad.



Fig. 7. Resultados de criticidad de piezas

Con este listado damos a saber los componentes mantenibles a los que se les dará una importancia mayor en el mantenimiento, y así continuar con la serie de funciones, de cada componente mantenible y sus modos de falla, en esta fase se dieron los siguientes resultados, para el conjunto de componentes del EVSE.

NIVEL DE CONSECUENCIA			CONSECUENCIA DE FALLA				TAREA A CONDICION	REACONDICIONAMIENTO CICLICO	SUSTITUCION CICLICA	BUSQUEDA DE FALLA O INSPECCION	REDISENO	NINGUN MANTENIMIENTO					
NO CRITICO	SEMI-CRITICO	CRITICO	SFRY	MA	OPR	NO-OPR							PM	CBM	RTF	RED	MOD
98	398	180	79	2	516	80	94	365	21	264	15	34	373	41	245	3	11



Fig. 8. Resultados cuantitativos del FMEA

- 373 mantenimientos preventivos
- 41 mantenimientos a condición
- 245 operar hasta la falla
- 3 mantenimiento redundante
- 11 mantenimiento modificado

Este es un conteo general ya que un componente mantenible puede tener la misma actividad de mantenimiento que otro componente, ya que sus modos de falla pueden derivarse o dar su causa raíz si han de depender los componentes uno del otro. Una vez realizada la comparación total de estas actividades y reunir las en un plan de mantenimiento se puede apreciar en la siguiente tabla.

TABLA XXXI
PROPUESTA DE MANTENIMIENTOS TRIMESTRALES STARCHARGE®

MANTENIMIENTO STARCHARGE®			Tamaños de tornillos		Par de apriete	
					N-m	lbf/in
ZONA:		Nombre del técnico:	M3	0,8	7,1	
CLIENTE:		Fecha:	M4	1,2	10,6	
NOTA: El cargador debe mantenerse a conformidad con el siguiente contenido, todo tipo de situaciones o fallas In situ deben reflejarse en el informe de la app "SaferyCulture" que se compone de fotos y videos. Requisitos de las imágenes: Una foto de la estación, varias fotos del cargador antes de la limpieza y después de la limpieza, si el cargador presenta anomalías, fotos antes y después de la reparación con su respectiva fecha.			M5	3,3	29,2	
			M6	5,5	48,7	
			M8	13,5	119,5	
			M10	27	239	
			M12	45,0	398,3	
CONTENIDO	INSPECCION O ACTIVIDAD A REALIZAR		check list		Añadir fotos	Añadir comentarios o valor
			SI	NO		
Verificación de zona exterior y zona de parqueo	Se encuentra un cartel o lamina con instrucciones de carga para el operador.					
	Se encuentra un extintor de incendios cerca del cargador.					
	Hay algún material inflamable, explosivo u peligroso cerca del cargador.					
	Se encuentra limpio la zona sin: aceite, polvo o humedad.					
	Se encuentra en buen estado la base, soporte y cubierta del cargador.					
	No se encuentran zonas bajas con inundaciones cerca del cargador.					
	Se encuentra correctamente demarcada la zona de carga.					
	Se encuentra en buen estado el tope vehicular o poste de la zona que carga.					
	Se encuentran todas las señales de advertencia de rayos y palabras de peligro eléctrico completas					
	La placa de identificación esta completa, correcta y firme					
Subsistema	Pieza					
Gabinete	Compuertas	La superficie se encuentra lisa, sin (daños mecánicos, deformaciones u oxidación)				
	Cerraduras	Se encuentran en buen estado las chapas sin muestras de forcejeo				
		Se pueden abrir y cerrar el equipo normalmente				
	Juntas de sellado	Se encuentran en buen estado los empaques de las puertas.				
Ajustar todos los empaques del cargador.						
Alimentación AC	Interruptor automático	Se encuentra bien la integridad del Interruptor sin (grietas, decoloración, deformaciones o oxidación)				
		Tiene presencia de ruidos o vibraciones anormales				
		La tensión de entrada se encuentra dentro de los valores normales (350V-430V)				
		Se puede accionar el mecanismo de apertura y cierre sin problemas ni atascamiento.				
		Cumple la función de bloqueo al presionar el botón de TEST del diferencial				
Verificar par apriete de bornes y conexiones de alimentación						

Control	Contactor trifásico	Se encuentra bien la integridad del contactor sin (grietas, decoloración, deformaciones u oxidación)				
		Permite accionar mecánicamente el contactor sin dificultad				
		Verificar par apriete de bornes de potencia y control				
	PDU	Se encuentra bien la integridad del PDU sin (grietas, decoloración, deformaciones u oxidación)				
Verificar par apriete de bornes de entrada y salida						
Electrónica de potencia	Módulos de potencia	Todos los módulos de potencia encienden normalmente				
		Se encuentra en buen estado las conexiones de entrada y salida sin (cables sulfatados y/o quemados).				
		Todos los ventiladores de los módulos encienden normalmente (No hay presencia de señales LED rojas).				
		Verificar par apriete de tornillos de sujeción				
		Al realizar prueba termográfica IR bajo carga se encuentra en el rango (40° a 90°) C				
Cables y conectores de carga	Conector de carga	Se encuentra en buen estado sin golpes ni grietas la pistola de carga.				
		Se encuentra en buen estado sin grietas o muestras de jalones en la prensa estopa el cable de la pistola.				
		No hay señales de oxidación u olores a quemado en los pines internos de la pistola.				
		Hay continuidad de las líneas (DC+ Y DC-) de cada pistola.				
		Realizar prueba termográfica al conector de carga (30 a 55) °C				
		Verificar par apriete de tornillos de sujeción				
		Verificar par apriete de la prensa estopa (12N.m)				
	Cables de señal	Se encuentran en buen estado todos los cables de señal sin (muestras de cortos, sulfatados o sueltos)				
contactor DC BYD	Medir resistencia de aislamiento entre contactos principales ($\geq 100M\Omega$).					
	Medir resistencia de contacto mV drop test ($\geq 0,5m\Omega$)					
Enfriamiento	Filtro de aire	Se encuentra en buen estado el filtro de aire del cargador sin (rasgones, humedades o suelto)				
		Realizar limpieza de filtro (desmante y limpieza con soplador de aire a presión)				
		Verificar par apriete de tornillos de sujeción				
	ventiladores	Todos los ventiladores encienden normalmente y están bien asegurados a su base.				
		Hay presencia de algún ruido extraño o vibración anormal en los ventiladores.				
		Verificar par apriete de tornillos de sujeción				
Interfaz de usuario	Pantalla LCD	Enciende normalmente la pantalla LCD y es visible para el operario.				
		Se pueden configurar los parámetros de carga.				
		Realizar limpieza con limpiador de pantallas				
	Indicador LED	Todas las luces LED encienden normalmente.				
	Lector RFID	Realiza correcta lectura de tags o tarjeta el sensor RFID.				

Comunicación y red	Red	Tiene señal el equipo y cuenta con respaldo de datos.				
Seguridad y protecciones	Sensor de puerta.	Enciende la señal de advertencia cuando se abre la puerta del equipo.				
	Interruptor de emergencia	Enciende la señal de advertencia y corte de corriente cuando se presiona el botón de emergencia				
		Realizar limpieza del exterior con limpiador de contactos y lubricante				
	Sensor de humo	Se encuentra bien la integridad del sensor de humo sin (grietas, decoloración, deformaciones u oxidación)				
software	firmware	El equipo cuenta con la última actualización de firmware.				

TABLA XXXII

PROPUESTAS DE MTTOS ADICIONALES SEMESTRALES Y ANUALES STARCHARGE®

CONTENIDO		INSPECCION O ACTIVIDAD ADICIONAL A REALIZAR SEMESTRAL	check list		Añadir fotos	Añadir comentarios o valor
			SI	NO		
Subsistema	Pieza					
Control	PDU	Realizar limpieza con soplador de aire y apriete de terminales y señales eléctricas				
	Tarjeta de control	Realizar limpieza con soplador de aire y apriete de terminales y señales eléctricas				
Electrónica de potencia	Módulos de potencia	Realizar limpieza con soplador de aire y apriete de terminales y señales eléctricas				
Comunicación y red	Modulo LTE	Inspección y reajuste de zona horario y prioridad de servidor confiable				
CONTENIDO		INSPECCION O ACTIVIDAD ADICIONAL A REALIZAR ANUAL	check list		Añadir fotos	Añadir comentarios o valor
			SI	NO		
Subsistema	Pieza					
Control	contactor trifásico	Desmontar y limpiar guías/correderas y cámara; retirar polvo/óxidos; lubricar con grasa aprobada; ajustar carrera/presión de contacto; maniobras repetidas bajo carga				
		Al realizar prueba termográfica IR bajo carga se encuentra en el rango (30° a 60°) C				
	Interruptor	Desmontar y limpiar guías/correderas y cámara; retirar polvo/óxidos; lubricar con grasa aprobada; ajustar carrera/presión de contacto; maniobras repetidas bajo carga				
Enfriamiento	Filtro de aire	Realizar sustitución cíclica de filtro de aire				
Control	Tarjeta de control	Realizar actualización de firmware				
		Realizar limpieza de logs del sistema y actualización de comunicaciones				
Interfaz usuario	Pantalla LCD	Realizar actualización de pantalla				

Las actividades de rediseño son pocas debido al historial de los equipos y la disponibilidad aun presente de los repuestos del fabricante en china, pero aun así se presentan en diseños necesarios de un cambio realizados por empresas encargadas de la instalación, como lo serían los tótems de carga, techos de protección con malos acoples, y falta de adecuación de la zona de carga como se presentan en las siguientes imágenes.



Fig. 9. Equipos con necesidad de rediseño

En estas imágenes 1 y 2 se presenta un equipo con una instalación inadecuada de su techo imposibilitando la apertura de la compuerta trasera, dificultad y peligro en maniobras de mantenimiento. En la imagen 3 se presenta un cargador sin protecciones, postes de aviso o topes vehiculares, exponiendo el equipo a choques con vehículos frecuentemente.

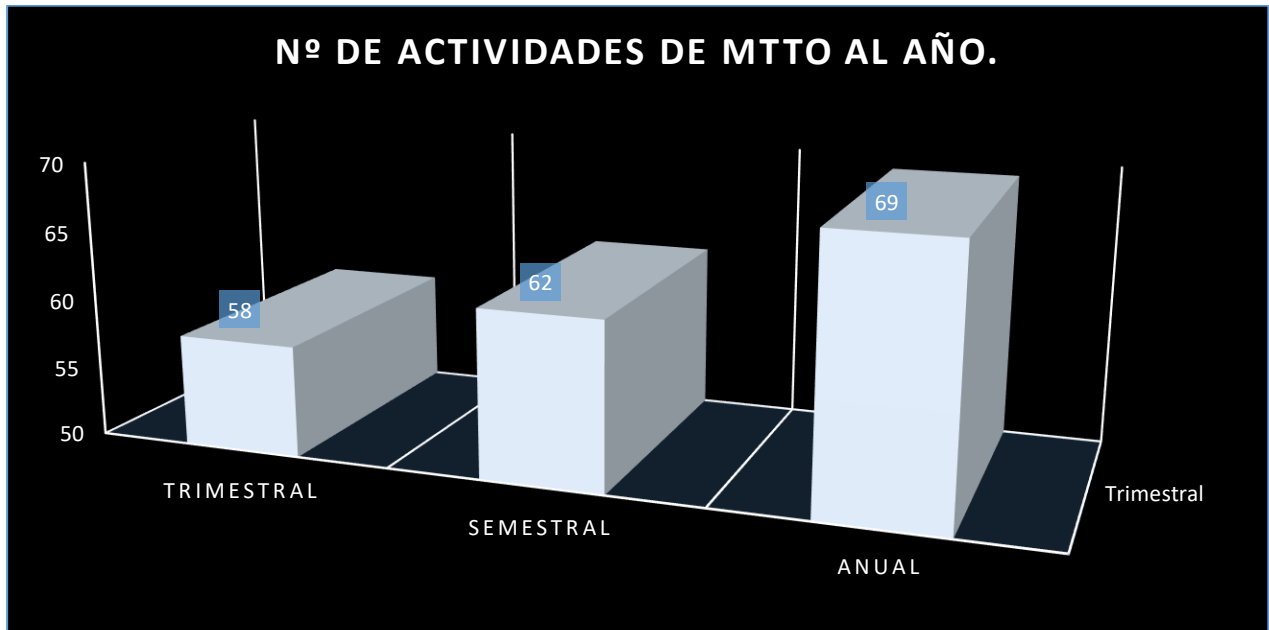


Fig. 10. Propuesta de actividades al año para los equipos STARCHARGE®

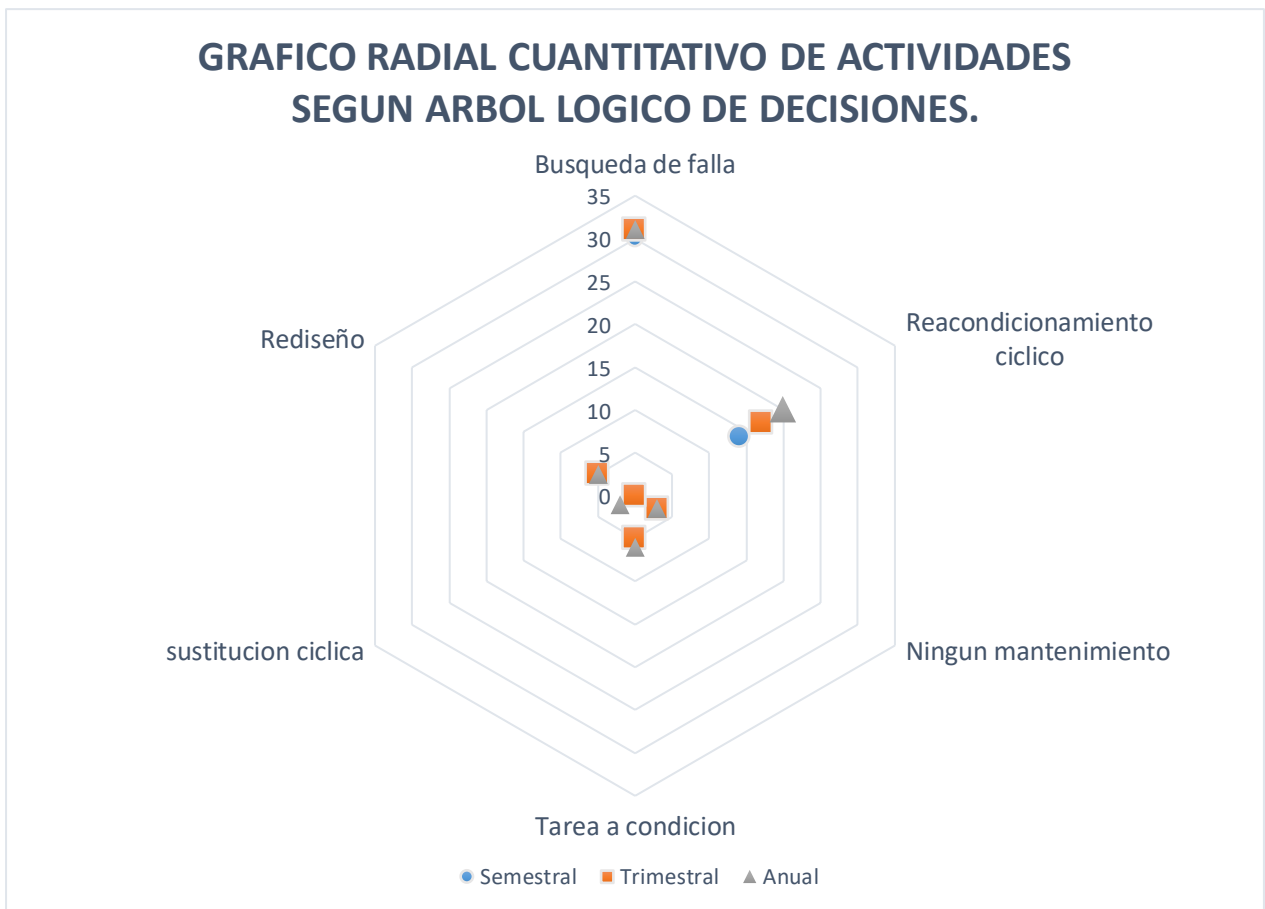


Fig. 11. Número de actividades al año según el árbol lógico

VI. CONCLUSIONES

Se recopiló un total de 9 zonas de carga StarCharge® en Antioquia con 13 equipos, 7 cargadores 180 kw, 4 cargadores 120 kw y 2 cargadores 60 kw, Ubicados de manera estratégica para cada empresa que solicite de su servicio y su contrato ya sea público o privado. Esto nos muestra que la generación de un plan de mantenimiento por medio de la metodología RCM impacta directamente a los 13 equipos y beneficia a su vez tanto la empresa contratista como la encargada de la utilidad y operación del activo.

Al realizarle la taxonomía a los cargadores eléctricos según la norma ISO 14224, se obtiene un total en su estructura de 11 subsistemas y 25 componentes mantenibles, se especifica que la cantidad de estos componentes puede variar según el modelo, pero se trata con el modelo más completo ya que los otros solo le reducen sistemas de seguridad, lo cual muestra equilibrio entre la cantidad de subsistemas tratados con respecto a los componentes mantenibles.

Se reúne información necesaria desde todos los cargos implicados en la utilidad de los activos, por medio de entrevistas directas a; 20 personas de diferentes cargos: 2 gerentes, 3 directores, 4 coordinadores, 2 supervisores, 2 técnicos de mtto y 5 conductores. Permittiéndonos analizar los factores y puntos de vista desde el personal jerárquico de la empresa que contrata el servicio y entender que es lo importante para ellos en el manejo de los EVSE.

Se parte desde 6 criterios de evaluación importantes para evaluar la criticidad de los EVSE, los cuales después de ser analizados en las entrevistas para la matriz de criticidad, por el poco puntaje que obtiene la afectación ambiental se opta por emitir este criterio y evaluar solo 5. Visualizando a su vez la buena conservación y prevención de estos equipos, mostrando su beneficio final a la contribución con el medio ambiente.

El criterio más relevante o con mayor puntaje evaluado fue el tiempo que tarda el equipo en volver al servicio con un 23%, esto claramente se ve reflejado por la falta de stock de repuestos y los tiempos de importación desde china y el que obtuvo el menor puntaje fue el impacto ambiental con un 10% dado que los acontecimientos ocurridos en el periodo de tiempo evaluado nunca se ha presentado un accidente que implique una afectación al medio ambiente.

El componente más crítico del sistema era los módulos de potencia DC con 12 intervenciones en el periodo de tiempo evaluado, la falta de mantenimiento a este componente se ve reflejada en las fallas, paros inesperados de los equipos los cuales no solo pierden el nivel esperado de desempeño si no también causan envejecimiento prematuro en otros componentes.

De los 25 componentes mantenibles se obtiene 53 funciones y 157 modos de falla, de estos modos de falla muchos no se presentaron en el periodo evaluado debido a el corto tiempo que llevan operando estos cargadores en la zona. No obstante, se evalúan su posible ocurrencia y mantenimiento para evitarlos.

Se realizan las comparaciones de las actividades de mantenimiento, concluyendo con 58 actividades trimestrales, 62 semestrales y 69 actividades anuales, se promedia un tiempo de 45 minutos para realizar cada una de estas inspecciones a los equipos y 2 horas para los mantenimientos, un total de 9,75 horas-hombre para las inspecciones mensuales y 26 horas-hombre para completar los mantenimientos ya sea trimestrales, semestrales o anuales.

Se requiere 16 implementos obligatorios para poder realizar dichas actividades de mtto, todos deben de ser herramientas dieléctricas y con una correcta calibración para evaluar correctamente las métricas necesarias de los equipos.

Referencias

- [1] M. Ehsani, Y. Gao, and A. Emadi, *Modern Electric, Hybrid Electric, and Fuel Cell Vehicles: Fundamentals, Theory, and Design*. Boca Raton, FL: CRC Press, 2010.
- [2] J. C. Maurad Yubi and E. M. Armijos, “Caracterización de los sistemas del vehículo eléctrico Kia Soul EV,” 2018. [En línea]. Disponible en: <https://dspace.ups.edu.ec/handle/123456789/15364>.
- [3] Encyclopaedia Britannica, “Electric car,” 2025. [En línea]. Disponible en: <https://n9.cl/fgtck>
- [4] U. S. Department of Energy, “The history of the electric car.” 2014. [En línea]. Disponible en: <https://n9.cl/91mzt>
- [5] Saint George Insurance Brokerage, “From 1832 to 2024: The evolution and challenges of electric vehicles.” [En línea]. Disponible en: <https://n9.cl/chb69>
- [6] Electrek, “Thomas Edison built a DC fast charger for his electric car in 1904,” 2020. [En línea]. Disponible en: <https://n9.cl/ljwsv>
- [7] Tesla, Inc, “Tesla launches Supercharger network,” *Press Release*, 2012. [En línea]. Disponible en: <https://n9.cl/iuf0m>
- [8] J. Quin, “Main EV charging connectors,” *ResearchGate*, 2020. [En línea]. Disponible en: <https://n9.cl/3fyfda>
- [9] International Electrotechnical Commission (IEC), “IEC 61851-1:2017 Electric vehicle conductive charging system — Part 1: General requirements.” 2017. [En línea]. Disponible en: <https://n9.cl/72pjh>
- [10] M. Hofmann, U. Eberle, and M. Müller, “Vehicle-to-grid (V2G) communication interface based on ISO 15118: A survey,” *IEEE Access*, vol. 9, pp. 120750-120764, 2021.
- [11] SAE International, *SAE J1772_202010: Electric Vehicle and Plug-in Hybrid Electric Vehicle Conductive Charge Coupler*, SAE International, 2020. [En línea]. Disponible en: <https://n9.cl/c5nmf>
- [12] M. Muratori, P. Jadun, B. Bush, D. Bielen, L. Vimmerstedt, J. Gonder, C. Gearhart, and D. Arent, “Future integrated mobility-energy systems: A modeling perspective,” *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 119, p. 109541, 2020, <https://doi.org/10.1016/j.rser.2019.109541>

- [13] A. Rachid, H. ElFadil, K. Gaouzi, K. Rachid, A. Lassioui, Z. El Idrissi, and M. Koundi, "Electric Vehicle Charging Systems: Comprehensive Review," *Energies*, vol. 16, no. 255, 2022, <https://doi:10.3390/en16010255>.
- [14] Berger, D. Jöst, E. Barbers, K. Quade, Z. Wu, D. U. Sauer, and P. Dechent, "Benchmarking battery management system algorithms - Requirements, scenarios and validation for automotive applications," *eTransportation*, vol. 22, p. 100355, 2024, <https://doi:10.1016/j.etrans.2024.100355>
- [15] International Organization for Standardization (ISO), "ISO 15118-20: Road vehicles — Vehicle to grid communication interface — Part 20: 2nd generation network layer and application layer requirements", 2022. [En línea]. Disponible en: <https://www.iso.org/standard/77845.html>
- [16] Asociación Española de Normalización, "UNE-EN 13306:2018 Mantenimiento. Terminología del mantenimiento." UNE, 2018.
- [17] E. Hupjé, "The 9 Principles of Reliability Centered Maintenance (RCM)," *Reliability Academy*, 2022. [En línea]. Disponible en: <https://n9.cl/hozsj>
- [18] T. D. Matteson, "The Air Transportation Industry: Birthplace of Reliability-Centered Maintenance". U.S. Department of Energy, Office of Scientific and Technical Information, OSTI ID: 430397, 1996. [En línea]. Disponible en: <https://www.osti.gov/biblio/430397>
- [19] F. S. Nowlan and H. F. Heap, "Reliability-Centered Maintenance." Office of the Assistant Secretary of Defense; National Technical Information Service (NTIS), 1978. [En línea]. Disponible en: Available: <https://apps.dtic.mil/sti/citations/ADA066579>
- [20] SAE International, "SAE JA1011: Evaluation criteria for reliability-centered maintenance (RCM) processes." 1999.
- [21] SAE International, "SAE JA1012: A Guide to the Reliability-Centered Maintenance (RCM) Standard." 2022.
- [22] International Organization for Standardization (ISO), "ISO 55000: Asset Management — Overview, Principles and Terminology." 2014. [En línea]. Disponible en: <https://www.iso.org/standard/55088.html>
- [23] IEC, "Dependability management – Part 3-11: Application guide – Reliability centred maintenance, IEC 60300-3-11:2009." 2009. [En línea]. Disponible en: <https://webstore.iec.ch/en/publication/1296>

- [24] International Organization for Standardization (ISO), "ISO 14224: Petroleum, Petrochemical and Natural Gas Industries — Collection and Exchange of Reliability and Maintenance Data for Equipment." 2016. [En línea]. Disponible en: <https://www.iso.org/standard/64076.html>
- [25] P. E. Hartley, *Maintenance Strategies: A Guide to Reliability-Centered Maintenance (RCM)*. New York, NY: Industrial Press, 2010.
- [26] J. Moubray, *Reliability-centered Maintenance*, New York, NY: Industrial Press, 1997.
- [27] C. A. Parra, "Review of the basic processes of a maintenance and reliability management model: Project – Design and construction of the Third Set of Locks in the ACP (Autoridad del Canal de Panamá)." 2015. [En línea]. Disponible en: <https://www.researchgate.net/publication/343678170>
- [28] L. Barberá, A. Crespo Márquez, P. Viveros, and R. Stegmaier, "Advanced model for maintenance management in a continuous improvement cycle: Integration into the business strategy," *Int. J. Syst. Assur. Eng. Manag.*, vol. 3, no. 1, pp. 47–63, 2012, <https://DOI:10.1007/s13198-012-0092-y>
- [29] Ministerio de Minas y Energía de Colombia, *Resolución 90708 de 2013: Por la cual se expide el Reglamento Técnico de Instalaciones Eléctricas (RETIE) [Anexo general]*, Bogotá: Ministerio de Energía, 2013. [En línea]. Disponible en: <https://n9.cl/0my1u>
- [30] International Organization for Standardization (ISO), *ISO 9001:2015 Quality Management Systems — Requirements*, ISO, 2015. [En línea]. Disponible en: <https://www.iso.org/standard/62085.html>

ANEXOS

[1] RendonLuisGuillermo_2025_AnexoRCM