

ANÁLISIS DE MODOS DE FALLA EN BARRAJES DE CENTROS DE CONTROL DE
MOTORES DE BAJA TENSIÓN DESDE LA CONFIABILIDAD ELÉCTRICA



JUAN DIEGO DELGADO DELGADO



UNIVERSIDAD SANTO TOMÁS
FACULTAD DE INGENIERIA MECANICA
ESPECIALIZACIÓN EN GERENCIA DE MANTENIMIENTO Y GESTIÓN DE ACTIVOS
VILLAVICENCIO
2025

ANÁLISIS DE MODOS DE FALLA EN BARRAJES DE CENTROS DE CONTROL DE
MOTORES DE BAJA TENSIÓN DESDE LA CONFIABILIDAD ELÉCTRICA

JUAN DIEGO DELGADO DELGADO

Trabajo de grado presentado como requisito para optar al título de Especialista en Gerencia de
Mantenimiento y Gestión de Activos

Asesor

Ing. JAIR LEONARDO URREA MORALES, M. Sc.

Especialista en Gerencia de Hidrocarburos

Magíster en Ingeniería de Confiabilidad y Riesgo

UNIVERSIDAD SANTO TOMÁS

FACULTAD DE INGENIERIA MECANICA

ESPECIALIZACIÓN EN GERENCIA DE MANTENIMIENTO Y GESTIÓN DE ACTIVOS

VILLAVICENCIO

2025

Autoridades Académicas

P. Álvaro José ARANGO RESTREPO, O. P.

Rector General

P. Adrián Mauricio GARCÍA PEÑARANDA, O.P.

Vicerrector Académico General

P. Luis Antonio ALFONSO VARGAS, O.P.

Rector Seccional Villavicencio

P. Juan Francisco CORREA HIGUERA, O.P.

Vicerrector Académico Seccional Villavicencio

Mg. Julieth Andrea SIERRA TOBÓN

Secretaria General Seccional Villavicencio

Phd. Handel Andrés MARTÍNEZ SARACHE

Decano de la Facultad de Ingeniería Mecánica

Contenido

	Pág.
Glosario	8
Introducción.....	9
1. Planteamiento del problema	11
2. Justificación.....	12
3. Objetivos	14
3.1. Objetivo general.....	14
3.2. Objetivos específicos	14
4. Marco Teórico	15
4.1. Centros de Control de Motores (CCM) de Baja Tensión	15
4.1.1 Estado actual	17
4.2. Barraje eléctrico y sus modos de falla	18
4.3. Análisis de Causa Raíz (RCA).....	20
5. Normativa aplicable	22
5.1. Normativas internacionales y nacionales aplicables.....	22
5.2. Mantenimiento eléctrico en instalaciones de baja tensión.....	23
5.3. Centros de Control de Motores (CCM)	23
5.4. Seguridad en el mantenimiento eléctrico.....	23
6. Gestión del mantenimiento y de activos aplicada al CCM objeto de estudio	25
6.1. Rol del mantenimiento eléctrico en la continuidad operativa del proceso	25
6.2. Criticidad del CCM dentro del sistema productivo	25
6.3. Mantenimiento programado y presencia de condiciones latentes.....	26
6.4. Decisiones operativas frente a eventos eléctricos no planificados	26
6.5. Enfoque conceptual de gestión de activos aplicado al análisis del evento	27
7. Metodología.....	28
7.1. Enfoque metodológico	28
7.2. Tipo, diseño y alcance de la investigación.....	28
7.3. Etapas metodológicas del estudio	28

7.3.1	Fase 1: Recolección y análisis de información técnica	28
7.3.2	Fase 2: Estrategia de Búsqueda y Recolección de Información	29
7.3.3	Fase 3: Análisis de la Información	29
7.3.4	Fase 4: Sistematización de la información	29
7.4.	Delimitación del estudio	30
8.	Resultados y análisis del evento	31
8.1.	Descripción general del evento	31
8.2.	Línea de tiempo.....	31
8.3.	Sistematización de resultados	33
8.3.1	Modos de falla de origen térmico	34
8.3.2	Modos de falla de origen mecánico	34
8.3.3	Modos de falla asociados al deterioro del aislamiento	35
8.3.4	Modos de falla de origen eléctrico y transitorio	35
8.3.5	Modos de falla asociados a prácticas de mantenimiento	36
8.4.	Relación entre eventos operativos y fallas documentadas en la literatura.....	36
8.5.	Correspondencia con normativa técnica aplicable.....	38
8.5.1	Correspondencia con IEC 61439 – Ensamblajes de baja tensión.....	39
8.5.2	Correspondencia con NFPA 70B – Mantenimiento de equipos eléctricos.....	39
8.5.3	Correspondencia con IEC 60364 – Instalaciones eléctricas de baja tensión	40
8.5.4	Correspondencia con normas y guías de gestión del mantenimiento y activos.....	40
8.5.5	Consideración metodológica	41
8.6.	Vacíos técnicos identificados y oportunidades de estudio.....	42
8.6.1	Vacíos técnicos identificados	42
9.	Conclusiones y consideraciones finales	44
9.1.	Oportunidades de estudio y profundización futura.....	45
9.2.	Proyección del análisis hacia la gestión del mantenimiento y el análisis causal	46
9.3.	Proyección normativa de acciones de mantenimiento asociadas a los modos de falla identificados	46
9.4.	Proyección del análisis hacia metodologías formales de análisis causal	47
10.	Referencias bibliográficas.....	49

Lista de figuras**Pág.**

Figura 1 Desgaste observado en estructura de celda N15 del CCM, habiendo realizado el desmonte de las barras verticales previo a la restauración de la misma.	18
---	----

Lista de tablas

	Pág.
Tabla 1 Matriz de sistematización y validación de la información técnica	30
Tabla 2 Línea de tiempo del evento analizado en la celda N15 del CCM.....	32
Tabla 3 Relación entre observaciones del sistema CCM, mecanismos de falla descritos en la literatura y normativa técnica aplicable	38
Tabla 4 Matriz de síntesis de los modos de falla del sistema de barrajes, su relación con el evento analizado y la normativa aplicable.....	41

Glosario

Acrónimos empleados en la monografía.

Acrónimo	Significado
CCM	Centros de Control de Motores
RCA	Root Cause Analysis (Análisis de Causa Raíz)
RCM	Reliability-Centered Maintenance (Mantenimiento Centrado en Confiabilidad)
FTA	Fault Tree Analysis (Análisis de Árbol de Fallas)
FMEA	Failure Mode and Effects Analysis (Análisis de Modos y Efectos de Falla)
FMECA	Failure Mode, Effects and Criticality Analysis
IEC	International Electrotechnical Commission
IEEE	Institute of Electrical and Electronics Engineers
ISO	International Organization for Standardization
NFPA	National Fire Protection Association
NEC	National Electrical Code
RETIE	Reglamento Técnico de Instalaciones Eléctricas
NTC	Norma Técnica Colombiana
EPP	Equipos\Elementos de Protección Personal
SST	Seguridad y Salud en el Trabajo

Introducción

En entornos industriales contemporáneos, los Centros de Control de Motores (CCM) de baja tensión constituyen infraestructuras críticas para garantizar la continuidad operativa de los procesos automatizados. Estos sistemas modulares integran funciones de maniobra, protección y monitoreo de motores eléctricos, permitiendo una administración centralizada de cargas industriales (IEC, 2020; Gómez & Martínez, 2023). La confiabilidad de los CCM se sustenta no solo en la calidad de los componentes empleados, sino también en la robustez del sistema de distribución eléctrica interna, en particular el conjunto de barras colectoras o barrajes.

Las fallas en los barrajes de CCM pueden derivar en consecuencias severas: interrupción de procesos productivos, afectación a la seguridad del personal, daños estructurales al equipo y pérdidas económicas considerables (ISO 55000, 2014; RHI Electric, 2025). Según Yang et al. (2023), la detección temprana de anomalías térmicas y eléctricas en conductores de potencia es fundamental para evitar eventos catastróficos. De igual manera, Alsumaidae et al. (2022) sostienen que la integración de algoritmos inteligentes en rutinas de mantenimiento predictivo mejora la precisión diagnóstica al identificar patrones incipientes de degradación eléctrica antes de su manifestación física.

Dentro de la estructura del CCM, las barras colectoras cumplen la función de distribuir corrientes significativas hacia múltiples alimentadores, por lo que su diseño, instalación y supervisión resultan clave para preservar la integridad del sistema (IEC 61439-6, 2020; IEEE 141, 2020). Tal como señalan Jankovski et al. (2023), "las barras colectoras son componentes de la aparamenta donde se conectan todos los equipos del sistema eléctrico. Recogen la energía eléctrica de los alimentadores de entrada y la distribuyen a los de salida" (p. 1).

Este estudio adopta un enfoque monográfico, con base documental y técnica, orientado a analizar los modos de falla que afectan los barrajes de CCM, bajo una perspectiva metodológica basada en confiabilidad eléctrica. Se recurre a herramientas del Análisis de Causa Raíz (RCA) conforme a las normas IEC 62740:2015 e IEC 61025:2006, con el fin de identificar las causas técnicas recurrentes y proponer mejoras estructurales, operativas y de mantenimiento. En ese sentido, se utiliza como caso ilustrativo la falla ocurrida en noviembre de 2024 en el barraje auxiliar de la celda N15 del CCM de baja tensión de la planta Bioenergy Zona Franca S.A.S., la

cual produjo una interrupción total del sistema de alimentación a la línea de producción de etanol, generando pérdidas superiores a los \$422 millones de pesos colombianos.

A partir de este caso y de una revisión profunda de la literatura normativa y técnica, esta monografía busca establecer criterios orientados a mejorar la gestión del mantenimiento eléctrico desde el análisis estructurado de fallas, contribuyendo al fortalecimiento de la gestión de activos eléctricos industriales (IEC 62740, 2015; ISO 55000, 2014; Mobley, 2002).

1. Planteamiento del problema

El correcto funcionamiento de los sistemas eléctricos en entornos industriales es fundamental para asegurar la continuidad de los procesos productivos, particularmente en plantas con alto grado de automatización como la de Bioenergy Zona Franca S.A.S. El 26 de noviembre de 2024, durante condiciones normales de operación, se presentó una falla en CCM de baja tensión del área 140, encargado de alimentar los procesos de evaporación de vinazas, propagación de microorganismos y fermentación.

La falla, originada como un arco eléctrico entre fases en el barraje auxiliar de la celda N15, causó la interrupción total del suministro eléctrico en dicha área. Esto afectó la totalidad de los equipos asociados y provocó una parada de producción de aproximadamente seis horas, con impactos estructurales, riesgos para el personal y pérdidas económicas que superaron los \$422 millones de pesos colombianos.

Este tipo de eventos no solo revela vulnerabilidades técnicas, sino también limitaciones en la gestión del mantenimiento, especialmente cuando no se aplican metodologías estructuradas para determinar la causa raíz. Tal como lo establece la IEC 62740 (2015), el RCA es fundamental para comprender la secuencia de eventos técnicos y operativos que derivan en una falla compleja. Su ausencia perpetúa acciones reactivas, incrementa los riesgos y compromete la confiabilidad del activo (ISO 55000, 2014; Alsumaidae et al., 2022).

Además, estudios recientes han demostrado que los fallos en barrajes de CCM están entre los más críticos por su capacidad de afectar múltiples cargas y producir daños por sobretensión, oxidación, o mal torqueado de uniones (RHI Electric, 2025; Silva & Gómez, 2021). Frente a esto, metodologías como el árbol de fallas (FTA) y los diagramas causa-efecto (Ishikawa) se posicionan como herramientas clave para abordar la problemática desde un enfoque técnico y normativo (IEC 61025, 2006; Rodríguez, 2021).

2. Justificación

La pertinencia de este estudio se justifica en la necesidad de fortalecer las estrategias de confiabilidad aplicadas a sistemas eléctricos industriales, en particular a los CCM de baja tensión, cuyos componentes internos, como los barrajes, son críticos para asegurar la continuidad del proceso productivo. En sistemas automatizados y de alta demanda energética, como los de la planta Bioenergy Zona Franca S.A.S., la confiabilidad de los activos eléctricos está directamente relacionada con la seguridad operativa, la disponibilidad del sistema y la sostenibilidad económica (ISO 55000, 2014; Gómez & Martínez, 2023).

La falla ocurrida el 26 de noviembre de 2024 en el barraje auxiliar de la celda N15 representa una manifestación clara de las consecuencias derivadas de no abordar los activos eléctricos desde una perspectiva sistemática. Este evento, al comprometer procesos claves como evaporación de vinazas, fermentación y propagación microbológica, produjo una interrupción no programada con pérdidas superiores a \$422 millones de pesos colombianos. Situaciones como esta destacan la urgencia de implementar metodologías estructuradas como el RCA, conforme a la IEC 62740 (2015), y el Análisis de Modo y Efecto de Falla (FMEA), como herramientas para identificar causas latentes y fortalecer las decisiones técnicas (Stamatis, 2019; Alsumaidae et al., 2022).

Aplicar estas metodologías permite no solo descubrir las causas inmediatas del evento (por ejemplo, pérdida de torque en conexiones o degradación térmica de aisladores), sino también visualizar debilidades en los planes de mantenimiento, especificaciones de diseño, prácticas de inspección o políticas de gestión de activos (Rodríguez, 2021; McGraw-Hill Education, s. f.). Estas falencias suelen pasar desapercibidas si no se realiza un abordaje estructurado que contemple la integración de factores técnicos, organizacionales y humanos (IEC 62740, 2015).

En consecuencia, la implementación de acciones correctivas derivadas del estudio permitirá:

- Incrementar la disponibilidad operativa de los CCM mediante intervenciones basadas en condición.
- Prevenir fallas recurrentes y reducir los impactos económicos por paradas no programadas (Yang et al., 2023).

- Aumentar la seguridad eléctrica del personal mediante la mitigación de riesgos de arco interno o sobrecalentamiento (Jankovski et al., 2023).
- Optimizar los programas de mantenimiento según la criticidad del sistema y los modos de falla probables (ISO 31000, 2011).
- Alinear la gestión de activos con estándares internacionales como ISO 55001, promoviendo una toma de decisiones basada en análisis de riesgo, desempeño y costo del ciclo de vida.

Este estudio no se limita a la resolución de un incidente puntual, sino que representa una oportunidad para madurar el enfoque técnico de la organización, evolucionando hacia un modelo de mantenimiento eléctrico más confiable, proactivo y alineado con las mejores prácticas internacionales (Cooper et al., 2021; Aguilar, 2023).

3. Objetivos

3.1. Objetivo general

Analizar los modos de falla en barrajes de centros de control de motores de baja tensión desde la perspectiva de la confiabilidad eléctrica, mediante la revisión de literatura técnica y normativa.

3.2. Objetivos específicos

- Analizar información técnica proveniente de fuentes normativas, bibliográficas y casos documentados sobre fallas en barrajes de CCM de baja tensión.
- Clasificar los modos de falla más comunes según sus causas técnicas, impacto operativo y condiciones de ocurrencia.
- Identificar lineamientos técnicos y normativos aplicables a la gestión del mantenimiento eléctrico en sistemas de barrajes de CCM.

4. Marco Teórico

4.1. Centros de Control de Motores (CCM) de Baja Tensión

Los CCM son sistemas eléctricos diseñados para alojar, proteger y controlar dispositivos asociados a motores eléctricos trifásicos en entornos industriales. Su función principal es centralizar el arranque, parada, monitoreo y protección de múltiples motores, permitiendo una gestión más eficiente, segura y organizada de los procesos automatizados. Debido a la creciente complejidad de los sistemas eléctricos y a la elevada dependencia de los motores eléctricos en procesos críticos, los CCM son considerados activos estratégicos dentro de la infraestructura industrial (IEEE 141, 2020; IEC 61439-1, 2020).

Según la norma IEC 61439-1 (2020), los CCM no se definen explícitamente, pero pueden entenderse como ensamblajes modulares que integran unidades funcionales con acceso frontal o posterior, configuración fija o extraíble, y formas de separación internas que permiten realizar mantenimientos sin desenergizar completamente el sistema (IEC, 2020, secciones 3.1.1, 3.1.2, 8.6, 8.101). Estas unidades funcionales pueden incluir contactores, relés de sobrecarga, interruptores automáticos, fusibles, transformadores de corriente, seccionadores y terminales de conexión.

La Comisión Federal de Electricidad (2021) aporta una definición operativa útil al establecer que un CCM es un "ensamble metálico para montaje en el piso, formado por una o más secciones verticales; la alimentación principal se efectúa por medio de barras horizontales de fuerza comunes a todas las secciones" (p. 5). Estas estructuras contienen compartimentos independientes, donde se ubican los dispositivos de control, protección y potencia, normalmente separados por divisores metálicos o plásticos, según los grados de compartimentación definidos en la misma IEC 61439.

Entre los principales elementos que conforman un CCM se encuentran:

- **Sistema de barrajes o busbars:** Son los elementos encargados de transportar y distribuir la corriente eléctrica desde el alimentador principal a los distintos circuitos derivados. Están compuestos generalmente por barras de cobre o aluminio, dispuestas horizontal o verticalmente, y deben dimensionarse según la corriente nominal, el tipo de aislamiento y las condiciones térmicas del sistema. Su correcta instalación y el torque adecuado en sus uniones son fundamentales para

evitar puntos calientes o arcos eléctricos (IEC 61439-6, 2020; RHI Electric, 2025; IEEE 141, 2020).

- **Unidades funcionales o compartimentos:** Son módulos independientes dentro del CCM que contienen los dispositivos de protección, maniobra y control de cada motor o carga conectada. Estos pueden configurarse como fijos o extraíbles, y su diseño debe garantizar la desconexión segura en caso de mantenimiento o falla. Están asociados a interruptores automáticos, contactores y relés, y su acceso suele estar limitado por puertas con enclavamientos mecánicos o eléctricos (IEC 61439-2, 2020;).

- **Sistema de conexiones y terminales:** Incluye todos los elementos destinados a establecer el enlace eléctrico entre los dispositivos internos del CCM y los conductores de entrada y salida. Están diseñados para soportar la corriente nominal del circuito y mantener una baja resistencia de contacto. La selección de terminales adecuados, así como el uso de conectores prensados o pernos con torque controlado, es clave para evitar fallos por calentamiento o desconexión accidental (IEEE Std 1584, 2018; Silva & Gómez, 2021).

- **Aislamientos, barreras y separadores:** Son elementos mecánicos y dieléctricos diseñados para asegurar la separación entre fases, entre barras activas y tierra, y entre unidades funcionales. Su presencia define el tipo de compartimentación del CCM (formas 1 a 4), lo cual impacta en la facilidad de mantenimiento y el nivel de protección contra contactos directos o arcos internos. Están contruidos en materiales como policarbonato, poliéster o poliamida reforzada con fibra de vidrio (IEC 61439-2, 2020; CFE, 2021).

- **Sistema de ventilación o disipación térmica:** Su propósito es evitar la acumulación de calor excesivo en el interior del CCM, el cual puede afectar el rendimiento y la vida útil de los componentes eléctricos. Se emplean rejillas de ventilación, extractores forzados, disipadores de calor o incluso intercambiadores térmicos en configuraciones cerradas. Una correcta evaluación de la carga térmica y de las condiciones ambientales permite seleccionar el sistema de disipación adecuado (IEC TR 60890, 2019; Moubray, 1997).

Además, la modularidad del CCM facilita la implementación de estrategias como el mantenimiento centrado en confiabilidad (RCM), el FMEA y el RCA, particularmente cuando se presentan eventos de naturaleza repetitiva o de alto impacto técnico y económico (Stamatis, 2019; Aguilar, 2023).

Los conceptos y características de los Centros de Control de Motores descritos en este apartado permiten contextualizar el sistema objeto de estudio y constituyen la base para la identificación de los elementos críticos involucrados en el evento analizado, particularmente en lo relacionado con la configuración de barrajes y celdas de potencia.

4.1.1 Estado actual

Como parte del análisis técnico ilustrativo, se consideró el evento ocurrido en la planta Bioenergy Zona Franca S.A.S., donde una falla eléctrica significativa afectó el barraje auxiliar de la celda N15 del CCM de baja tensión ubicado en el Área 140 de la planta.

El incidente se evidenció mediante una interrupción total del suministro eléctrico a los procesos asociados, derivando en una parada no programada y daños estructurales al equipo. Durante el mantenimiento anual programado, iniciado el 26 de junio de 2025, se llevaron a cabo inspecciones y acciones correctivas que permitieron constatar el alcance del daño. Las observaciones técnicas incluyeron presencia de hollín, deformaciones en los soportes metálicos de los aisladores, y salpicaduras de cobre fundido, indicativas de una falla por arco interno con origen en el sobrecalentamiento de uniones mecánicas.

La magnitud del daño requirió el reemplazo completo de aisladores de soporte, ángulos verticales electroplateados, y platinas de cobre. Además, se realizó la restauración estructural de dos soportes metálicos, lo cual fue indispensable para permitir el correcto alineamiento de los barrajes verticales y garantizar la estabilidad dieléctrica del sistema.

Este caso evidencia las implicaciones operativas, técnicas y de seguridad que conlleva una falla no controlada en componentes internos de un CCM. Según la IEEE 141 (2020) y NFPA 70B (2023), este tipo de eventos puede estar asociado a prácticas inadecuadas de apriete, envejecimiento de aisladores, o acumulación de contaminantes que aceleran procesos de degradación. Asimismo, la literatura recomienda implementar rutinas de inspección térmica y ajustes periódicos de torque, particularmente en ambientes industriales con cargas variables (Gutiérrez, 2023; Chávez et al., 2020).

Figura 1

Desgaste observado en estructura de celda N15 del CCM, habiendo realizado el desmonte de las barras verticales previo a la restauración de la misma.



Nota. Fotografía obtenida durante inspección técnica del área 140.

4.2. Barraje eléctrico y sus modos de falla

Los barrajes eléctricos, o barras colectoras, son elementos esenciales dentro de los CCM, ya que permiten canalizar grandes cantidades de corriente desde las fuentes principales hacia los distintos circuitos derivados. Fabricados comúnmente en cobre o aluminio, estos componentes deben cumplir con criterios específicos de resistencia mecánica, capacidad térmica, confiabilidad dieléctrica y compatibilidad con las condiciones ambientales de operación (IEC 61439-6, 2020; Silva & Gómez, 2021).

Una de las causas más frecuentes de falla en los barrajes es el sobrecalentamiento localizado, que se produce principalmente por resistencia elevada en las uniones mecánicas. Esta condición puede surgir por aflojamiento progresivo del torque, oxidación superficial o deformaciones en los puntos de contacto, lo que genera puntos calientes que exceden los límites operativos recomendados. La norma IEC 61439-1 sugiere una temperatura máxima de 140 °C para materiales conductores; superando este umbral, se pueden generar arcos eléctricos internos (IEC, 2020; Chau & Liew, 2019).

Otros modos de falla documentados incluyen:

- Fatiga mecánica de aisladores de soporte, especialmente bajo condiciones de vibración continua o ciclos térmicos repetidos (Silva & Gómez, 2021).
- Expansión térmica diferencial entre materiales disímiles, que produce esfuerzos acumulativos en los puntos de fijación (Sánchez & Parra, 2023).
- Corrosión galvánica, frecuente en ambientes con alta humedad o presencia de vapores químicos, que degrada tanto los conductores como los herrajes (González, 2022).

La literatura técnica también identifica fenómenos de deterioro progresivo del aislamiento, tales como el tracking superficial asociado a descargas parciales, los cuales pueden actuar como mecanismos latentes en la evolución de fallas en sistemas de barrajes de baja tensión.

La literatura técnica recomienda implementar un enfoque preventivo basado en inspecciones periódicas con termografía infrarroja, pruebas de resistencia de contacto y análisis de torque, como mecanismos efectivos para detectar condiciones anormales antes de la aparición de fallas críticas (Benítez et al., 2018; Arrieta & Carrillo, 2022).

El análisis de la celda N15 del CCM de la planta Bioenergy ejemplifica estos mecanismos, al evidenciar daños severos por arco eléctrico y deterioro mecánico de los aisladores, consistentes con los modos de falla térmico-dieléctrico descritos anteriormente. Según Rodríguez & Mendoza (2024), los rastros de hollín, deformación de platinas y salpicaduras de cobre fundido son indicios claros de sobrecalentamiento prolongado en una trayectoria de corriente defectuosa.

Desde el enfoque de confiabilidad eléctrica, este tipo de eventos representa una oportunidad para aplicar herramientas estructuradas como el RCA, los diagramas de Ishikawa o el FTA, con el fin de identificar no solo el punto de falla inmediato, sino las condiciones de gestión, mantenimiento y operación que favorecieron su ocurrencia (Stamatis, 2019; IEC 61025, 2006).

La descripción de los barrajes y sus elementos asociados proporciona el marco técnico necesario para comprender los principales mecanismos de deterioro y los modos de falla documentados en la literatura especializada. Estos no pretenden constituir un inventario exhaustivo, sino que representan aquellos fenómenos más recurrentes y relevantes desde la perspectiva de la gestión del mantenimiento eléctrico, y servirán como base para la posterior sistematización y análisis integrador desarrollados en los capítulos siguientes.

4.3. Análisis de Causa Raíz (RCA)

El RCA, es una metodología estructurada utilizada para investigar incidentes, fallas o desviaciones operativas en sistemas técnicos complejos, con el objetivo de identificar no solo qué ocurrió, sino por qué ocurrió y qué elementos del sistema facilitaron su manifestación. Según la norma IEC 62740:2015, el RCA debe desarrollarse de forma lógica, objetiva y secuencial, considerando tanto causas inmediatas como causas contribuyentes y causas raíz documentadas (IEC, 2015).

El valor del RCA reside en su capacidad para traducir un evento puntual en oportunidades de mejora sistémica, mediante la comprensión profunda del entorno técnico y operacional en el que se produce una falla. Para ello, la metodología se apoya en herramientas cualitativas y deductivas como:

- Diagrama de Ishikawa o de causa-efecto: Técnica de representación visual que agrupa factores contribuyentes según categorías típicas (métodos, materiales, maquinaria, mano de obra, medio ambiente, medición), permitiendo un análisis integral de las causas del evento (Stamatis, 2019).
- Método de los 5 ¿Por qué?: Estrategia de indagación sucesiva desarrollada por Sakichi Toyoda en Toyota, que permite profundizar iterativamente en las causas subyacentes al preguntar "¿por qué?" en cada nivel de análisis hasta encontrar la raíz del problema (Ohno, 1988).
- Análisis de Árbol de Fallas (FTA): Herramienta deductiva normalizada por la IEC 61025:2006, basada en lógica booleana, que permite descomponer el evento principal en combinaciones de eventos básicos que pueden conducir al fallo (IEC, 2006).

Una etapa crítica en todo RCA es la recopilación exhaustiva de información técnica sobre el evento, incluyendo: condiciones operativas previas, registros históricos, datos de sensores, informes de mantenimiento y evidencias físicas. Esta información permite reconstruir una línea de tiempo técnica del evento, identificar patrones de comportamiento anómalo y validar hipótesis causales (Mobley, 2002; Smith & Hawkins, 2004).

En el contexto de la gestión de activos eléctricos, el RCA permite enfocar los esfuerzos de mantenimiento en los factores que realmente influyen en la confiabilidad del sistema. Según la ISO 55001:2014, las decisiones de mantenimiento deben sustentarse en un conocimiento detallado de las causas de falla y sus consecuencias, de manera que se optimicen los recursos, se reduzcan los riesgos operativos y se incremente la disponibilidad del activo (ISO, 2014).

5. Normativa aplicable

El cumplimiento normativo en las instalaciones eléctricas industriales constituye un elemento fundamental para garantizar la seguridad de las personas, la protección de los activos y la continuidad operativa de los procesos productivos. A lo largo de las últimas décadas, el desarrollo normativo ha evolucionado desde lineamientos generales hacia marcos regulatorios más estructurados, que abarcan desde el diseño y la instalación hasta la operación y el mantenimiento de los sistemas eléctricos.

En el contexto global, la **Comisión Electrotécnica Internacional (IEC)** y otras organizaciones como el IEEE y la NFPA han desarrollado estándares ampliamente adoptados. En Colombia, el cumplimiento del **RETIE** (Reglamento Técnico de Instalaciones Eléctricas) es obligatorio para todo tipo de instalaciones.

5.1. Normativas internacionales y nacionales aplicables

Las principales normas aplicables al mantenimiento eléctrico en baja tensión y a los CCM son:

- **IEC 60364:** Establece requisitos generales para instalaciones eléctricas de baja tensión, incluyendo aspectos de mantenimiento, verificación periódica y continuidad del servicio.
- **IEC 61439:** Regula los ensamblajes de aparamenta de baja tensión, donde se incluyen los CCM. Exige ensayos tipo y verificaciones rigurosas para garantizar la seguridad funcional.
- **NTC 2050:** Basada en el NEC estadounidense, esta norma técnica colombiana, adoptada en el RETIE, establece los criterios de diseño, instalación y mantenimiento de sistemas eléctricos de baja tensión.
- **NTC 5926:** Norma específica para el desarrollo de programas de mantenimiento preventivo en instalaciones eléctricas industriales.
- **Resolución 90708 de 2013:** Documento clave que reglamenta técnicamente el RETIE en Colombia y detalla obligaciones específicas para instalaciones eléctricas en operación.
- **IEEE Std 141 (Red Book):** Brinda recomendaciones prácticas sobre distribución eléctrica en plantas industriales, incluyendo directrices para CCM.
- **NFPA 70E:** Norma internacionalmente reconocida para trabajos seguros en instalaciones eléctricas.

5.2. Mantenimiento eléctrico en instalaciones de baja tensión

Los tipos de mantenimiento más utilizados son:

- **Correctivo:** Reacción ante fallas.
- **Preventivo:** Programado para prevenir defectos.
- **Predictivo:** Basado en el estado real del equipo.

Según la **IEC 60364-6**, toda instalación debe ser verificada periódicamente mediante inspecciones visuales y pruebas funcionales. Estas acciones permiten garantizar que los sistemas eléctricos sigan cumpliendo las condiciones de seguridad requeridas.

5.3. Centros de Control de Motores (CCM)

Los CCM centralizan la operación, protección y control de motores en sistemas industriales. Su diseño y operación están regulados principalmente por:

- **IEC 61439-2**, que obliga a verificar aspectos como la resistencia dieléctrica, la continuidad del circuito de protección y la resistencia a cortocircuito.
- **IEEE Std 3007.2**: Ofrece lineamientos específicos para el mantenimiento de equipos eléctricos en plantas industriales, haciendo énfasis en tableros de distribución y CCM.
- En Colombia, el **RETIE** exige que los CCM cuenten con protecciones adecuadas contra contactos indirectos, fallas a tierra y sobrecargas, además de acceso restringido a personal calificado.

La normativa técnica y de gestión de activos revisada en este apartado se utiliza como marco de referencia para la interpretación del evento y para la formulación de lineamientos orientados a la gestión del mantenimiento, sin que ello implique la aplicación directa de auditorías o evaluaciones de cumplimiento normativo en campo.

5.4. Seguridad en el mantenimiento eléctrico

Los procedimientos de mantenimiento deben estar acompañados de un análisis de riesgos, protocolos de trabajo seguro y uso adecuado de Equipos de Protección Personal (EPP).

- La norma **NFPA 70E** establece requisitos sobre análisis de energía incidente, límites de aproximación y categorías de riesgo eléctrico.

- En Colombia, el **Decreto 1072 de 2015** y la **Resolución 5018 de 2019** determinan que los trabajadores involucrados en mantenimiento eléctrico deben estar protegidos mediante un SG-SST que contemple el riesgo eléctrico como prioritario.

6. Gestión del mantenimiento y de activos aplicada al CCM objeto de estudio

La normativa técnica y los principios de gestión de activos revisados en este apartado se emplean como marco de referencia para la interpretación del evento ocurrido en el CCM objeto de estudio y para la formulación de lineamientos orientados a la gestión del mantenimiento eléctrico. Este enfoque no implica la realización de auditorías formales ni evaluaciones de cumplimiento normativo en campo, sino que permite contextualizar técnicamente las decisiones operativas y de mantenimiento adoptadas antes, durante y después del evento analizado.

6.1. Rol del mantenimiento eléctrico en la continuidad operativa del proceso

En instalaciones industriales de proceso continuo, el mantenimiento eléctrico cumple un papel determinante en la garantía de la continuidad operativa y en la mitigación de riesgos asociados a paradas no programadas. Los sistemas eléctricos de distribución, y en particular los Centros de Control de Motores, constituyen elementos habilitadores del proceso productivo, dado que de su disponibilidad dependen múltiples etapas operativas interrelacionadas.

En este contexto, el mantenimiento no se limita a la corrección de fallas manifiestas, sino que actúa como un mecanismo preventivo y de contención del riesgo operativo. Las actividades de inspección, limpieza, verificación mecánica y pruebas eléctricas buscan preservar condiciones seguras de operación y reducir la probabilidad de eventos que puedan comprometer la estabilidad del sistema. Sin embargo, aun cuando se ejecuten mantenimientos programados, pueden subsistir condiciones latentes que no se manifiestan inmediatamente bajo determinados regímenes de carga o de operación.

El evento analizado pone de manifiesto cómo una alteración súbita en el comportamiento del sistema eléctrico puede derivar en una interrupción significativa del proceso productivo, resaltando la relevancia del mantenimiento eléctrico como función estratégica y no únicamente como actividad técnica de soporte.

6.2. Criticidad del CCM dentro del sistema productivo

El Centro de Control de Motores analizado desempeña un rol crítico dentro del sistema productivo de la planta, al concentrar la alimentación, protección y control de un conjunto de

cargas asociadas a procesos esenciales. La indisponibilidad de este activo tiene un impacto directo sobre etapas clave del proceso industrial, lo que incrementa su nivel de criticidad desde el punto de vista operativo y económico.

La criticidad de un activo no se define únicamente por su valor físico o por la complejidad de sus componentes, sino por las consecuencias que su falla genera sobre la seguridad, el medio ambiente, la continuidad del servicio y la producción. En el caso del CCM objeto de estudio, la ocurrencia del evento provocó la detención simultánea de múltiples procesos, evidenciando su carácter de activo nodal dentro de la infraestructura eléctrica de la planta.

Este nivel de criticidad explica, en parte, las decisiones adoptadas durante la atención del evento, donde se priorizó la recuperación operativa del sistema frente a la ejecución inmediata de análisis exhaustivos, en un escenario de alta presión por restablecer la producción.

6.3. Mantenimiento programado y presencia de condiciones latentes

El mantenimiento programado constituye una herramienta fundamental para preservar la confiabilidad de los sistemas eléctricos; no obstante, su ejecución no garantiza la eliminación total de condiciones de falla potenciales. Factores como accesibilidad limitada, restricciones operativas, métodos de verificación no instrumentados y condiciones de carga reducida posterior al mantenimiento pueden permitir que ciertos mecanismos de deterioro permanezcan latentes.

En el caso analizado, el CCM fue sometido a actividades de mantenimiento que incluyeron inspecciones visuales, limpieza general, mediciones de aislamiento y verificación de uniones eléctricas. Sin embargo, la operación posterior del sistema bajo condiciones de carga mínima durante un periodo prolongado pudo haber contribuido a que eventuales debilidades no se manifestaran de forma inmediata.

Este comportamiento es consistente con lo reportado en la literatura técnica, donde se reconoce que algunas fallas eléctricas solo se evidencian cuando el sistema es sometido nuevamente a su régimen nominal de operación o a condiciones transitorias exigentes, como variaciones abruptas de carga o maniobras no planificadas.

6.4. Decisiones operativas frente a eventos eléctricos no planificados

La gestión de eventos eléctricos no planificados en entornos industriales implica la toma de decisiones bajo condiciones de incertidumbre, presión operativa y restricciones de tiempo. En

estos escenarios, las acciones adoptadas no siempre corresponden a la solución técnica ideal, sino a aquella que permite restablecer la operación de manera segura y controlada, minimizando el impacto global sobre el proceso productivo.

Durante la atención del evento en el CCM, se priorizó la evaluación visual, la verificación básica de condiciones eléctricas y la implementación de medidas correctivas inmediatas orientadas a energizar nuevamente el sistema. Estas decisiones respondieron a la necesidad de reducir el tiempo de indisponibilidad del activo, considerando la magnitud de las afectaciones al proceso industrial.

Desde una perspectiva de gestión del mantenimiento, este tipo de decisiones no debe interpretarse como una omisión técnica, sino como una respuesta operativa condicionada por la criticidad del activo y por el equilibrio entre riesgo técnico aceptable y continuidad operativa.

6.5. Enfoque conceptual de gestión de activos aplicado al análisis del evento

El análisis del evento se apoya conceptualmente en los principios de la gestión de activos, particularmente en aquellos relacionados con la toma de decisiones basada en riesgo y en el ciclo de vida del activo. Desde este enfoque, las acciones de mantenimiento y operación se entienden como parte de un proceso dinámico orientado a maximizar el desempeño del sistema, controlando los riesgos asociados a su operación.

En este sentido, el evento ocurrido en el CCM puede interpretarse como una manifestación de la interacción entre condiciones latentes, exigencias operativas y decisiones de corto plazo. La gestión de activos no se aborda aquí como un sistema formal de evaluación organizacional, sino como un marco conceptual que permite comprender las implicaciones técnicas y operativas de las acciones adoptadas antes y después del evento.

Este enfoque contribuye a integrar el análisis técnico con una visión gerencial del mantenimiento, facilitando la formulación de lineamientos orientados a fortalecer la confiabilidad de los sistemas eléctricos y a mejorar la gestión del riesgo en activos críticos.

7. Metodología

7.1. Enfoque metodológico

Se adopta un enfoque cualitativo, descriptivo y documental, orientado al análisis y sistematización de información técnica existente sobre modos de falla en barrajes de CCM de baja tensión.

7.2. Tipo, diseño y alcance de la investigación

Estudio de tipo exploratorio-documental, fundamentado en fuentes secundarias, tales como:

- Normas técnicas internacionales (ej. IEC 61439, IEC 60204, IEC 60364, IEC 60300, IEC 62502).
- Publicaciones científicas y artículos técnicos (IEEE, Elsevier, Scopus, ScienceDirect).
- Guías de fabricantes y reportes de incidentes industriales.
- Informes de confiabilidad, mantenimiento eléctrico y análisis de fallas (RCM, RCA, FMEA documentados).

7.3. Etapas metodológicas del estudio

El desarrollo metodológico se estructura en cinco fases principales, integrando herramientas de confiabilidad, mantenimiento centrado en la seguridad eléctrica, y normas internacionales como IEC 61025, IEC 61439 y NFPA 70B.

7.3.1 Fase 1: Recolección y análisis de información técnica

- **Criterios de inclusión:**

documentos publicados entre 2010 y 2025, relevancia técnica directa con barrajes de CCM de baja tensión, mención explícita de modos de falla, confiabilidad eléctrica o mantenimiento.

- **Criterios de exclusión:**

publicaciones sin revisión técnica, con enfoque distinto al mantenimiento o confiabilidad, o que aborden CCM de media/alta tensión sin aplicabilidad directa.

7.3.2 Fase 2: Estrategia de Búsqueda y Recolección de Información

- **Palabras clave:**

busbar failures, low voltage MCC failures, electrical reliability, maintenance best practices, IEC standards in electrical safety.

- **Bases de datos:**

IEEE Xplore, Scopus, Google Scholar, bases institucionales y repositorios técnicos industriales.

Se establecerá una matriz de recolección documental con los siguientes campos: fuente, año, tipo de falla descrita, causas técnicas, consecuencias, referencia normativa, recomendaciones.

7.3.3 Fase 3: Análisis de la Información

- Se realizará un análisis cualitativo y temático de los modos de falla identificados.
- Clasificación por tipo (térmicas, mecánicas, ambientales, por mantenimiento deficiente, etc.).
- Identificación de patrones comunes en causas y consecuencias.
- Correlación con lineamientos normativos IEC y buenas prácticas de confiabilidad.

7.3.4 Fase 4: Sistematización de la información

- Elaboración de tablas y esquemas que relacionen fallas con causas y normativas.
- Mapas conceptuales de fallas recurrentes.
- Identificación de vacíos técnicos y oportunidades para estudios futuros.

Con el fin de organizar, validar y estructurar la información recopilada a lo largo de las fases anteriores, se empleó una matriz de sistematización y validación de la información técnica,

la cual permitió clasificar las fuentes según su pertinencia técnica, el tipo de falla abordada, la referencia normativa asociada y su aplicabilidad dentro del estudio.

Tabla 1

Matriz de sistematización y validación de la información técnica

Categoría analítica	Tipo de fuente	Naturaleza de la información	Uso dentro del estudio
Configuración y función de los CCM	Normativa técnica (IEC 61439) y literatura especializada	Descriptiva – conceptual	Marco teórico
Modos de falla en barrajes de baja tensión	Literatura técnica y normativa (IEC, NFPA)	Técnica – analítica	Sistematización de modos de falla
Prácticas de mantenimiento eléctrico	Normativa y guías técnicas (NFPA 70B, ISO 55000)	Normativa – gerencial	Lineamientos de gestión
Evento ocurrido en la celda N15	Registros de mantenimiento y observación técnica	Descriptiva – contextual	Línea de tiempo
Factores técnicos asociados al evento	Integración de literatura y caso ilustrativo	Interpretativa (no causal)	Discusión de resultados

7.4. Delimitación del estudio

- Alcance limitado a revisión teórica y normativa, sin validación práctica en campo.
- No se incluyen pruebas destructivas, mediciones de condición ni aplicación de herramientas ACR (como FTA, Ishikawa o 5 Porqués) en esta fase.

8. Resultados y análisis del evento

8.1. Descripción general del evento

El evento objeto de análisis corresponde a una falla eléctrica manifestada como arco eléctrico en la celda N15 del CCM 140 de la planta Bioenergy Zona Franca S.A.S., ocurrida durante condiciones normales de operación en el periodo de zafra 2024–2025. El incidente se presentó de manera coincidente con una maniobra de corrección de un punto caliente en las borneras del circuito de control asociado a la operación de las gavetas del sistema, lo que derivó en la detención de múltiples etapas de la cadena de producción de etanol.

Tras el evento inicial, el equipo de mantenimiento eléctrico priorizó la reanudación del funcionamiento del sistema con el fin de minimizar las afectaciones operativas y económicas, sin que se profundizara en la identificación de la causa del incidente. Como consecuencia, pocos segundos después de restablecida la operación, se presentó nuevamente un arco eléctrico en la misma celda, lo que obligó a la detención total del proceso y a la posterior inhabilitación de la celda N15. Este hecho evidenció la necesidad de aplicar metodologías de análisis que permitan comprender de manera estructurada este tipo de eventos, con el fin de evitar su recurrencia tanto en el sistema analizado como en instalaciones de características similares.

8.2. Línea de tiempo

Con el fin de organizar de manera cronológica los hechos relevantes asociados al evento analizado, se presenta a continuación una línea de tiempo que resume las principales intervenciones, condiciones operativas y decisiones técnicas registradas antes, durante y después del incidente ocurrido en la celda N15 del CCM. Esta secuencia temporal se construye a partir de registros de mantenimiento, observaciones técnicas, antecedentes operativos y relatos del personal involucrado en las intervenciones realizadas, utilizados exclusivamente con fines descriptivos, sin realizar inferencias causales ni establecer conclusiones técnicas en esta etapa del estudio.

Tabla 2*Línea de tiempo del evento analizado en la celda N15 del CCM*

Momento temporal	Evento / condición técnica relevante
Junio 2024	Se ejecuta el mantenimiento programado del CCM, que incluyó medición general de aislamiento desde el barraje principal (valores no superiores a 15 MΩ), verificación visual de la integridad del barraje y elementos aisladores, limpieza general de barrajes y celdas, y verificación del ajuste de las uniones principales. En los puntos de difícil acceso, la verificación del ajuste se realizó de forma manual. Estas actividades se alinean con prácticas de mantenimiento recomendadas para conjuntos de baja tensión (IEC 61439; NFPA 70B).
Junio – noviembre 2024	Tras el mantenimiento, el CCM opera en condiciones de carga mínima, alimentando circuitos auxiliares, tomas críticas y tableros de iluminación, hasta el inicio del periodo de producción. Durante este intervalo no se reportan anomalías relevantes en la operación del CCM.
Finales de noviembre 2024	El CCM entra nuevamente en operación bajo condiciones normales de carga, asociadas al inicio del periodo de producción, alcanzando corrientes características del régimen operativo habitual del proceso.
26 de noviembre de 2024 (mañana)	Personal eléctrico detecta un calentamiento anómalo en borneras del circuito de control de las celdas del CCM. Se solicita autorización para intervenir esta condición, la cual se presume asociada a una bornera con ajuste deficiente.
26 de noviembre de 2024 (durante la intervención)	Durante la maniobra de ajuste del circuito de control se presenta un flasheo eléctrico en dicho circuito, generando encendidos y apagados intermitentes de las celdas del CCM y de las cargas asociadas. Esta condición provoca solicitaciones transitorias significativas en el sistema eléctrico.
26 de noviembre de 2024 (primer evento)	Segundos después del flasheo del circuito de control, se presenta un arco eléctrico en la celda N15, específicamente en el barraje auxiliar, ocasionando la salida total del CCM y la detención de una parte significativa del proceso productivo.
26 de noviembre de 2024 (inspección inicial)	El personal de mantenimiento eléctrico prioriza la recuperación operativa del proceso. Se realiza una inspección visual de la celda N15, evidenciando presencia de hollín y rastros de material conductor fundido. Se efectúa medición de aislamiento en el barraje auxiliar afectado, obteniendo valores considerados aceptables para operación.
26 de noviembre de 2024 (primer intento de normalización)	Se decide cortar la sección terminal del barraje auxiliar que alimentaba la última gaveta de la celda, debido al deterioro observado, y se repite la medición de aislamiento. Al no evidenciarse valores que impidieran la operación, se decide normalizar el sistema.
26 de noviembre de 2024 (segundo evento)	Al reenergizar las cargas de la celda N15, el sistema opera durante aproximadamente 10 a 15 segundos, tras lo cual se presenta nuevamente un arco eléctrico en la misma celda. En este segundo evento se observa deformación en los soportes de

Momento temporal	Evento / condición técnica relevante
	los aisladores del barraje auxiliar. No se registran afectaciones al personal ni daños estructurales mayores al CCM.
26 de noviembre de 2024 (acción correctiva inmediata)	Como medida para evitar nuevas recurrencias, se decide desinstalar completamente el barraje auxiliar de la celda N15. Posteriormente, se reanuda la operación del CCM sin las cargas asociadas a dicha celda, logrando la estabilidad del sistema. El tiempo total de intervención desde el primer evento hasta la normalización fue del orden de 5 a 6 horas.
Diciembre 2024 – abril 2025	El CCM opera de forma estable durante el resto del periodo de producción, aunque con la celda N15 fuera de servicio. No se reportan eventos eléctricos de magnitud comparable durante este intervalo.
Investigación posterior (2024–2025)	Se intenta realizar una revisión del evento; sin embargo, esta se limita principalmente a observaciones visuales y a supuestos técnicos basados en relatos del personal, sin la aplicación de una metodología formal de análisis de causa raíz.
Agosto 2025 (mantenimiento programado)	Durante el mantenimiento anual del CCM se evidencian claramente los rastros del evento ocurrido en 2024. Se restauran las condiciones operativas de la celda N15 mediante la instalación de un nuevo juego de aisladores y un nuevo barraje auxiliar. Se realizan mediciones de aislamiento y verificación de torque, obteniendo valores dentro de parámetros aceptables para operación (IEC 61439; NFPA 70B).
Agosto 2025 (hallazgo adicional)	Durante la verificación de las acometidas de las cargas de la celda N15, se detecta que una de ellas presenta deficiencia de aislamiento en la fase T. No es posible establecer con certeza si esta condición existía previo al evento de 2024 o si se desarrolló posteriormente durante el periodo en que la celda permaneció fuera de servicio. La acometida es reemplazada.
Agosto 2025 (mejora del circuito de control)	Se modifica el esquema de alimentación del circuito de control, migrándolo a una fuente regulada independiente, separada de los circuitos de iluminación, calefacción de celdas y motores. Esta medida busca reducir interferencias y mejorar la confiabilidad del sistema de control, en concordancia con buenas prácticas de diseño y mantenimiento eléctrico (NFPA 70B).
Noviembre 2025 – presente	El CCM entra nuevamente en operación bajo condiciones normales de carga al inicio del nuevo periodo de producción, operando de forma estable y sin reportes de anomalías relevantes hasta la fecha.

Nota. Elaborado a partir de registros de mantenimiento y observaciones técnicas.

8.3. Sistematización de resultados

A partir de la revisión de literatura técnica, normativa internacional y reportes documentados de fallas en Centros de Control de Motores de baja tensión, es posible identificar un conjunto recurrente de modos de falla asociados a los sistemas de barrajes. Estos modos de falla

no se presentan de forma aislada, sino que suelen responder a la interacción entre condiciones operativas, características constructivas, prácticas de mantenimiento y factores ambientales.

Para efectos de este estudio, los modos de falla identificados se agrupan en categorías funcionales, con el fin de facilitar su análisis y posterior sistematización, sin que dicha clasificación implique una jerarquización de severidad ni una atribución causal directa al evento analizado, dado que la mención de estos mecanismos se realiza exclusivamente con base en la revisión de literatura técnica y normativa.

8.3.1 Modos de falla de origen térmico

Los modos de falla de origen térmico se encuentran entre los más documentados en sistemas de barrajes de CCM de baja tensión y suelen estar asociados a incrementos localizados de temperatura derivados de conexiones deficientes, pérdida de torque en uniones atornilladas, aumento de la resistencia de contacto o condiciones de carga sostenidas. El calentamiento progresivo puede favorecer la degradación del aislamiento y acelerar procesos de envejecimiento de los materiales conductores y dieléctricos (IEC 61439; NFPA 70B).

De manera no exhaustiva, la literatura técnica reporta dentro de esta categoría los siguientes modos de falla:

- Sobre calentamiento localizado en uniones atornilladas.
- Incremento de la resistencia de contacto en conexiones del barraje.
- Degradación térmica del aislamiento.
- Carbonización superficial de materiales aislantes.
- Fusión localizada de material conductor.

8.3.2 Modos de falla de origen mecánico

Esta categoría comprende fallas relacionadas con la integridad física del sistema de barras y sus elementos asociados, tales como soportes aislantes, herrajes de fijación y sistemas de sujeción. Vibraciones operativas, esfuerzos electrodinámicos durante maniobras y deficiencias en el montaje pueden generar desplazamientos, deformaciones o pérdida de alineación, incrementando la probabilidad de fallas eléctricas posteriores (IEC 61439; IEEE Std 3007.2).

Entre los modos de falla comúnmente asociados a esta categoría se identifican:

- Aflojamiento progresivo de uniones mecánicas.
- Deformación de soportes y aisladores.
- Desalineación de secciones de barra.
- Daños mecánicos ocasionados durante intervenciones de mantenimiento.
- Fatiga mecánica inducida por vibraciones.

8.3.3 Modos de falla asociados al deterioro del aislamiento

El deterioro de los sistemas aislantes constituye un mecanismo crítico en la evolución de fallas en barrajes de CCM. Factores como la contaminación superficial, la humedad, el envejecimiento térmico y la presencia de gradientes elevados de campo eléctrico pueden favorecer procesos de degradación progresiva del aislamiento. La literatura técnica reconoce que fenómenos como el tracking superficial y las descargas parciales de tipo superficial pueden actuar como mecanismos latentes, contribuyendo a la pérdida de rigidez dieléctrica sin generar inicialmente un cortocircuito franco (IEC 60270; IEC 61439; NFPA 70B).

Dentro de esta categoría se documentan, entre otros, los siguientes modos de falla:

- Tracking superficial sobre materiales aislantes.
- Descargas parciales de tipo superficial.
- Formación de trayectorias conductivas por contaminación.
- Pérdida progresiva de rigidez dieléctrica.
- Envejecimiento acelerado del aislamiento.

8.3.4 Modos de falla de origen eléctrico y transitorio

Los modos de falla de origen eléctrico se asocian a solicitudes que superan la capacidad dieléctrica o de conducción del sistema, particularmente durante maniobras, reconexiones, energizaciones bajo carga o eventos transitorios. Estas condiciones pueden actuar como factores desencadenantes en sistemas que presentan deterioros latentes previamente no detectados (IEEE Std 141; NFPA 70B).

Entre los modos de falla reportados en esta categoría se incluyen:

- Flasheo eléctrico entre fases o entre fase y tierra.
- Arco eléctrico en barrajes o conexiones.

- Sobreensiones transitorias asociadas a maniobras.
- Solicitaciones eléctricas durante arranques simultáneos de cargas.
- Fallas dieléctricas bajo condiciones transitorias.

8.3.5 *Modos de falla asociados a prácticas de mantenimiento*

La literatura especializada también identifica modos de falla relacionados con prácticas de mantenimiento y operación que, sin constituir fallas en sí mismas, influyen en la evolución de mecanismos de deterioro preexistentes. Inspecciones limitadas, verificaciones de torque incompletas o la normalización del sistema sin eliminación de condiciones latentes pueden incrementar la probabilidad de eventos eléctricos no planificados (NFPA 70B; ISO 55000).

Dentro de esta categoría se reconocen los siguientes modos de falla asociados:

- Verificación de torque incompleta o no instrumentada.
- Intervenciones en circuitos energizados.
- Normalización del sistema priorizando la continuidad operativa.
- Falta de segregación adecuada de circuitos auxiliares.
- Ausencia de seguimiento sistemático a condiciones incipientes.

8.4. Relación entre eventos operativos y fallas documentadas en la literatura

A partir de la línea de tiempo del evento analizado y de las condiciones técnicas observadas durante las actividades de operación y mantenimiento del CCM, es posible establecer una relación conceptual entre determinados eventos y prácticas operativas y los mecanismos de falla descritos en la literatura técnica y normativa aplicable. Esta relación se presenta con fines analíticos y descriptivos, sin que implique la atribución directa de causalidad al evento ocurrido.

Diversas prácticas de mantenimiento identificadas en el sistema, como los procedimientos de limpieza de rejillas aislantes mediante inmersión en soluciones acuosas con desengrasantes, pueden asociarse con mecanismos de deterioro del aislamiento superficial ampliamente documentados. La literatura técnica señala que la presencia de residuos contaminantes y humedad residual sobre materiales aislantes puede favorecer la aparición de descargas parciales superficiales y fenómenos de tracking, contribuyendo a la degradación progresiva de la rigidez dieléctrica.

Adicionalmente, durante la inspección posterior al evento se observaron marcas superficiales en uno de los aisladores del barraje auxiliar de la celda N15, con patrones que sugerían trayectorias preferenciales del campo eléctrico. Este tipo de manifestaciones ha sido descrito en estudios técnicos como indicativo de procesos de deterioro superficial del aislamiento asociados a gradientes elevados de campo eléctrico y a descargas parciales de tipo superficial, particularmente en presencia de contaminación.

Observaciones similares fueron identificadas en otro conjunto de control de motores de la planta (CCM180) durante actividades de mantenimiento posteriores, donde se evidenciaron huellas térmicas localizadas, marcas superficiales en aisladores y contaminación en elementos de separación. Si bien estos hallazgos no constituyen evidencia directa del evento analizado, refuerzan la pertinencia de los mecanismos de falla descritos en la literatura para sistemas de características similares.

En cuanto a las condiciones operativas, la maniobra de intervención sobre el circuito de control realizada previo al evento puede interpretarse, desde un enfoque conceptual, como una solicitud eléctrica y térmica transitoria. La literatura reconoce que este tipo de solicitudes puede actuar como factor desencadenante en sistemas que presentan condiciones latentes de deterioro, sin que por sí sola constituya una causa raíz del evento.

Finalmente, se identifican limitaciones inherentes a las prácticas de mantenimiento, como la dificultad para aplicar verificaciones de torque instrumentadas en puntos de acceso restringido y la dependencia de inspecciones visuales para evaluar la integridad de componentes críticos del sistema de barrajes. Estas condiciones, ampliamente reconocidas en normas y guías de mantenimiento eléctrico, influyen en la capacidad de detección temprana de fallas incipientes y en la evolución de mecanismos de deterioro previamente descritos.

- **Comparación de los hallazgos con mecanismos de falla reportados en la literatura:**

En conjunto, las condiciones observadas durante la inspección y las prácticas de mantenimiento identificadas presentan características que guardan correspondencia con los mecanismos de deterioro del aislamiento descritos en la literatura técnica, particularmente aquellos asociados a contaminación superficial, descargas parciales y degradación térmica de materiales aislantes.

Aunque la información disponible no permite establecer de manera concluyente la ocurrencia específica de alguno de estos mecanismos como causa directa del evento, el análisis

comparativo sugiere que las condiciones identificadas son consistentes con modos de falla reportados en sistemas de características similares.

Tabla 3

Relación entre observaciones del sistema CCM, mecanismos de falla descritos en la literatura y normativa técnica aplicable

Observación durante inspección y análisis del evento	Mecanismo de falla descrito en la literatura	Normativa o referencia técnica asociada
Presencia de contaminación y posibles residuos posteriores a procesos de limpieza mediante soluciones acuosas con desengrasantes en elementos aislantes.	Contaminación superficial del aislamiento que puede favorecer la aparición de descargas parciales superficiales y fenómenos de tracking, reduciendo progresivamente la rigidez dieléctrica del material aislante.	IEEE Std 43 – <i>Recommended Practice for Testing Insulation Resistance of Electric Machinery</i> ; IEC 60587 – <i>Electrical insulating materials used under severe ambient conditions – Test methods for evaluating resistance to tracking</i> .
Marcas superficiales observadas en aisladores del barraje auxiliar de la celda N15 con patrones que sugieren trayectorias preferenciales del campo eléctrico.	Deterioro superficial del aislamiento asociado a gradientes elevados de campo eléctrico y posibles descargas parciales superficiales, especialmente en presencia de contaminación.	IEC 60270 – <i>Partial Discharge Measurements</i> ; IEEE Std 1434 – <i>Guide to the Measurement of Partial Discharges in Rotating Machinery</i> .
Evidencia de huellas térmicas localizadas y contaminación en aisladores y elementos de separación identificadas en otro CCM (CCM180) durante actividades de mantenimiento posteriores.	Procesos de degradación térmica del aislamiento y envejecimiento de materiales dieléctricos debido a solicitaciones térmicas o eléctricas acumuladas en el tiempo.	IEEE Std 3007.2 – <i>Recommended Practice for the Maintenance of Industrial and Commercial Power Systems</i> .
Maniobra de intervención sobre el circuito de control previa al evento, que implicó energización y operación del sistema.	Solicitaciones eléctricas transitorias que pueden actuar como factores desencadenantes en sistemas que presentan condiciones latentes de deterioro del aislamiento.	NFPA 70B – <i>Standard for Electrical Equipment Maintenance</i> ; IEEE Std 141 – <i>IEEE Red Book</i> .
Limitaciones en prácticas de mantenimiento, como dificultad para verificar torque en conexiones de acceso restringido y dependencia de inspecciones visuales.	Posible degradación progresiva de conexiones eléctricas y dificultad para detectar fallas incipientes en sistemas de barrajes o aislamiento.	NFPA 70B – <i>Electrical Equipment Maintenance</i> ; IEEE Std 3007.3 – <i>Electrical Preventive Maintenance</i> .

8.5. Correspondencia con normativa técnica aplicable

El análisis documental desarrollado en este estudio permite establecer una correspondencia conceptual entre los modos de falla identificados en la literatura técnica y los lineamientos establecidos por la normativa internacional aplicable a sistemas de baja tensión y Centros de Control de Motores. Esta correspondencia no tiene como propósito evaluar el grado de cumplimiento normativo del CCM objeto de estudio, sino utilizar las normas como marco de referencia para interpretar los mecanismos de deterioro y las condiciones operativas descritas.

8.5.1 Correspondencia con IEC 61439 – Ensamblajes de baja tensión

La norma IEC 61439 establece requisitos de diseño, construcción y verificación para conjuntos de aparamenta de baja tensión, incluyendo CCM. En particular, introduce criterios relacionados con la capacidad de soportar solicitaciones térmicas, mecánicas y eléctricas durante la operación normal y bajo condiciones anormales previsibles.

Los modos de falla de origen térmico y mecánico descritos en este estudio guardan relación directa con los requisitos de la norma en cuanto a:

- continuidad del circuito de protección,
- resistencia mecánica de soportes y aisladores,
- comportamiento térmico de uniones y conexiones,
- capacidad de soportar esfuerzos electrodinámicos.

Desde esta perspectiva, la normativa reconoce que el desempeño del sistema de barrajes depende no solo de su diseño inicial, sino también de la conservación de las condiciones para las cuales fue verificado, aspecto estrechamente ligado a las prácticas de mantenimiento.

8.5.2 Correspondencia con NFPA 70B – Mantenimiento de equipos eléctricos

NFPA 70B proporciona lineamientos para la implementación de programas de mantenimiento eléctrico basados en condición y riesgo. La norma destaca la importancia de identificar y gestionar condiciones incipientes que, de no ser atendidas oportunamente, pueden evolucionar hacia fallas de mayor severidad.

Los modos de falla asociados al deterioro del aislamiento, al incremento de resistencia de contacto y a prácticas de mantenimiento incompletas se alinean con los mecanismos de falla que NFPA 70B busca mitigar mediante:

- inspecciones visuales sistemáticas,
- verificación de conexiones,
- control de contaminación,
- segregación adecuada de circuitos auxiliares y de control.

En este sentido, la norma enfatiza que la ausencia de señales evidentes de falla no implica necesariamente la inexistencia de procesos de deterioro en curso.

8.5.3 Correspondencia con IEC 60364 – Instalaciones eléctricas de baja tensión

IEC 60364 establece principios generales para la seguridad, confiabilidad y mantenimiento de instalaciones eléctricas de baja tensión. La norma introduce el concepto de verificación periódica como mecanismo para asegurar que las condiciones de seguridad se mantengan a lo largo del tiempo.

Los fenómenos de deterioro progresivo del aislamiento, las solicitaciones transitorias asociadas a maniobras y la pérdida de rigidez dieléctrica descritos en la clasificación de modos de falla encuentran respaldo conceptual en los requisitos de esta norma, particularmente en lo relacionado con:

- prevención de contactos indirectos,
- control de condiciones ambientales,
- mantenimiento de las características dieléctricas de los componentes.

8.5.4 Correspondencia con normas y guías de gestión del mantenimiento y activos

Desde una perspectiva de gestión, normas como ISO 55000 y documentos de buenas prácticas en mantenimiento eléctrico resaltan la necesidad de integrar la información técnica, operativa y de mantenimiento para la toma de decisiones.

La presencia de condiciones latentes, la priorización de la continuidad operativa y la ausencia de análisis estructurado posterior a eventos eléctricos no planificados son aspectos

ampliamente reconocidos en la literatura como desafíos recurrentes en la gestión de activos eléctricos críticos. En este contexto, la normativa no prescribe soluciones únicas, pero sí promueve enfoques sistemáticos orientados a reducir la recurrencia de eventos y a mejorar la confiabilidad del sistema.

8.5.5 Consideración metodológica

La correspondencia normativa presentada se limita a un análisis conceptual y documental, sin realizar inferencias sobre incumplimientos específicos ni evaluaciones de conformidad del CCM analizado. Su finalidad es proporcionar un marco técnico que permita contextualizar los modos de falla identificados y sustentar la discusión posterior desde una perspectiva normativa y de gestión.

La presente matriz tiene carácter exclusivamente sintético e integrador. Su finalidad es facilitar la visualización conjunta de los modos de falla identificados, su relación conceptual con el evento analizado y la correspondencia con la normativa técnica aplicable. La información contenida en la matriz se fundamenta en el análisis desarrollado en los apartados 6.3, 6.4 y 6.5, sin que implique la atribución de causalidad directa, la evaluación de cumplimiento normativo ni la sustitución del desarrollo analítico presentado en el texto.

Tabla 4

Matriz de síntesis de los modos de falla del sistema de barrajes, su relación con el evento analizado y la normativa aplicable.

Tipo de modo de falla	Relación con el evento analizado	Norma(s) aplicable(s)	Alcance normativo	Enfoque general de mantenimiento
Modos de falla de origen térmico	Evidenciado de manera indirecta a través de huellas térmicas localizadas observadas durante actividades de mantenimiento posteriores en sistemas de características similares.	IEC 61439, NFPA 70B	Diseño y mantenimiento	Predictivo / control operativo
Modos de falla de origen mecánico	Relacionados de forma conceptual con las condiciones operativas y de mantenimiento descritas, sin evidencia directa observada durante el evento analizado.	IEC 61439	Diseño y mantenimiento	Preventivo

Tipo de modo de falla	Relación con el evento analizado	Norma(s) aplicable(s)	Alcance normativo	Enfoque general de mantenimiento
Modos de falla asociados al deterioro del aislamiento	Evidenciado mediante marcas superficiales observadas en un aislador del barraje auxiliar de la celda N15.	IEC 61439, NFPA 70B, IEC 60364	Diseño, operación y mantenimiento	Basado en condición
Modos de falla de origen eléctrico y transitorio	Relacionados conceptualmente con la maniobra de intervención previa al evento, interpretada como una solicitud eléctrica y térmica transitoria.	IEC 60364, NFPA 70B	Operación	Control operativo
Modos de falla asociados a prácticas de mantenimiento	Evidenciados a partir de las limitaciones identificadas en las prácticas de mantenimiento descritas en el análisis.	NFPA 70B, ISO 55000	Gestión del activo	Gestión del mantenimiento

8.6. Vacíos técnicos identificados y oportunidades de estudio

A partir de la sistematización de la información técnica, del análisis documental y de la revisión del evento ocurrido en la celda N15 del CCM, se identifican algunos vacíos técnicos y oportunidades de estudio que no deben interpretarse como incumplimientos normativos ni como deficiencias en la gestión del mantenimiento, sino como aspectos inherentes a la complejidad de los sistemas eléctricos industriales y a las limitaciones propias de los enfoques operativos tradicionales.

8.6.1 Vacíos técnicos identificados

Si bien el CCM cuenta con sistemas de medición y supervisión que permiten el registro continuo de variables eléctricas tales como corriente y tensión, estos registros se encuentran orientados principalmente al seguimiento operativo del sistema bajo condiciones nominales de carga. En el contexto del evento analizado, no se dispuso de información registrada con resolución temporal suficiente para caracterizar solicitudes transitorias de corta duración, tales como picos instantáneos de corriente, sobretensiones asociadas a maniobras o fenómenos de energización y desenergización rápida de cargas. Esta limitación no responde a la ausencia de instrumentación, sino a las capacidades propias de los transformadores de medida, a las configuraciones de adquisición y almacenamiento del sistema de control, y al enfoque operativo del sistema de

supervisión, el cual no está diseñado para la captura detallada de eventos eléctricos de naturaleza transitoria.

Adicionalmente, se identifica la dificultad de detectar y documentar condiciones incipientes de deterioro en elementos del sistema de barrajes, tales como contaminación superficial, degradación progresiva del aislamiento o pérdida gradual de las características mecánicas de soportes y fijaciones. Estos mecanismos, ampliamente documentados en la literatura técnica, pueden evolucionar de manera silenciosa y no siempre son evidenciables mediante inspecciones visuales convencionales o mediciones eléctricas básicas.

Desde el punto de vista operativo, también se reconoce que las actividades de mantenimiento programado pueden verse condicionadas por limitaciones de acceso físico, restricciones de tiempo y la priorización de la continuidad del proceso productivo. Estas condiciones no constituyen fallas del mantenimiento, pero sí representan factores que influyen en la gestión de riesgos asociados a activos eléctricos críticos.

9. Conclusiones y consideraciones finales

El presente trabajo abordó el análisis de un evento eléctrico ocurrido en la celda N15 de un Centro de Control de Motores de baja tensión, a partir de un enfoque documental, técnico y contextual, orientado a la comprensión de los mecanismos de deterioro y de las condiciones operativas asociadas a sistemas de barrajes. El estudio no tuvo como objetivo la determinación de una causa raíz específica, sino la integración de antecedentes normativos, técnicos y operativos que permitieran estructurar una visión más amplia sobre este tipo de eventos en entornos industriales complejos.

El análisis se desarrolló a partir de la revisión de literatura especializada, normativa técnica internacional y registros disponibles del evento, complementados con una línea de tiempo que permitió organizar cronológicamente las condiciones previas, las acciones realizadas durante el incidente y las decisiones adoptadas posteriormente. Este enfoque permitió contextualizar el evento dentro de un marco técnico más amplio, sin incurrir en inferencias causales directas ni en evaluaciones de cumplimiento normativo en campo.

Desde el punto de vista metodológico, el uso combinado de análisis documental y de un caso ilustrativo se considera pertinente para el alcance definido del estudio. Este enfoque permite comprender cómo los modos de falla descritos en la literatura pueden manifestarse en sistemas reales, sin requerir la aplicación de metodologías formales de análisis de causa raíz ni la instrumentación avanzada de diagnóstico. A diferencia de enfoques puramente experimentales o auditorías técnicas, la metodología adoptada facilita una lectura integrada del evento, considerando tanto aspectos técnicos como decisiones operativas y de gestión del mantenimiento.

Uno de los principales aportes del trabajo es la identificación y clasificación de modos de falla recurrentes en sistemas de barrajes de CCM de baja tensión, agrupados en categorías funcionales que incluyen mecanismos térmicos, mecánicos, eléctricos, de deterioro del aislamiento y asociados a prácticas de mantenimiento. Esta clasificación no pretende ser exhaustiva ni jerarquizar severidades, sino servir como una herramienta de sistematización que facilite el análisis y la gestión de activos eléctricos críticos.

De manera transversal, el estudio resalta la importancia de las condiciones latentes como elemento clave en la evolución de eventos eléctricos. Factores como el deterioro progresivo del aislamiento, la contaminación superficial, la pérdida gradual de torque en conexiones o las limitaciones de acceso durante actividades de mantenimiento pueden permanecer sin manifestarse durante largos periodos, hasta que una solicitud operativa o una intervención puntual actúa

como elemento desencadenante. En este sentido, el trabajo pone de relieve las limitaciones inherentes a las inspecciones visuales tradicionales y a las mediciones eléctricas orientadas exclusivamente a condiciones nominales de operación.

Asimismo, se evidencia el rol que desempeñan las decisiones operativas en sistemas eléctricos críticos, particularmente en escenarios donde la continuidad del proceso productivo constituye una prioridad. La priorización de la reanudación del servicio, las intervenciones correctivas bajo presión operativa y la gestión del riesgo en tiempo real forman parte del contexto industrial real y no deben interpretarse como deficiencias del mantenimiento, sino como elementos que condicionan la gestión de activos en entornos de alta exigencia.

En cuanto al alcance del trabajo, es importante destacar que este estudio aporta una visión integradora y contextual del evento analizado, apoyada en fundamentos técnicos y normativos, pero deliberadamente no desarrolla un análisis causal profundo ni aplica metodologías formales de análisis de causa raíz. Esta delimitación es coherente con el carácter monográfico del trabajo, con el enfoque de revisión documental adoptado y con los objetivos planteados desde el inicio del proyecto.

Finalmente, el trabajo ofrece una base conceptual y técnica que puede resultar útil tanto a la organización donde ocurrió el evento como a estudios futuros en el ámbito de la gestión del mantenimiento eléctrico. Los resultados permiten fortalecer la comprensión de los mecanismos de deterioro en sistemas de barrajes, apoyar la toma de decisiones en activos críticos y servir como referencia para el desarrollo de análisis más profundos, cuando las condiciones operativas y los recursos disponibles así lo permitan. Desde una perspectiva académica y profesional, la monografía contribuye a reforzar la importancia de enfoques integrados que articulen normativa, técnica y gestión en el análisis de eventos eléctricos industriales.

9.1. Oportunidades de estudio y profundización futura

A partir de los vacíos identificados, se evidencian oportunidades relevantes para estudios futuros orientados a fortalecer la confiabilidad y la gestión de activos eléctricos similares. Entre estas se destacan:

- La incorporación de técnicas de diagnóstico complementarias aplicables a sistemas de barrajes, tales como inspecciones dieléctricas focalizadas, monitoreo térmico periódico y evaluación del estado de aisladores en zonas críticas.

- El análisis de la interacción entre circuitos de control, circuitos auxiliares y barrajes de potencia, particularmente en escenarios de maniobras, correcciones de condiciones incipientes o intervenciones bajo condiciones operativas exigentes.
- El desarrollo de estudios que integren enfoques técnicos y gerenciales, permitiendo evaluar cómo las decisiones orientadas a la continuidad operativa influyen en la evolución de condiciones latentes en activos eléctricos críticos.
- La aplicación controlada de metodologías formales de análisis de eventos eléctricos en estudios futuros, con alcances claramente definidos y soporte instrumental adecuado, que permitan profundizar en la comprensión de los mecanismos de deterioro y falla sin comprometer la operación del sistema productivo.

9.2. Proyección del análisis hacia la gestión del mantenimiento y el análisis causal

El análisis desarrollado en el presente trabajo, centrado en la identificación y sistematización de modos de falla en sistemas de barrajes de Centros de Control de Motores de baja tensión, permite trascender el carácter descriptivo del evento analizado y proyectar su utilidad hacia la toma de decisiones técnicas y de gestión del mantenimiento. Sin constituir un plan de mantenimiento ni una evaluación normativa del sistema estudiado, los resultados obtenidos ofrecen una base estructurada para orientar acciones futuras de inspección, diagnóstico y análisis más profundo de fallas eléctricas en activos críticos, particularmente en contextos industriales donde la continuidad operativa impone restricciones técnicas y organizacionales reales.

Desde esta perspectiva, la proyección del análisis se aborda en dos dimensiones complementarias: por un lado, la articulación con lineamientos normativos que orientan la definición de acciones de mantenimiento basadas en condición y riesgo; y, por otro, la posibilidad de evolución hacia metodologías formales de análisis causal, apoyadas en información técnica más detallada y en datos de condición obtenidos en campo.

9.3. Proyección normativa de acciones de mantenimiento asociadas a los modos de falla identificados

Los modos de falla sistematizados en este estudio (térmicos, mecánicos, eléctricos, asociados al deterioro del aislamiento y vinculados a prácticas de mantenimiento), se encuentran

ampliamente reconocidos en la normativa técnica internacional como mecanismos recurrentes en sistemas de distribución de baja tensión. Normas como IEC 61439, NFPA 70B, IEC 60364 e ISO 55000 no prescriben acciones únicas ni frecuencias rígidas de intervención, sino que promueven enfoques de mantenimiento basados en condición, criticidad del activo y nivel de riesgo operativo, aspecto especialmente relevante en instalaciones industriales de operación continua (NFPA 70B; ISO 55000).

En este contexto, el análisis desarrollado permite proyectar, a nivel conceptual, acciones de mantenimiento alineadas con dichos lineamientos normativos, tales como inspecciones periódicas orientadas a la detección temprana de condiciones incipientes, verificaciones instrumentadas en puntos críticos del sistema de barrajes, control sistemático de condiciones ambientales y seguimiento a la integridad de conexiones mecánicas y sistemas aislantes. La definición de frecuencias para estas acciones no se plantea como un valor fijo, sino como una variable dependiente de factores propios de cada instalación, incluyendo el régimen de operación, el historial de eventos, las limitaciones de acceso físico y la criticidad del proceso productivo, tal como se reconoce en la literatura especializada en mantenimiento predictivo y basado en condición (Mobley, 2002).

De manera particular, los modos de falla de origen térmico y aquellos asociados al incremento de la resistencia de contacto encuentran respaldo normativo en la aplicación de técnicas de diagnóstico como la termografía infrarroja y la verificación periódica de uniones, prácticas ampliamente referenciadas en NFPA 70B. Asimismo, los mecanismos de deterioro progresivo del aislamiento, el tracking superficial y las descargas parciales de tipo superficial se relacionan con recomendaciones normativas orientadas al control de contaminación, humedad y envejecimiento de materiales, así como a la evaluación de la rigidez dieléctrica en condiciones representativas de operación, cuando estas son técnicamente viables.

9.4. Proyección del análisis hacia metodologías formales de análisis causal

Adicionalmente, el presente trabajo establece una base conceptual sólida para la aplicación futura de metodologías formales de análisis de causa raíz, tales como el RCA, el FTA, el FMEA o el uso de diagramas de Ishikawa. La identificación y clasificación de modos de falla realizada constituye un paso previo fundamental para este tipo de metodologías, al permitir estructurar de

manera lógica los mecanismos de deterioro y las posibles interacciones entre condiciones técnicas, operativas y de mantenimiento observadas en sistemas reales, de acuerdo con enfoques establecidos en normas y guías técnicas internacionales (IEC 61025; IEC 60812).

La proyección hacia estos enfoques analíticos requeriría la incorporación de información adicional, como datos de condición obtenidos mediante técnicas de diagnóstico, registros históricos de operación y mantenimiento, así como una mayor instrumentación del sistema. No obstante, el presente estudio demuestra que incluso en ausencia de estos elementos, es posible construir un marco técnico que facilite la comprensión de eventos eléctricos complejos y prepare el terreno para análisis más profundos cuando las condiciones operativas, técnicas y organizacionales así lo permitan.

En este sentido, el trabajo pone de manifiesto la importancia de contar con información estructurada y documentada como punto de partida para evitar interpretaciones aisladas o exclusivamente reactivas frente a eventos eléctricos no planificados. La transición desde un análisis descriptivo hacia metodologías formales de análisis causal no debe entenderse como un proceso inmediato ni automático, sino como una evolución progresiva que se apoya en la sistematización previa de modos de falla, en la articulación con la normativa técnica aplicable y en la integración de criterios de gestión del mantenimiento y del riesgo, tal como se plantea en la literatura especializada sobre análisis de fallas y confiabilidad (Bloch & Geitner, 2012).

10. Referencias bibliográficas

- Aguilar, J. (2023). *Mantenimiento centrado en confiabilidad en sistemas eléctricos industriales*. Editorial Técnica Latinoamericana.
- Alsumaidae, A., Alenezi, A., & Gungor, V. C. (2022). Smart predictive maintenance in power distribution systems using AI and IoT. *IEEE Access*, 10, 56248–56259.
- Arrieta, P., & Carrillo, M. (2022). Monitoreo predictivo de barras colectoras mediante inspección infrarroja. *Revista Colombiana de Mantenimiento Industrial*, 10(2), 34–41.
- Benítez, C., Rodríguez, S., & Vásquez, E. (2018). Evaluación de sistemas eléctricos mediante pruebas de torque y resistencia de contacto. *Ingeniería y Desarrollo*, 36(1), 95–109.
- Bloch, H. P., & Geitner, F. K. (2012). *Machinery failure analysis and troubleshooting*. Elsevier.
- Chau, D., & Liew, A. (2019). Infrared thermography in electrical system diagnostics: Case studies and methodology. *Electrical Engineering Journal*, 26(3), 57–65.
- Chávez, H., Castro, M., & Patiño, L. (2020). Evaluación de fallas térmicas en sistemas de distribución industrial. *Revista de Energía y Mantenimiento*, 9(1), 23–31.
- Comisión Federal de Electricidad (CFE). (2021). *Norma V6300-21: Especificaciones técnicas para centros de control de motores*. CFE.
- Cooper, D., Seely, J., & Wallace, K. (2021). *Electrical reliability engineering handbook*. CRC Press.
- Cooper, M., Lee, H., & Thompson, D. (2021). *Asset management in electrical systems*. McGraw-Hill Education.
- Dekker, S. (2014). *The field guide to understanding human error*. CRC Press.
- García, C., & Moreno, S. (2022). *Gestión integral de activos eléctricos industriales*. Editorial Energía y Desarrollo.
- Gómez, R., & Martínez, L. (2023). *Confiabilidad en sistemas eléctricos industriales*. Ediciones Electricidad y Automatización.
- González, F. (2022). Corrosión en conductores eléctricos en ambientes agresivos. *Revista Técnica de Materiales Eléctricos*, 17(3), 40–52.
- Gutiérrez, M. (2023). Protocolos de mantenimiento predictivo basados en condición para CCM. *Revista Internacional de Ingeniería Eléctrica*, 15(2), 71–82.

- Institute of Electrical and Electronics Engineers (IEEE). (2018). *IEEE Std 1584: Guide for performing arc-flash hazard calculations*. IEEE:
- Institute of Electrical and Electronics Engineers (IEEE). (2020). *IEEE Std 141-2020: Recommended practice for electric power distribution for industrial plants*. IEEE.
- International Electrotechnical Commission (IEC). (2013). *IEC 60587: Electrical insulating materials used under severe ambient conditions – Test methods for resistance to tracking and erosion*. International Electrotechnical Commission. IEC:
- International Electrotechnical Commission (IEC). (2016). *IEC 60243-1: Electric strength of insulating materials – Test methods*. International Electrotechnical Commission. IEC.
- International Electrotechnical Commission (IEC). (2006). *IEC 61025: Fault tree analysis (FTA)*. IEC.
- International Electrotechnical Commission (IEC). (2015). *IEC 62740: Root cause analysis (RCA)*. IEC.
- International Electrotechnical Commission (IEC). (2016). *IEC 60364-6: Low-voltage electrical installations – Verification*. IEC.
- International Electrotechnical Commission (IEC). (2018). *IEC 60812: Failure modes and effects analysis (FMEA and FMECA)*. IEC.
- International Electrotechnical Commission (IEC). (2018). *IEC TS 61936-1: Power installations exceeding 1 kV AC and 1.5 kV DC – Common rules*. International Electrotechnical Commission. IEC.
- International Electrotechnical Commission (IEC). (2019). *IEC TR 60890: Thermal evaluation of low-voltage switchgear assemblies*. IEC.
- International Electrotechnical Commission (IEC). (2020). *IEC 61439-1: Low-voltage switchgear and controlgear assemblies – General rules*. IEC.
- International Electrotechnical Commission (IEC). (2020). *IEC 61439-2: Power switchgear and controlgear assemblies*. IEC.
- International Electrotechnical Commission (IEC). (2020). *IEC 61439-6: Busbar trunking systems*. IEC.
- International Organization for Standardization.(ISO). (2011). *ISO 31000: Risk management – Principles and guidelines*. ISO.

- International Organization for Standardization.(ISO). (2014). *ISO 55000: Asset management – Overview, principles and terminology*. International Organization for Standardization. ISO.
- International Organization for Standardization.(ISO). (2014). *ISO 55001: Asset management – Management systems – Requirements*. ISO.
- Jankovski, I., Pereira, R., & Silva, T. (2023). Electrical busbar systems in industrial environments: Performance and risk. *Journal of Industrial Power Systems*, 14(1), 5–17.
- Mobley, R. K. (2002). *An introduction to predictive maintenance*. Butterworth-Heinemann.
- Mobley, R. K. (2002). *Root cause failure analysis*. Butterworth-Heinemann.
- Moubray, J. (1997). *Reliability-centered maintenance*. Industrial Press Inc.
- National Fire Protection Association.(NFPA). (2023). *NFPA 70B: Recommended practice for electrical equipment maintenance*. NFPA.
- Ohno, T. (1988). *Toyota production system: Beyond large-scale production*. Productivity Press.
- Reason, J. (1997). *Managing the risks of organizational accidents*. Ashgate.
- RHI Electric. (2025). *Diagnóstico de sobrecalentamiento en barras de cobre* [Informe técnico corporativo].
- Rodríguez, H., & Mendoza, A. (2024). Evaluación técnica de fallas por arco eléctrico en barrajes industriales. *Revista Latinoamericana de Ingeniería Eléctrica*, 18(2), 60–73.
- Rodríguez, S. (2021). Aplicación del análisis FTA en sistemas eléctricos de baja tensión. *Revista de Gestión y Energía*, 13(3), 88–101.
- Sánchez, M., & Parra, J. (2023). Efectos de la expansión térmica en sistemas de barraje de cobre. *Revista Técnica de Ingeniería Industrial*, 11(4), 44–55.
- Silva, R., & Gómez, A. (2021). Consideraciones mecánicas y térmicas en barrajes de baja tensión. *Revista de Tecnología Energética*, 9(1), 35–46.
- Stamatis, D. H. (2019). *The basics of FMEA*. CRC Press.
- Stone, G. C., Boulter, E. A., Culbert, I., & Dhirani, H. (2014). *Electrical insulation for rotating machines*. Wiley-IEEE Press.
- Yang, H., Wang, C., & Li, T. (2023). Deep anomaly detection in copper conductors. *Journal of Electrical Diagnostics*, 29(2), 90–105.