

ESCUELA POLITÉCNICA NACIONAL

FACULTAD DE INGENIERÍA ELÉCTRICA Y ELECTRÓNICA

EVOLUCIÓN DE LAS POLÍTICAS Y PROGRAMAS DE MANTENIMIENTO DE EQUIPO ELÉCTRICO DE SUBESTACIONES Y LÍNEAS DE TRANSMISIÓN DE ALTO VOLTAJE

MÉTODOS DE MANTENIMIENTO APLICADOS EN INTERRUPTORES DE ALTO VOLTAJE

**TRABAJO DE INTEGRACIÓN CURRICULAR PRESENTADO COMO
REQUISITO PARA LA OBTENCIÓN DEL TÍTULO DE INGENIERA ELÉCTRICA**

JOSELYN LIZETH CHANCUSA DUQUE

joselyn.chancusa@epn.edu.ec

DIRECTOR: Dr.-Ing. FAUSTO RAMIRO VALENCIA ARCOS

fausto.valencia@epn.edu.ec

DMQ, Julio 2024

CERTIFICACIONES

Yo, Joselyn Lizeth Chancusa Duque declaro que el trabajo de integración curricular aquí descrito es de mi autoría; que no ha sido previamente presentado para ningún grado o calificación profesional; y, que he consultado las referencias bibliográficas que se incluyen en este documento.

Joselyn Lizeth Chancusa Duque

Certifico que el presente trabajo de integración curricular fue desarrollado por Joselyn Lizeth Chancusa Duque bajo mi supervisión.

Dr.-Ing. Fausto Ramiro Valencia Arcos

DECLARACIÓN DE AUTORÍA

A través de la presente declaración, afirmamos que el trabajo de integración curricular aquí descrito, así como el producto resultante del mismo, son públicos y estarán a disposición de la comunidad a través del repositorio institucional de la Escuela Politécnica Nacional; sin embargo, la titularidad de los derechos patrimoniales nos corresponde a los autores que hemos contribuido en el desarrollo del presente trabajo; observando para el efecto las disposiciones establecidas por el órgano competente en propiedad intelectual, la normativa interna y demás normas.

Joselyn Lizeth Chancusa Duque

Dr.-Ing. Fausto Ramiro Valencia Arcos

DEDICATORIA

Dedico este trabajo de investigación con todo mi corazón y cariño a las personas que han sido parte fundamental en mi vida y en el logro de mis metas:

A mi mamá, por su amor incondicional y su apoyo inquebrantable. Su esfuerzo y dedicación han sido la base de cada uno de mis logros. Su sacrificio y valentía son una inspiración constante para mí.

A mi papá, por sus sabios consejos y su aliento constante. Sus palabras y su guía me han ayudado a tomar decisiones acertadas y a enfrentar los desafíos con determinación. Su fe en mis capacidades ha sido crucial para mi éxito.

A mi tío Ángel y mi tía Narcisa, quienes han sido como segundos padres para mí. Su cariño y confianza en los momentos más difíciles han sido un faro de esperanza y fortaleza. Su generosidad y amor han marcado una diferencia significativa en mi vida.

A mi hermana, quien ha sido mi compañera incondicional a lo largo de toda mi vida. A pesar de las adversidades, siempre ha estado a mi lado, ofreciéndome su apoyo y compañía. Su lealtad y amor fraternal son un pilar en mi vida.

A mis primos, Andrés y Cristián, quienes han sido como hermanos mayores para mí. Su ayuda y protección han sido invaluable, siempre han estado ahí para ofrecerme su apoyo en cada etapa de mi vida.

A mis abuelos, María y Rubén, quienes, con su presencia discreta, me han brindado un apoyo incondicional. Su ejemplo de trabajo y determinación me ha inspirado a perseverar y superar los desafíos.

A todos mis amigos, cuyos vínculos y experiencias compartidas han enriquecido mi vida de maneras incalculables. Cada uno de ustedes ha contribuido a la persona que soy hoy, y valoro profundamente cada momento y recuerdo que hemos creado juntos.

AGRADECIMIENTO

Quiero empezar agradeciendo a Dios y a la Virgen María a quienes he confiado mi vida por completo, su ejemplo de amor y fe han sido una fuente de inspiración para alcanzar mis metas.

A mis padres, Segundo y Lucía, quienes me han impulsado a esforzarme cada vez más por mis estudios, a quienes les debo incontables noches de desvelo y preocupación, les agradezco profundamente. Sin su apoyo no podría haber llegado donde hoy estoy.

A mi primo, Andrés Zambrano, quien ha sido como mi tutor y consejero a lo largo de mi carrera. Me ha ayudado a superar algunas de mis dificultades durante mi formación académica y me ha alentado a ser perseverante.

A mi tutor, el Dr. Fausto Valencia, quien ha sido una guía durante el desarrollo de mi TIC. Agradezco profundamente su disposición para ayudarme, sus sabios consejos y correcciones, y por confiar en mis capacidades. Sus enseñanzas han sido esenciales para la culminación de este trabajo.

Finalmente, expreso mi gratitud a todos los profesores que han sido parte de mi formación académica. Han compartido generosamente su conocimiento y me han enseñado a desarrollar mis habilidades, forjando así mi carácter profesional.

ÍNDICE DE CONTENIDO

1	INTRODUCCIÓN.....	1
1.1	Objetivo general.....	2
1.2	Objetivos específicos.....	2
1.3	Alcance.....	2
1.4	MARCO TEÓRICO.....	3
1.4.1	EVOLUCIÓN DE LOS MÉTODOS DE MANTENIMIENTO EN INTERRUPTORES DE ALTO VOLTAJE.....	3
1.4.2	MANTENIMIENTO BASADO EN EL TIEMPO DE INTERRUPTORES DE ALTO VOLTAJE ...	4
1.4.3	MANTENIMIENTO BASADO EN LA CONDICIÓN DE INTERRUPTORES DE ALTO VOLTAJE (CBM)	13
1.4.4	MANTENIMIENTO CENTRADO EN LA CONFIABILIDAD DE INTERRUPTORES DE ALTO VOLTAJE (RCM).....	18
1.4.5	COMPARACIÓN DE LOS MÉTODOS DE MANTENIMIENTO DE INTERRUPTORES DE ALTO VOLTAJE.....	31
2	REVISIÓN SISTEMÁTICA DE LA LITERATURA.....	33
2.1	PROTOCOLO DE INVESTIGACIÓN.....	33
2.2	PREGUNTAS DE INVESTIGACIÓN.....	34
2.3	BASES DE DATOS PARA LA BÚSQUEDA DE LA LITERATURA.....	34
2.4	CRITERIOS DE EXCLUSIÓN.....	35
2.5	CRITERIOS DE CALIDAD.....	36
2.6	CAMPOS DE EXTRACCIÓN DE DATOS.....	36
2.7	DIAGRAMA DE FLUJO DE LA METODOLOGÍA DE LA SRL.....	37
3	EJECUCIÓN DE LA REVISIÓN SISTEMÁTICA DE LA LITERATURA.....	38
3.1	PROCESO DE BÚSQUEDA Y SELECCIÓN.....	38
4	RESULTADOS DE LA SRL DEL MANTENIMIENTO DE INTERRUPTORES DE ALTO VOLTAJE.....	40
4.1	DISTRIBUCIÓN DE LOS ARTÍCULOS DE LAS PUBLICACIONES EN EL TIEMPO.....	40
4.2	DISTRIBUCIÓN DE LAS PUBLICACIONES EN CONFERENCIAS Y REVISTAS DE LA IEEE Y ELSEVIER.....	42
4.3	DETALLE DE LAS PUBLICACIONES SELECCIONADAS.....	43
4.4	Conclusiones.....	51
4.5	Recomendaciones.....	52

5	REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS	52
---	----------------------------------	----

RESUMEN

El presente trabajo de integración curricular se centró en la revisión histórica de las políticas de mantenimiento aplicadas a los interruptores de alto voltaje, explorando su evolución e incorporación de nuevas tecnologías y métodos que revolucionaron y optimizaron esta área. Para ello, se empleó la metodología de Revisión Sistemática de la Literatura (SRL), conocida por su riguroso procedimiento de recopilación y documentación de información, desempeñando un papel crucial en esta investigación.

El protocolo de investigación se diseñó de acuerdo con los objetivos generales y específicos del estudio, estableciendo criterios que garantizaron la obtención de información de alta calidad y orientaron adecuadamente la investigación. Las principales fuentes de información fueron IEEE Xplore y ScienceDirect, cuyas extensas bases de datos en ingeniería contribuyeron significativamente al logro de los objetivos propuestos.

Se procedió a la recolección de artículos de revistas y actas de conferencias, evaluados según los criterios establecidos en el protocolo de investigación. Los resultados obtenidos a través de la SRL permitieron valorar la relevancia del mantenimiento de interruptores de alto voltaje, visualizar sus líneas de tendencia, evaluar el nivel de presencia del tema en revistas y conferencias, y analizar la frecuencia con la que los documentos recopilados habían sido referenciados en otros trabajos de investigación. Toda la información recopilada se consolidó en una tabla resumida de los artículos seleccionados, proporcionando una breve descripción de cada uno.

PALABRAS CLAVE: Revisión Sistemática de la Literatura, mantenimiento, interruptores, alto voltaje, TBM, CBM, RCM.

ABSTRACT

The present curricular integration work focused on the historical review of maintenance policies applied to high voltage circuit breakers, exploring their evolution and the incorporation of new technologies and methods that revolutionized and optimized this area. For this purpose, the Systematic Literature Review (SLR) methodology was employed, known for its rigorous procedure of information collection and documentation, playing a crucial role in this research.

The research protocol was designed according to the general and specific objectives of the study, establishing criteria that ensured the acquisition of high-quality information and appropriately guided the investigation. The main sources of information were IEEE Xplore and ScienceDirect, whose extensive engineering databases significantly contributed to achieving the proposed objectives.

Articles from journals and conference proceedings were collected and evaluated according to the criteria established in the research protocol. The results obtained through the SLR allowed the assessment of the relevance of high voltage switch maintenance, visualization of its trend lines, evaluation of the topic's presence level in journals and conferences, and analysis of the frequency with which the collected documents had been referenced in other research works. All the gathered information was consolidated into a summary table of the selected articles, providing a brief description of each one.

KEYWORDS: Systematic Literature Review, maintenance, circuit breakers, high voltage, TBM, CBM, RCM.

1 INTRODUCCIÓN

La energía eléctrica ha tomado un papel fundamental para el desarrollo de la sociedad, a medida que la demanda crece ha sido necesaria la incorporación de fuentes de energía para satisfacer el suministro de energía. Este suministro a gran escala recae en las redes de transmisión que manejan niveles altos de voltaje. Para que la transmisión de la energía se posible es necesario de la incorporación de un conjunto de equipos adecuados a las características de la red, así como sistemas de protecciones que aseguren un funcionamiento confiable de la red para los usuarios y el sistema ante la presencia de falla, como es el despeje de la falla o la desconexión de la red. Esta última acción es posible por la participación de interruptores de alto voltaje o disyuntores, uno de los grandes inventos que surgió a inicios del siglo XX [1], varios investigadores se han dedicado a desarrollar medios adecuados para logra aislar e interrumpir los sistemas eléctricos.

Para asegurar un adecuado funcionamiento de cualquier equipo, siempre es necesario darle un mantenimiento que logre prevenir el mal funcionamiento o pérdida del mismo. Este es el caso de los interruptores de alto voltaje, cuyo mantenimiento a lo largo del tiempo ha experimentado cambios significativos, pasando desde un enfoque inicial de mantenimiento correctivo hacia alternativas más avanzadas y eficientes como el mantenimiento basado en la condición y el mantenimiento centrado en la confiabilidad.

Inicialmente el mantenimiento de los interruptores se basaba en un enfoque correctivo, esto implicaba la sustitución de piezas o elementos dañados del interruptor cuando ocurría una avería[2]. Sin embargo, este método resultaba poco económico y no garantizaba la disponibilidad continua del equipo. Hace algunas décadas de años la pérdida de un interruptor no representaba un gran problema, con el surgimiento de la era de la industrialización y el aumento de la dependencia de la energía, la pérdida del suministro eléctrico comenzó a representar pérdidas económicas significativas. En respuesta a esto, las políticas de mantenimiento han ido evolucionando desde basarse en recomendaciones de fabricantes, hasta la determinación de las acciones más adecuadas de mantenimiento según el sistema que es lo que abarca el Mantenimiento Centrado en la Confiabilidad (RCM).

Este trabajo de integración curricular propone documentar información de gran valor acerca del Mantenimiento de Interruptores de Alto Voltaje, empleando una metodología de investigación denominada Revisión Sistemática de la Literatura que se caracteriza por tener un procedimiento definido a seguir basado en un protocolo de investigación, lo que ayuda a recopilar y evaluar la información seleccionada bajo algunos criterios. Esta

información es de gran importancia ya que facilita artículos con información importante a investigadores que estén interesados en el tema.

1.1 Objetivo general

- Describir los métodos de mantenimiento de interruptores de alto voltaje desde sus orígenes hasta la actualidad, empleando un enfoque sistémico de investigación. Para consolidar en un documento los principales enfoques de mantenimiento, incluyendo el Mantenimiento Basado en el Tiempo (TBM), el Mantenimiento Basado en la Condición (CBM) y el Mantenimiento Basado en la Confiabilidad (RCM), resaltando su evolución histórica y su impacto en la investigación en este campo.

1.2 Objetivos específicos

- Investigar la evolución histórica de los interruptores de alto voltaje, identificando hitos relevantes en su desarrollo y los métodos de mantenimiento asociados en cada etapa.
- Comparar los métodos de mantenimiento utilizados en interruptores de alto voltaje, desde los enfoques tradicionales hasta las técnicas más modernas como es el RCM, resaltando sus ventajas y limitaciones
- Identificar las tendencias actuales en el mantenimiento de interruptores de alto voltaje, incluyendo tecnologías emergentes, enfoques innovadores y prácticas recomendadas por los investigadores.
- Sintetizar la información recopilada en un documento integral que organice de manera sistemática los diferentes métodos de mantenimiento a lo largo del tiempo, proporcionando un documento referencial de los métodos de mantenimiento aplicados a interruptores de alto voltaje.

1.3 Alcance

El alcance de este proyecto de investigación comprendió un análisis exhaustivo de los principales métodos de mantenimiento empleados en interruptores de alto voltaje desde sus inicios hasta la actualidad, incluyendo el Mantenimiento Basado en el Tiempo (TBM), el Mantenimiento Basado en la Condición (CBM) y el Mantenimiento Basado en la Confiabilidad (RCM). Se delimitó la exploración histórica para identificar hitos relevantes en su desarrollo y los métodos de mantenimiento asociados en cada etapa, con una evaluación crítica de los enfoques tradicionales y modernos.

El proyecto se centró especialmente en el RCM debido a su relevancia actual en el ámbito de investigación y su aplicación futura. Se incluyeron las prácticas recomendadas por investigadores extraídas de la literatura revisada, así como la importancia de los temas tratados en el área de investigación. El proyecto concluyó con la síntesis de esta información en un documento detallado utilizando un enfoque sistemático de investigación.

Es importante destacar que el objetivo principal fue el análisis de los métodos de mantenimiento existentes de interruptores de alto voltaje, sin la intención de proponer nuevas estrategias o mejoras a las ya establecidas.

1.4 MARCO TEÓRICO

1.4.1 EVOLUCIÓN DE LOS MÉTODOS DE MANTENIMIENTO EN INTERRUPTORES DE ALTO VOLTAJE

En las últimas décadas las estrategias de mantenimiento de un equipo han cambiado su enfoque más de solo mantener el equipo en condiciones apropiadas de funcionamiento. Partiendo desde los años 1930 hasta antes de la Segunda Guerra Mundial[3], el tiempo de inactividad de un equipo no era significativo. Se tenía una industria mecanizada, equipos sencillos y sobredimensionados, por lo que el mantenimiento no iba más allá de rutinas de limpieza y reparaciones sencillas.

Con el inicio de la Segunda Guerra Mundial, la industria experimentó un cambio radical. La necesidad de numerosas máquinas y su disponibilidad incrementaron su nivel de importancia, por lo que la aparición de fallas y los problemas asociados a estas debían ser minimizados tanto como fuera posible. De esta necesidad surgió el mantenimiento preventivo conocido como Mantenimiento Basado en el Tiempo (TBM).

El incremento del costo del capital que se invertía al mantenimiento y control de los activos dio paso a la investigación de nuevos métodos y tecnologías de mantenimiento que preserven la vida útil de los equipos como son los mantenimientos basados en la condición y en la confiabilidad, conocidos como Mantenimiento Centrado en la Condición (CBM) y Mantenimiento Centrado en la Confiabilidad (RCM). En la Figura 1.1, se observa una pequeña gráfica de cómo han ido presentándose los tipos de mantenimiento analizados.

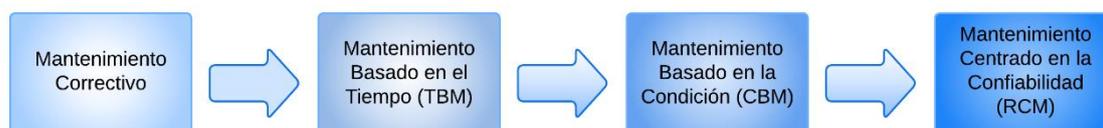


Figura 1.1: Evolución de los tipos de mantenimiento

Brindar disponibilidad, confiabilidad y seguridad a un sistema se ha convertido en características importantes en la industria. En la actualidad la probabilidad de que una pequeña avería detenga por completo un proceso o una planta es cada vez mayor [2], esto a su vez es directamente proporcional con las pérdidas económicas que involucra este suceso.

Estas metodologías de mantenimiento también son aplicadas en el sector ya que su avance está estrechamente relacionado con el desarrollo industrial, el suministro de energía es importante para el funcionamiento de los equipos eléctricos, por lo que las empresas encargadas de proveer este servicio deben tomar medidas adecuadas para asegurar un suministro de energía continuo.

Los equipos que forman parte de sistema eléctrico están atados a pasar por mantenimientos que aseguren el correcto funcionamiento y conserven su vida útil al máximo, lo que se conoce como gestión de activos[4].

El método de mantenimiento que la empresa eléctrica adopte no solo dependerá del capital, sino también de la cantidad información que disponga acerca del comportamiento de sus equipos y eventos que hayan surgido a lo largo de su servicio. Pero sobre todo la empresa debería realizar un análisis del punto óptimo entre el valor involucrado de la avería y el valor de realizar el mantenimiento[2], esto se puede representar en la gráfica de costos de la Figura 1.2.

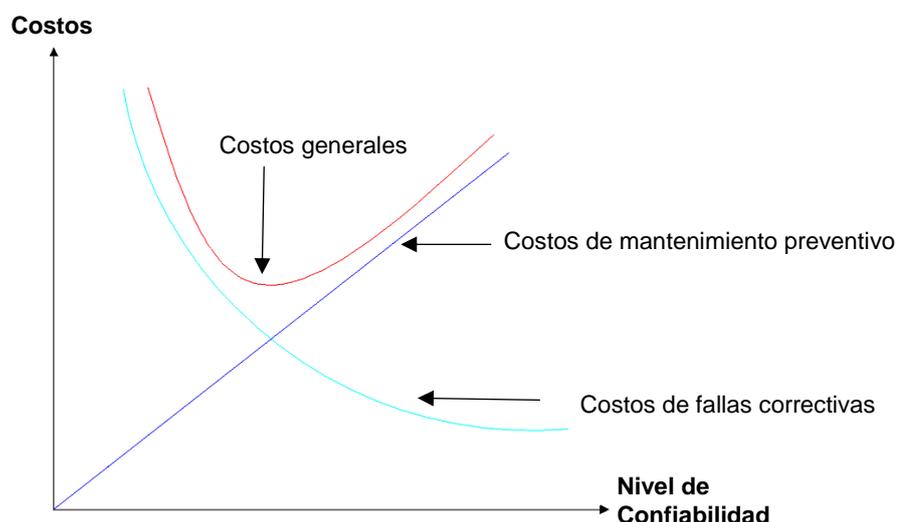


Figura 1.2: Costos de inversión para incremento de confiabilidad con el mantenimiento

1.4.2 MANTENIMIENTO BASADO EN EL TIEMPO DE INTERRUPTORES DE ALTO VOLTAJE

El Mantenimiento Basado en el Tiempo (TBM) es un tipo de mantenimiento preventivo, es realizado de forma periódica y se programa después de un intervalo de tiempo fijo, lo que

hace que el interruptor vuelva a una condición como nuevo[5]. Con frecuencia se utiliza el método de distribución de Weibull para la estimación de la tasa de falla y la tasa promedio de falla de los componentes individuales del interruptor. Luego de aplicar esta metodología se puede establecer un programa de mantenimiento para los subcomponentes del interruptor que requieran un tratamiento cada cierto tiempo[6].

Generalmente el mantenimiento de interruptores de alto voltaje se basa en las políticas que plantea el TBM, estas se construyen a partir de recomendaciones de los fabricantes que realizan estudios a sus equipos para lograr definir los intervalos adecuados para el reemplazo de sus piezas. Otra manera en la que las empresas emplean el TBM es en base a la experiencia operativa propia de sus equipos y recomendaciones de sus técnicos en mantenimiento[2].

Este tipo de mantenimiento está relacionado directamente con la edad del equipo o el tiempo de servicio que este ha soportado; debido a su característica programada de mantenimiento ayuda a que el personal encargado del mantenimiento pueda coordinar sus actividades. Se logran minimizar las interrupciones del servicio, aunque esto involucra un riesgo de realizar un tipo de mantenimiento intrusivo que podría ocasionar fallos o a su vez el equipo podría ser sometido a un mantenimiento que es innecesario por lo que el presupuesto estaría siendo usado de forma ineficiente.

Se ha comprobado que realizar el reemplazo de las piezas de forma programada disminuye la tasa de falla del equipo y el costo de mantenimiento es menor que si solo se empleara un mantenimiento correctivo[6]. Esta estrategia de mantenimiento es dominante debido a su fácil aplicación. Sin embargo, es poco efectiva para identificar algún defecto o falla específica en el equipo.

En la actualidad se están empleando algunas técnicas y conceptos que ayuden a gestionar mejor el TBM. Como en el artículo [6], a pesar de clasificarse como un mantenimiento basado en la condición, se emplea el concepto de la confiabilidad de las barras en una subestación en base a la tasa de falla de los interruptores de alto voltaje bajo un TBM. Otra investigación que resulta interesante es el artículo [5], donde se construye una política de mantenimiento basada en el tiempo para maximizar la disponibilidad de su sistema, estableciendo un mantenimiento preventivo de sus interruptores dado un historial de fallas único.

El programa del mantenimiento se establece de acuerdo a la categoría y tipo de interruptor. Sin embargo, consiste generalmente en [2]:

- Revisión, limpieza y lubricación

- Sustitución de componentes
- Verificación del funcionamiento del mecanismo, como la extensión del recorrido
- Comprobación de la resistencia de los contactos para evaluar su desgaste
- Inspección de los sistemas de interrupción y aislamiento, incluyendo pruebas de resistencia del aislamiento
- Pruebas de sincronización
- Pruebas de operación

Los interruptores de alto voltaje o disyuntores más empleados son: el disyuntor de aceite, disyuntor de explosión de aire y el disyuntor con gas SF₆. A continuación, detallan unos ejemplos de mantenimiento de acuerdo al tipo de disyuntor.

1.4.2.1 Disyuntor de aceite

A principios del siglo XX, los disyuntores de petróleo eran los más comunes, mientras que los disyuntores de agua presentaban problemas de aislamiento tras la ruptura. En ese entonces, los disyuntores de aceite cumplían con los requisitos de cortocircuito en subestaciones. Aunque todavía se usan en algunas partes del mundo, ya no se desarrollan nuevos modelos de disyuntores de aceite. Los primeros modelos eran simples interruptores de aire en tanques de aceite mineral, sin dispositivos para extinguir el arco. En 1901, JN Kelman creó un disyuntor aceite-agua que interrumpía 200-300 A a 40 kV[1], usando barriles de madera con una mezcla de agua y aceite como medio extintor como se muestra en la Figura 1.3.



Figura 1.3: Disyuntor aceite-agua de Kelman para 40 kV-300A [1]

En 1930 se introdujo la cámara de arco en los disyuntores, mejorando el enfriamiento del arco mediante un contenedor metálico con una cámara aislante llena de aceite.

Posteriormente, se añadieron mecanismos de bombeo que generaban un flujo cruzado de aceite para un mejor enfriamiento[1]. Los disyuntores de aceite a granel tenían contactos en un tanque metálico lleno de aceite mineral, proporcionando aislamiento y medición de corriente con transformadores alrededor de los casquillos, una referencia de esta descripción se representa en la Figura 1.4.

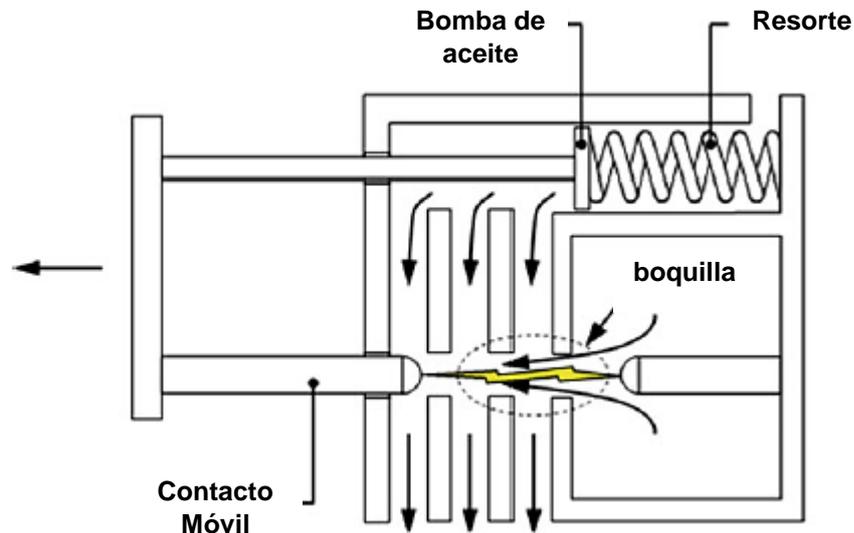


Figura 1.4: Disyuntor de aceite a presión (sección transversal) [1]

Luego, se desarrollaron los disyuntores de aceite mínimo, que ubicaban los contactos y la cámara de arco en un aislante de porcelana en lugar de un tanque de metal grande. Estos eran comunes en Europa, mientras que los disyuntores de aceite a granel prevalecían en Estados Unidos[1].

El arco se extinguía descomponiendo el aceite en hidrógeno y metano, con el hidrógeno ofreciendo excelentes propiedades dieléctricas y alta capacidad calorífica. Los disyuntores de aceite mínimo eran más efectivos con corrientes altas que aumentaban la presión y la convección, pero tenían dificultades con corrientes bajas debido a la menor cantidad de gas liberado. También eran sensibles al reencendido dieléctrico tras la interrupción de corrientes capacitivas, aunque el aceite era un buen aislante eléctrico cuando los contactos estaban abiertos. La Figura 1.5 muestra un ejemplo real de un disyuntor de tanque vivo de aceite mínimo del año 1985 de 245kV.



Figura 1.5: Disyuntor de tanque vico de aceite mínimo 245 kV de 1985[1]

Para el mantenimiento de un disyuntor de aceite, por lo general se extrae una muestra de aceite de cada tanque que es sometidos a análisis químicos y físicos, para constatar la presencia de contaminante y rigidez dieléctrica. Además, es común realizar una inspección interna de los tanques y los interruptores, incluyendo la verificación de los contactos y cámara de arco.

En la Tabla 1.1, se detalla un programa de mantenimiento recomendado por ScottishPower para un disyuntor de aceite de granel con nivel de voltaje de 275 kV.

Tabla 1.1: Programa de mantenimiento para disyuntor de aceite de grande 275 kV[2]

Nro.	Componente	Frecuencia recomendada	Observaciones
1	Pruebas operativas	Anual	
2	Pruebas de aceite		
2.1	Resistividad	2 años	o a 125 operaciones
2.2	Fuerza eléctrica	2 años	o a 125 operaciones
2.3	Comprobar humedad después del llenado	4 años	
3	Mecanismo	4 años	o a 125 operaciones
4	Pruebas de conductos	2 años	
5	Inspección del receptor de aire	2 o 6 años	
6	Manómetros, presostatos-inspección	2 años	
7	Inspección interna de tanques: interruptores	4 años	o a 250 operaciones
8	Pruebas de Bushing	4 años	Prueba de resistencia de aislamiento
9	Pruebas de aceite de bushing		

9.1	Aceite de tapa superior	4 años	
9.2	Aceite del bushing principal		Depende del estado del aceite de la tapa superior
10	Pruebas de tiempo		
10.1	Circuitos de pestillo de disparo	4 años	o a 250 operaciones
10.2	Verificar el tiempo de disparo del disyuntor y registre	4 años	o a 250 operaciones
11	Fusibles recargables	6 años	
12	Válvula de seguridad: pelar y probar (receptor de aire local)	2 años	
13	Válvula de retención		
13.1	Prueba	2 años	
13.2	Banda	6 años	
14	Verificación operativa de las válvulas de cierre de aire	2 años	

1.4.2.2 Disyuntor de explosión de aire

El aire se utiliza como aislante en subestaciones exteriores y líneas de transmisión de alta tensión, y también como medio de extinción en interrupciones de corriente. A presión atmosférica, su capacidad de interrupción se limita a tensiones bajas y medias, hasta 50 kV, utilizando interruptores de chorro de aire magnético que alargan y enfrían el arco para reducir la corriente de falla[1].

A presiones más altas, el aire ofrece un mayor poder de enfriamiento, permitiendo a los interruptores de aire comprimido manejar corrientes y voltajes más elevados. Los disyuntores de chorro de aire pueden ser axiales o cruzados. Los cruzados dirigen el arco a un compartimento segmentado, alargando el arco y aumentando su voltaje, conocido como interrupción de alta resistencia. Los axiales enfrían el arco en dirección axial, resultando en una interrupción de baja resistencia con menor aumento del voltaje del arco.

Antes de la introducción de los disyuntores de gas SF₆, los disyuntores de aire eran preferidos para extra alto voltaje (EHV). A pesar de sus ventajas técnicas, como la rápida reducción del componente de CC de una corriente de falla asimétrica, su alto costo y el mantenimiento prolongado limitan su uso a redes especializadas. La Figura 1.6 muestra un ejemplo de un disyuntor de corriente de aire de última generación producido por Alstom de 800 kV.

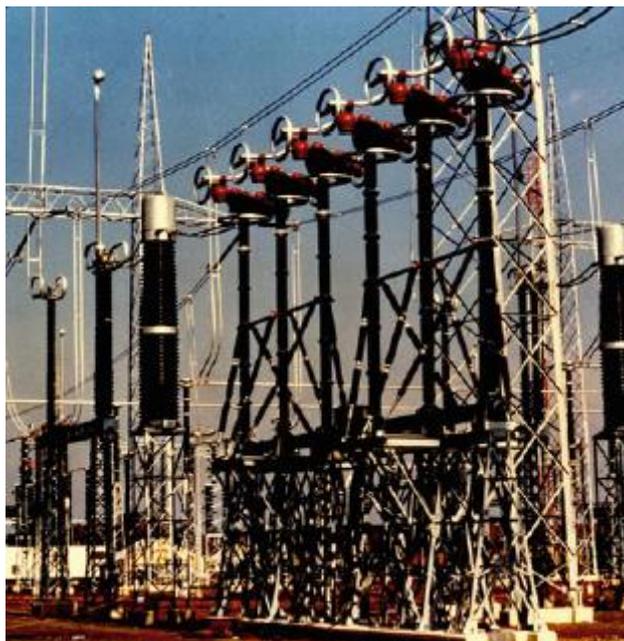


Figura 1.6: Disyuntor de aire de 800 kV[1]

El mantenimiento basado en el tiempo para los disyuntores de explosión de aire de la marca ABCB, suele ser más complejo a comparación de los disyuntores de aceite, se realiza la inspección visual para identificar signos de desgaste, corrosión o daño de alguno de los componentes interiores o exteriores, implica también el desmantelamiento de los interruptores para revisar las componentes clave como las válvulas de explosión.

Además de verificar la sequedad del aire y asegurar la correcta calibración de todos los componentes del equipo, se llevan a cabo otras actividades de mantenimiento críticas. La Tabla 1.2, se detalla un programa de mantenimiento de un disyuntor ABCB tipo cabezal no presurizado de 275 kV.

Tabla 1.2: Programa de mantenimiento para disyuntor de explosión de aire ABCB 275 kV[2]

Nro.	Componente	Frecuencia recomendada	Observaciones
1	Pruebas operativas	Anual	
2	Comprobaciones del mecanismo	2 años	
3	Pruebas de sincronización y pruebas de consumo de air	2 años	
4	Pruebas de conductos	2 años	
5	Manómetros, presostato: comparación	2 años	
6	Inspección del receptor de aire	2 años	
7	Interruptores	6 años	
8	Mantenimiento del mecanismo	6 años	
9	Verificación operativa de las válvulas de cierre de aire	2 años	

10	Válvulas de explosión	12 años	o a 2000 operaciones
11	Válvulas antirretornos		
11.1	Prueba	2 años	
11.2	Banda	6 años	
12	Fusibles recargables	6años	

1.4.2.3 Disyuntor con gas SF6

Las destacadas propiedades dieléctricas del SF6 se descubrieron en 1920. Este gas es cinco veces más pesado que el aire y, a presión atmosférica, su capacidad dieléctrica es tres veces mayor. A 2 atm de presión, sus características aislantes se asemejan a las del aceite mineral y al ser un gas electronegativo, captura electrones libres y forma iones negativos de baja movilidad, lo que facilita la rápida eliminación de electrones en el plasma de un arco[1].

Aunque el SF6 es estable e inerte, la formación de un arco produce compuestos tóxicos como SF2 y SF4. Sin embargo, estos productos se recombinan en compuestos no tóxicos tras la extinción del arco[1]. Este proceso es fundamental para mantener la eficacia de la interrupción de arco por un largo periodo.

El desarrollo de disyuntores con SF6 comenzó en la década de 1940 y el primer disyuntor comercial apareció en 1959[1]. Los primeros diseños necesitaban calefactores para evitar la licuación del gas, lo que llevó a la creación de disyuntores tipo puffer, que comprimen el gas en la cámara de soplado mediante un pistón.

Hoy en día, los disyuntores tipo puffer son los más comunes para la interrupción de altas potencias de cortocircuito, manejando hasta 550 kV- 63 kA. Estos dispositivos requieren mecanismos operativos fuertes y fiables, especialmente en caso de fallas trifásicas, lo que incrementa su costo. Para voltajes más bajos, existen disyuntores automáticos que usan la energía térmica del arco para calentar y presurizar el gas, enfriándolo al abrir los contactos, donde la interrupción de pequeñas corrientes puede ser asistida por un soplador. La Figura 1.7 muestra un disyuntor tipo puffer de ABB de 245 kV de doble y simple apertura.



Figura 1.7: Disyuntor tipo puffer de doble y simple apertura 245 kV marca ABB[1]

Algunos diseños emplean una bobina que crea un campo magnético, haciendo girar el arco alrededor de los contactos para enfriarlo. Este diseño, conocido como disyuntor de arco giratorio, junto con los disyuntores automáticos, permite el uso de mecanismos menos potentes y más económicos, además de ser más compactos que los disyuntores tipo puffer.

Para el mantenimiento de disyuntores de gas SF₆, se recomienda realizarlos de forma rutinaria de manera que incluya la medición de la presión, pruebas de pureza y control de la humedad para así verificar el punto de rocío del SF₆, su acidez y contenido de oxígeno. Además, gran parte de los fabricantes sugieren que los disyuntores sean inspeccionados durante la mitad de su vida útil o luego de un número predeterminado de operaciones de falla[2]. En la Tabla 1.3 se detalla un programa de mantenimiento para un disyuntor de gas SF₆ de presión única para un nivel de voltaje de 275 kV con mecanismo hidráulico.

Tabla 1.3: Programa de mantenimiento de disyuntor de gas SF₆[2]

Nro.	Componente	Frecuencia recomendada
1	Pruebas operativas	Anual
2	Verificación del gas SF ₆	2-3 años
3	Sistema hidráulico	
3.1	Verificaciones operativas del sistema hidráulico	2-3 años
3.2	Prueba de humedad del aceite hidráulico	6 años
3.3	Cambio de aceite del sistema hidráulico	12 años

4	Pruebas de sincronización	2-3 años
5	Pruebas de conducto	2-3 años
6	Motor de bomba	2-3 años
7	SF6 y sistema de aceite	2-3 años
8	Válvula de llenado y sobrepresión de SF6	6 años
9	Unidad interruptora	12-20 años
10	Capacitores	6 años

1.4.3 MANTENIMIENTO BASADO EN LA CONDICIÓN DE INTERRUPTORES DE ALTO VOLTAJE (CBM)

El CBM es una técnica de mantenimiento moderna y ampliamente utilizada, introducida en 1975 para optimizar la toma de decisiones en el mantenimiento preventivo[7]. Esta técnica se fundamenta en la información obtenida a través del monitoreo de la condición del equipo, lo que permite realizar recomendaciones precisas para las acciones de mantenimiento. Su objetivo principal es optimizar la salud del equipo, reducir los costos del ciclo de vida y evitar fallas catastróficas mediante intervenciones únicamente cuando son necesarias o justo antes de que ocurra una falla.

El componente esencial del CBM es el monitoreo de la condición (CM), para lo cual se utilizan sensores y otros indicadores para observar continuamente las señales del equipo. Este monitoreo puede llevarse a cabo tanto en línea, mientras el equipo está en funcionamiento, como fuera de línea, cuando el equipo no está operando. Además, el monitoreo puede ser periódico, empleando herramientas portátiles y evaluaciones basadas en los sentidos, o utilizando dispositivos automáticos de medición. Cada método tiene sus propias ventajas y desventajas; el monitoreo continuo puede resultar costoso y ser afectado por el ruido en los datos, mientras que el monitoreo periódico puede omitir información importante entre los intervalos.

El propósito del CM es doble: recopilar datos sobre la condición del equipo y aumentar el conocimiento sobre las causas y efectos de las fallas y los patrones de deterioro. La premisa es que la mayoría de las fallas del equipo están precedidas por ciertos signos o condiciones, por lo que un monitoreo adecuado puede prever y prevenir estas fallas[7]. Este enfoque de mantenimiento permite una evaluación en tiempo real del estado del equipo, facilitando así decisiones de mantenimiento más informadas y reduciendo la necesidad de mantenimiento innecesario.

A lo largo de los años, se han desarrollado diversas técnicas de CM para monitorear las condiciones del equipo, como la medición de vibraciones, temperatura, niveles de ruido y

calidad del aceite lubricante. Estas técnicas ayudan a identificar problemas potenciales antes de que se conviertan en fallas graves, mejorando la eficiencia operativa y prolongando la vida útil del equipo. En resumen, el CBM es una estrategia de mantenimiento proactiva que utiliza la tecnología de monitoreo para mantener los equipos en óptimas condiciones, minimizando los costos y riesgos asociados con fallas imprevistas.

Para aplicar esta metodología al mantenimiento de interruptores de alto voltaje, las empresas deben evaluar si cambiar a otro enfoque de mantenimiento es factible. Por ejemplo, ENW E-Trans NV optó por adoptar la estrategia de Mantenimiento Basado en la Condición (CBM), logrando una disminución del 25% en los costos de mantenimiento y reduciendo en un 80% la indisponibilidad planificada anualmente[2].

A continuación, se detalla un ejemplo del procedimiento que se realiza para emplear la estrategia del CBM en los disyuntores de la red eléctrica de Indonesia.

1.4.3.1 CBM aplicado en disyuntores de PLN P3B Jawa Bali- Indonesia[8]

PLN P3B Jawa Bali anteriormente empleaba estrategias de mantenimiento correctivo y basadas en el tiempo. Con el objetivo de incluir un nuevo enfoque emplea la estrategia de mantenimiento basada en la condición a sus disyuntores de 500 kV[8], equipos que son considerados como parte fundamental de su sistema para lograr realizar el suministro de su energía.

En la empresa, los disyuntores se clasifican actualmente por su nivel de voltaje, con planes futuros de clasificarlos por tipo. Utilizando el análisis de criticidad y efectos de modos de falla (FMECA), el disyuntor se divide en subsistemas según su función: primario, secundario, dieléctrico, mecanismos y soporte. Cada subsistema tiene funciones y posibles fallos específicos, lo que ayuda a identificar causas y modos de falla probables. Inicialmente, se estiman los riesgos asociados a cada modo de falla basándose en eventos anteriores. Se utilizan las siguientes ecuaciones para el análisis:

$$Riesgo = Frecuencia \cdot Consecuencia \quad (1.1)$$

$$Consecuencia = (Impacto sobre la seguridad + Impacto sobre el ambiente + Impacto sobre el sistema + Impacto sobre el costo correctivo) \quad (1.2)$$

La probabilidad se determinó utilizando estadísticas recopiladas por los ingenieros de la empresa, mientras que las consecuencias se establecieron en función del impacto del incumplimiento de criterios como la seguridad, el medio ambiente, el sistema y el costo correctivo. En la Figura 1.8, se presentan los efectos individuales al categorizar el riesgo de probabilidad frente a la ocurrencia:

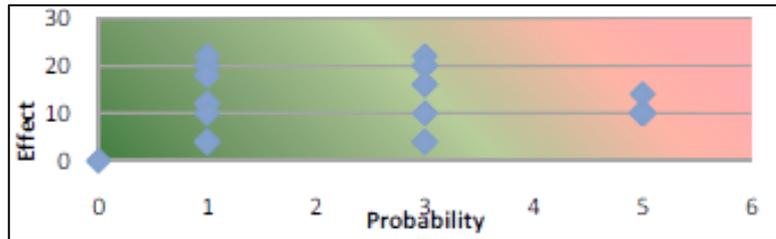


Figura 1.8: Métricas de riesgos[8]

Una vez obtenidos los resultados de las puntuaciones FMECA para cada modo de falla en los subsistemas, se puede elaborar una lista de verificación para la inspección visual y determinar los intervalos de tiempo para los componentes críticos identificados. Estos intervalos se dividen en diarios, semanales, mensuales y anuales, dependiendo del nivel de criticidad calculado.

Basándose en las métricas de riesgo identificadas, se puede planificar el mantenimiento fuera de línea para cada subsistema y luego clasificar la estrategia de mantenimiento de acuerdo con el nivel de criticidad calculado en el FMECA, como se muestra en la Tabla 1.4.

Tabla 1.4: Estrategias de mantenimiento

Subsistema	Modo de Falla	Puntuación	Nivel de riesgo	Estrategia
Primario	Alta resistencia de contacto	66	alto	CBM
	Avería del condensador	54	alto	CBM
	Avería de resistencia	20	bajo	TBM
Secundario	Funcionamiento fallido de la bobina	36	medio	TBM
Dieléctrico	Mala resistencia de aislamiento	22	medio	TBM
Mecanismo	Avería del mecanismo	70	alto	CBM
Parte de soporte	Puesta a tierra	10	bajo	TBM

Se elige la estrategia de mantenimiento apropiada para mitigar el riesgo y mejorar la seguridad, como se muestra en la Tabla 1.4. Esta metodología también permite identificar indicadores tempranos de la posible pérdida de funcionalidad de los subsistemas.

Se establece un sistema de inspección por fases que incluyen tanto inspecciones visuales como offline. Para el subsistema principal, se realizan inspecciones visuales de componentes específicos como la abrazadera, la cámara de interrupción, el aislador de resistencia de cierre y el aislador de capacitor graduador.

Tras las inspecciones, se evalúa el estado de los componentes para determinar si están en condiciones normales o presentan alguna anomalía (condición regular con anomalía o defectuosa). Se asignan puntuaciones de 9 para buen estado, 6 para estado regular y 1 para estado defectuoso.

Se desarrolla una tabla de evaluación para cada subsistema. Por ejemplo, para el subsistema principal, se elabora la siguiente tabla de verdad:

Tabla 1.5: Tabla de verdad del subsistema primario

Abrazadera	Temperatura de cámara, resistencia y condensador	Aislador de resistencia o condensador	Condición
1	1	1	1
1	1	6	1
1	1	9	1
1	9	1	1
1	9	6	6
1	9	9	6
9	1	1	1
9	1	6	1
9	1	9	1
9	9	1	1
9	9	6	6
9	9	9	9

Los resultados obtenidos tras el procesamiento de estos datos incluyen las siguientes recomendaciones de mantenimiento:

- Mantenimiento sencillo: A cargo del operador de la subestación.
- Mantenimiento complejo: Realizado por el equipo de mantenimiento.
- Seguimiento en línea.
- Medición avanzada.

Además, se establece el intervalo de tiempo para el mantenimiento, basado en la vida útil o en experiencias previas de mantenimiento. Para las inspecciones fuera de línea según el FMECA, se definieron los siguientes puntos críticos: la resistencia de contacto, el tiempo de apertura y cierre, la desviación de la velocidad por fase, la medición de bobinas y la resistencia de aislamiento.

Se ha implementado el uso de mediciones fuera de línea para evaluar el estado del disyuntor en el sistema de PLN P3M Jawa, dado que no cuenta con mediciones en línea. Estas mediciones abarcan la resistencia de contacto, el tiempo de apertura, el tiempo de

cierre y la desviación de velocidad por fase. Los resultados de estas mediciones se clasifican conforme a las directrices establecidas por el fabricante, utilizando ponderaciones específicas de la Tabla 1.6:

Tabla 1.6: Ponderaciones del fabricante

Medición	9	6	1
Resistencia de contacto	<=Estándar de fabricación	1-20% del estándar	>20% Estándar de fabricación

Luego del FMECA se define el nivel de importancia de cada componente según el subsistema para los casos en donde se definió la estrategia de CBM, de acuerdo con la Tabla 1.7:

Tabla 1.7: Factores de peso

Subsistema	Modo de fallo	Puntuación	Factor de peso (FP)
Primario	Alta resistencia de contacto (RC)	66	0.49
Mecanismo	Avería del mecanismo	70	0.51

Se definen el índice de condición para cada subsistema de acuerdo con las siguientes ecuaciones:

$$CI_{primario} = FP_{(RC)} \cdot K_{(RC)} = \mathbf{1}_{(RC)} \cdot K_{(RC)} \quad (1.3)$$

$$CI_{mecanismo} = FP_{(Av. mecanismo)} \cdot K_{(Av.mecanismo)} = \mathbf{1}_{(Av. mecanismo)} \cdot K_{(Av.mecanismo)} \quad (1.4)$$

Con estos dos índices se conforma el índice de condición del disyuntor:

$$CI_{disyuntor} = FP_{(primario)} \cdot Ci_{(primario)} + FP_{(mecanismo)} \cdot Ci_{(mecanismo)} \quad (1.5)$$

$$CI_{disyuntor} = \mathbf{0.49} \cdot Ci_{(primario)} + \mathbf{0.51} \cdot Ci_{(mecanismo)}$$

Donde:

FP= Factor de peso

K= Resultado de la medición en línea

Se construye mediante la Tabla 1.8 de probabilidades para encontrar la norma. Hay 9 probabilidades de salida debido a que el $CI_{disyuntor}$ tiene 2 factores de ponderación:

Tabla 1.8: Tabla de probabilidades

Nro.	$CI_{primario}$	$CI_{mecanismo}$	$FP_{(primario)}$	$FP_{(mecanismo)}$	Salida	Valor de salida
1	1	1	0.49	0.51	1	1
2	1	6	0.49	0.51	3.55	3.45
3		9	0.49	0.51	5.08	3.55
4	6	1	0.49	0.51	3.45	4.92

5	6	6	0.49	0.51	6	5.08
6	6	9	0.49	0.51	7.53	6
7	9	1	0.49	0.51	4.92	7.47
8	9	6	0.49	0.51	7.47	7.53
9	9	9	0.49	0.51	9	9

Finalmente, de la tabla se definen los límites de evaluación del estado:

- Malo si se obtiene: $1 \geq CI \geq 3.55$
- Regular si se obtiene: $3.55 > CI \geq 6$
- Bueno si obtiene: $6 > CI \geq 9$

Por ejemplo, si $CI_{primario} = 1$ y $CI_{mecanismo} = 6$ entonces el índice de condición del disyuntor se calcula empleando la ecuación (1.5):

$$CI_{disyuntor} = 0.49 \cdot CI_{(primario)} + 0.51 \cdot CI_{(mecanismo)}$$

$$CI_{disyuntor} = 0.49 \cdot 1 + 0.51 \cdot 6$$

$$CI_{disyuntor} = 3.55$$

De este resultado se estima que el disyuntor está en mala condición. De esta manera se podría seguir estimando la condición del resto de conductores. Este es un ejemplo sencillo de aplicar el CBM a disyuntores de alto voltaje, es importante resaltar que la empresa continúa haciendo evaluaciones para mejorar esta estrategia de mantenimiento.

1.4.4 MANTENIMIENTO CENTRADO EN LA CONFIABILIDAD DE INTERRUPTORES DE ALTO VOLTAJE (RCM)

En la década de los años sesenta, la introducción de aviones con sistemas más sofisticados evidenció que las prácticas tradicionales de mantenimiento, basadas en inspecciones y servicios estrictamente programados, no alcanzaban la confiabilidad deseada. En respuesta, los operadores aéreos y fabricantes, junto con la Asociación de Transporte Aéreo de Estados Unidos (ATA), formaron el Grupo Directivo de Mantenimiento (MSG) para desarrollar un nuevo proceso de mantenimiento para el Boeing 747 [2].

Este método, conocido como MSG-1, fue actualizado más tarde para incluir aviones de fuselaje ancho como el DC-10 y el L-1011[2], adoptando el nombre MSG-2. Dos décadas después, la lógica de decisión fue revisada para crear programas de mantenimiento para los Boeing 757 y 767, resultando en la estrategia MSG-3. Este enfoque, conocido fuera de la aviación comercial como Mantenimiento Centrado en la Confiabilidad (RCM), tiene como objetivo mantener los niveles de seguridad y confiabilidad al menor costo posible.

J. Moubray [3], define al RCM como “un proceso utilizado para determinar qué se debe hacer para garantizar que cualquier activo físico continúe haciendo lo que sus usuarios

quieran que haga en su contexto operativo”. Esta estrategia proporciona un marco que permite a los usuarios enfrentar estos desafíos de manera eficiente y sencilla, manteniendo siempre presente que el mantenimiento está intrínsecamente relacionado con los activos físicos. Sin estos activos, la función de mantenimiento no tendría razón de ser. Por ello, el RCM comienza con una revisión exhaustiva y desde cero de los requisitos de mantenimiento de cada activo en su contexto operativo.

A menudo, estos requisitos se asumen sin cuestionamiento, lo que lleva al desarrollo de estructuras organizativas, despliegue de recursos e implementación de sistemas basados en suposiciones incompletas o erróneas sobre las necesidades reales de los activos. Sin embargo, al definir correctamente estos requisitos bajo el pensamiento moderno, se pueden lograr mejoras significativas en la eficiencia y eficacia del mantenimiento.

El proceso del Mantenimiento Centrado en la Confiabilidad implica formular siete preguntas esenciales sobre el activo o sistema en revisión:

1. ¿Cuáles son las funciones y los estándares de desempeño del activo en su contexto operativo actual?
2. ¿De qué manera deja de cumplir con sus funciones?
3. ¿Qué causa cada falla funcional?
4. ¿Qué ocurre cuando se presenta cada falla?
5. ¿Cuál es la importancia de cada falla?
6. ¿Qué se puede hacer para predecir o prevenir cada falla?
7. ¿Qué se puede hacer si no se puede encontrar una tarea proactiva adecuada?

Generalmente, los equipos siguen el patrón de falla A, también conocido como la curva de la bañera, representada en la Figura 1.9, esta curva resulta de la combinación de dos o más patrones de falla diferentes: uno que refleja la mortalidad infantil y otro que muestra una probabilidad creciente de falla con la edad[3]. La gráfica indica que la tasa de fallas de cualquier equipo es alta al inicio, luego disminuye, se estabiliza durante un período prolongado y, finalmente, aumenta nuevamente debido al desgaste.



Figura 1.9: Curva de la bañera (Patrón A)

Desde la perspectiva de la gestión de fallos, cada uno debe ser identificado y abordado considerando sus consecuencias y características técnicas específicas. Para obtener el máximo beneficio a largo plazo de este tipo de mantenimiento, es crucial implementar formalmente las recomendaciones. Para asegurar esto se deberían cumplir los siguientes puntos:

- Todas las recomendaciones deben ser aprobadas formalmente para garantizar una gestión responsable de los activos.
- Es esencial describir todas las tareas rutinarias de manera clara y concisa.
- Identificar e implementar correctamente todas las acciones que requieran cambios específicos, ya sea en el diseño, la operación del activo o la capacitación de operadores y mantenimiento.
- Integrar las tareas rutinarias y los cambios en procedimientos operativos en paquetes de trabajo apropiados.
- Implementar efectivamente estos paquetes de trabajo y los cambios necesarios, esto incluye:
 - Incorporar los paquetes de trabajo en sistemas que aseguren su ejecución por las personas adecuadas en el momento oportuno y de manera adecuada.
 - Asegurar una resolución rápida de cualquier fallo identificado.

En la literatura del RCM se distinguen dos enfoques principales. En el primero, se busca equilibrar el costo del mantenimiento con las mejoras en la confiabilidad. Para abordar este enfoque, es crucial responder a dos preguntas fundamentales: ¿Cómo influye el mantenimiento en la confiabilidad de los componentes? y ¿Cómo se puede medir el impacto de las fallas de los componentes en los índices de confiabilidad del sistema? [9].

Estas interrogantes se abordan utilizando modelos matemáticos probabilísticos para cuantificar los efectos del mantenimiento en la confiabilidad.

Por otro lado, el segundo enfoque sostiene que el mantenimiento es rentable siempre y cuando se adapte adecuadamente a las necesidades del equipo, evitando así el desperdicio innecesario de recursos materiales y humanos. En este método, se priorizan los componentes según sus requerimientos de mantenimiento preventivo, considerando tanto su estado actual como su importancia para el sistema.

En síntesis, la estrategia RCM evalúa la condición técnica y la importancia de cada componente desde la perspectiva de la red[9]. El índice de condición técnica de un componente específico representa su estado físico de manera numérica y se evalúa conforme a criterios específicos. La importancia de cada componente se determina según las potenciales repercusiones de su fallo en la red.

A continuación, se detalla un ejemplo de aplicación de RCM en disyuntores que emplea los conceptos de índice de condición del equipo y el índice de importancia en la red.

1.4.4.1 RCM aplicado a disyuntores de 400 kV en la red eléctrica de Khorasan- Irán[9]

Este artículo establece el índice de condición (CI) para los disyuntores, tomando en cuenta su antigüedad, fabricante, tipo, mecanismo de operación, medio de extinción, historial de desempeño (fallos y éxitos), y las condiciones climáticas que afectan a las subestaciones, como el frío y la contaminación.

La Tabla 1.9 presenta los índices de condición (CI) junto con sus respectivas puntuaciones y factores de ponderación. El rendimiento histórico se destaca como el CI más significativo, dado que el número de operaciones del disyuntor, tanto exitosas como fallidas, es esencial para determinar el CI. Para evaluar este aspecto, se documentaron todas las operaciones de cada disyuntor durante el periodo de 2007 a 2012 en una base de datos [9].

Tabla 1.9: Desempeño histórico de los disyuntores

Tipos de operaciones		Éxitos			
		Cero	Bajo	Medio	Alto
Fracasos	cero	...	1	2	3
	bajo	3	4	5	6
	alto	7	8	9	10

Un ejemplo de cómo interpretar esta tabla es el siguiente: la puntuación del rendimiento

histórico de los disyuntores con un número promedio de éxitos y ningún fallo es 2. Esto indica que, en términos de desempeño, los disyuntores que han operado con una tasa media de éxito sin registrar ningún fallo se valoran con una puntuación de 2 en esta categoría específica.

Para determinar el índice de condición se ha definido la ecuación siguiente:

$$CI_j = \frac{\sum_{i=1}^7 G_{i,j}H_i}{GH_j} \quad (1.6)$$

Donde:

$G_{i,j}$ = Factores de puntuación del disyuntor j

H_i = Factores de ponderación de disyuntor j

GH_j = Suma de los factores del disyuntor j

De acuerdo con esta fórmula, GH_j se valora en 22 para los disyuntores sin registros de operaciones, y en 28 para los demás casos. Para determinar los índices de importancia, es esencial considerar la posición del disyuntor dentro de la estructura de la red y la disposición específica de la subestación donde está instalado. El proceso de obtención del índice consta de tres etapas detalladas a continuación:

1.4.4.1.1 Primera Etapa: Evaluación de modos de fallas de los disyuntores

Los diferentes tipos de fallas que pueden ocurrir en el disyuntor incluyen: interruptor atascado, falla activa y falla pasiva. Las tasas de falla activa y pasiva típicamente se expresan como porcentajes de la tasa total de fallas del disyuntor. Estos porcentajes se determinan de la siguiente manera:

$$\lambda_a = 0.9 \times \lambda_{cb} \quad (1.7)$$

$$\lambda_p = 0.9 \times \lambda_{cb} \quad (1.8)$$

Donde:

λ_a = Tasa de falla activa

λ_p = Tasa de falla pasiva

λ_{cb} = Tasa de falla total del disyuntor

Para comprender la ubicación del disyuntor en la red, es esencial determinar cómo cada tipo de falla del disyuntor afecta eventos de interrupción particulares. Para una visualización más clara, la Figura 1.10 presenta una subestación con el interruptor posicionado en el centro.

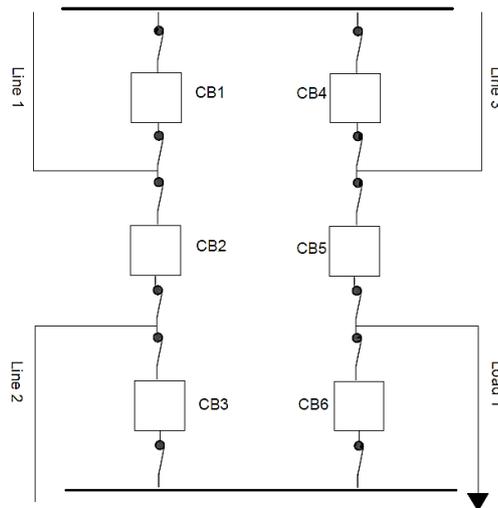


Figura 1.10: Subestación con interruptor en medio[9]

En esta subestación, se lleva a cabo un análisis de los diferentes modos de falla del disyuntor 2 según se detalla en la Tabla 10. Un fallo activo en este disyuntor activa los disyuntores 1 y 3, lo que resulta en la desconexión de las líneas 1 y 2. Para reparar el disyuntor 2 durante el tiempo de conmutación t_{sw} , se procede a aislarlo abriendo los dos seccionalizadores a sus extremos. Después, las líneas 1 y 2 pueden ser reconectadas cerrando los disyuntores 1 y 3. En contraste, un fallo pasivo en el disyuntor 2 no tiene impacto en la red. Cuando el disyuntor 2 queda atascado (sin funcionamiento) mientras falla una línea 1 o 2, ambas líneas se desconectan simultáneamente durante el tiempo de conmutación t_{sw} . Durante este período, el disyuntor 2 se saca de servicio y la línea que permanece operativa vuelve a estar en funcionamiento. La probabilidad de cada uno de estos eventos también se indica en la Tabla 1.10:

Tabla 1.10: Evaluación de modos de falla del disyuntor 2

Índices de disyuntores	Modos de falla	Probabilidades	Componentes fuera de servicio
2	activo	$\lambda_a \cdot t_{sw} / 8760$	Líneas 1 y 2
	pasivo	$\lambda_p \cdot t_{sw} / 8760$...
	atascado	$(\lambda_{L1} + \lambda_{L2}) \cdot P_{stuck} \cdot t_{sw} / 8760$	Líneas 1 y 2

Donde:

P_{stuck} = Probabilidad de atascamiento

λ_{L1} = Tasa de falla de la línea 1

λ_{L2} = Tasa de falla de la línea 2

t_{sw} = Tiempo de reparación del disyuntor 2

1.4.4.1.2 Segunda Etapa: Modelado de estados de contingencia

El índice de importancia de cada disyuntor se establece según el riesgo que representa para la red en caso de fallo, medido como la cantidad esperada de Energía No Suministrada (ENS). Debido a que las redes de transmisión suelen ser robustas ante contingencias de primer orden, y la mayoría de la ENS esperada (EENS) proviene de contingencias de orden superior, se centra la atención en eventos de interrupción de segundo y tercer orden. Para cada evento de corte, se emplea una optimización lineal del flujo de potencia. Esto permite ajustar la programación de unidades generadoras, eliminar sobrecargas en las líneas y evitar la desconexión de carga siempre que sea factible, o maximizar la capacidad total de carga atendida en cada punto de suministro. Este problema de optimización se define a continuación:

$$\text{máx} \sum_{i=1}^{NL} AP_i$$

Sujeto a:

$$T = A \times (PG - AP) \quad (1.9)$$

$$PG^{\min} \leq PG \leq PG^{\max}$$

$$AP_i \leq L_i$$

$$|T| \leq T^{\max}$$

Donde:

T = Vector de flujo de línea

T^{\max} =Vector de clasificación para líneas

PG = Salida de generación

PG^{\min} = límite inferior para la salida de generación

PG^{\max} = límite superior para la salida de generación

A = matriz que relaciona los flujos de línea con las inyecciones de potencia en las barras

AP_i = Potencia disponible en la barra de carga i

L_i = Carga máxima en la barra i

NL = Número de barras de carga

Luego de obtener los resultados de este problema, se define la ecuación (1.10) para la ENS debido a la interrupción k :

$$ENS_k = 8 \sum_{i=1}^{NL} L_i - AP_i \quad (1.10)$$

1.4.4.1.3 Tercera Etapa: Planteamiento del índice de importancia

La importancia de un disyuntor se evalúa según el impacto potencial de su fallo en la Energía No Suministrada Esperada (EENS) de la red. Por consiguiente, el índice de importancia de un disyuntor j se define como:

$$I_j = \sum_{i \in \Omega_j} ENS_i \times Prob_i \quad (1.11)$$

Donde:

Ω_j = Conjunto de eventos de interrupción, incluido unos de los modos de falla del disyuntor j

En el caso de que el disyuntor j se atasque o no funcione, y durante las primeras etapas de contingencia como las fallas activas y pasivas, $Prob_i$ se iguala a las probabilidades indicadas en la Tabla 10.

Por ejemplo, en una contingencia de segundo orden donde la falla activa del disyuntor j coincide con una falla en la línea k , el cálculo de $Prob_i$ se realiza de la siguiente manera:

$$P_i = \left(\frac{\lambda_a \cdot t_{sw}}{8760} \right) \cdot \left(\frac{\lambda_k \cdot t_k}{8760} \right) \cdot \left(\frac{\lambda_a \cdot t_{sw}}{(\lambda_a \cdot t_{sw}) + (\lambda_k \cdot t_k)} \right) \quad (1.12)$$

Donde:

λ_k = Tasa de falla de la línea k

t_k = Tiempo de reparación de la línea k

λ_a = Tasa de falla activa del disyuntor j

A continuación, en la Figura 1.11 se muestra un diagrama de flujo que describe el proceso requerido para determinar los índices de importancia de los disyuntores de la red.

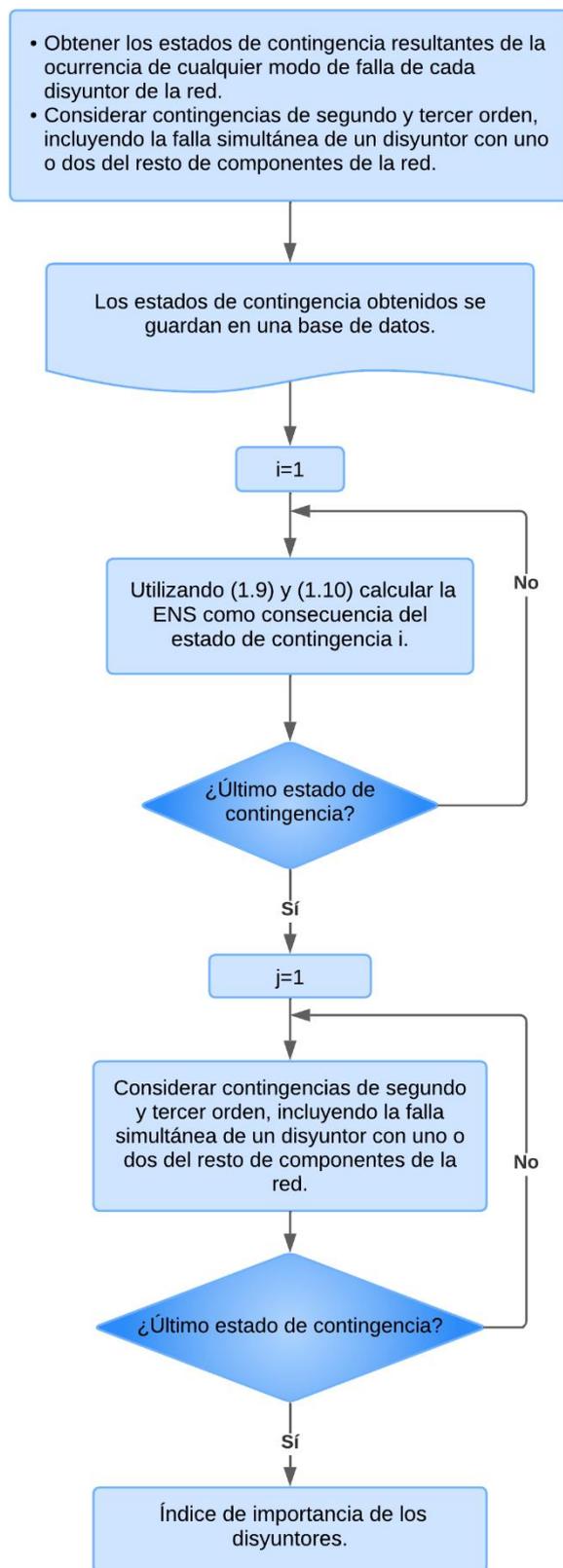


Figura 1.11: Proceso para calcular los índices de importancia de los disyuntores

Con los resultados obtenidos se procede a evaluar la prioridad del disyuntor en la planificación del mantenimiento, se utilizan índices de condición e importancia que se representan en un diagrama bidimensional, como se ilustra en la Figura 1.12. Este enfoque permite visualizar y clasificar los disyuntores según su estado actual y su impacto potencial en la red eléctrica, facilitando así la priorización adecuada de las actividades de mantenimiento.

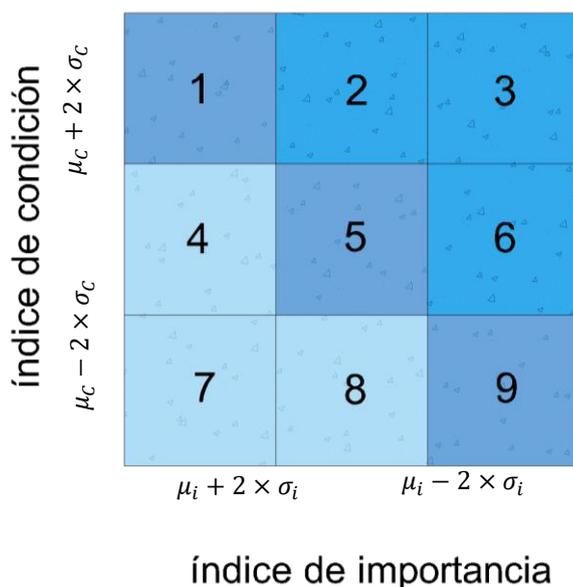


Figura 1.12: Matriz de decisiones para la planificación del mantenimiento

Esta matriz se puede segmentar en tres áreas diferentes. La primera zona, que engloba los segmentos 4, 7 y 8, incluye los disyuntores que demandan el menor mantenimiento preventivo. La segunda área, constituida por los segmentos 1, 5 y 9, contiene los disyuntores que requieren un mantenimiento preventivo de grado moderado. Por último, la tercera área comprende los segmentos 2, 3 y 6 e involucra a los disyuntores que necesitan el nivel más alto de mantenimiento preventivo.

1.4.4.2 Caso de estudio empleando RCM en la red de Khorasan[9]

Se refiere a una red de 400 kV, cuyo esquema unifilar se muestra en la Figura 1.13. Esta red incluye 28 barras, 22 líneas de transmisión, 25 generadores, 22 transformadores y 103 disyuntores. La carga máxima del sistema es de 2867 MW, con una capacidad total máxima de 3588 MW.

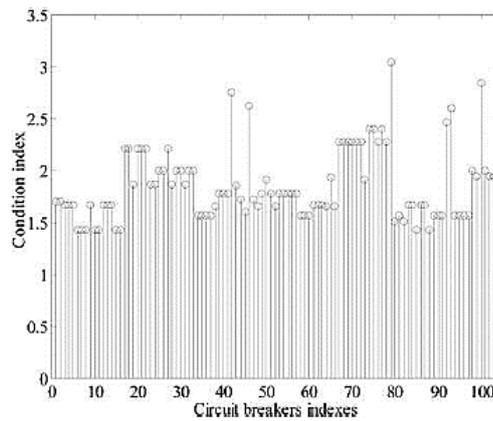


Figura 1.14: Resultados de los índices de condición[9]

En la Tabla 1.12, se muestra con mayor detalle la información del disyuntor 79 para la evaluación de su CI:

Tabla 1.12: Información del disyuntor 79

Índice de condición CI	Descripción
Edad de servicio	16
El fabricante se define como	pobre
medio de extinción	SF6
Mecanismo de accionamiento	hidráulico
Contaminación	alta
Desempeño histórico	fracaso alto y éxito cero
Frialdad	medio

Se observa que el CI se ve influenciado por factores como niveles elevados de contaminación, uso de accionamiento hidráulico, un alto número de fallas anuales y falta de competencia del fabricante.

Los siguientes requisitos para continuar con los cálculos son los datos acerca de la confiabilidad de los transformadores en la red, generadores y líneas de transmisión definidos en la Tabla 1.13.

Tabla 1.13: Valores para los cálculos de confiabilidad de los componentes

Componentes	Tasas de falla	Tasas de reparación
Transformador	0.0875 f/año	41.15
Línea de transmisión	0.0004923f/año	21.65
Generador	0.026f/año	46

Se han registrado tasas de falla de 0.124 eventos por año y tiempos de reparación de 96.4 horas para los disyuntores. Además, se asume una probabilidad de atascamiento del 0.01. Debido a que se aplican los mismos parámetros de confiabilidad a todos los disyuntores, el índice de importancia solo se ve afectado por la posición de cada disyuntor dentro de la red. La Figura 1.15 muestra los valores de los índices de importancia obtenidos siguiendo el procedimiento teórico detallado en la Figura 1.11.

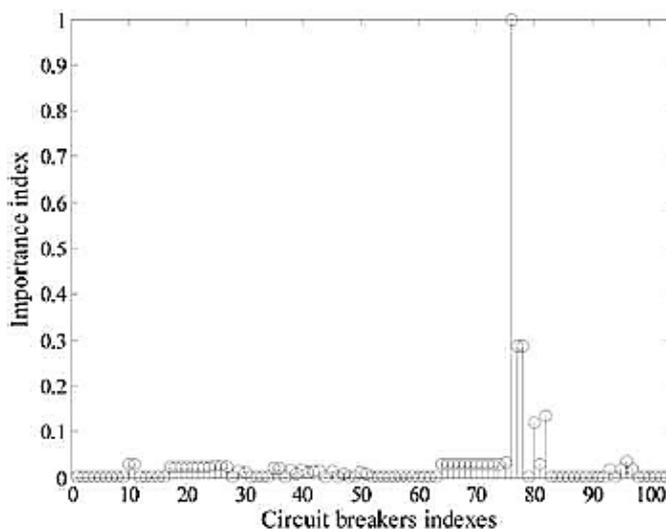


Figura 1.15: Índices de importancia de los disyuntores[9]

Al analizar la figura 3.15, se observa que el disyuntor 76 tiene una importancia significativa en la red, ya que su desconexión llevaría a una pérdida de 115 MW durante el tiempo de reparación, según la configuración del sistema. Además, se observan valores promedio de 1.8490 para el índice de condición y de 0.0274 para el índice de importancia, con desviaciones estándar de 0.0386 y 0.0112, respectivamente. La Figura 1.16 se divide en tres zonas como se mencionó anteriormente, que indican que los disyuntores en las áreas A, B y C tienen necesidades de mantenimiento preventivo bajas, medias y altas, respectivamente.

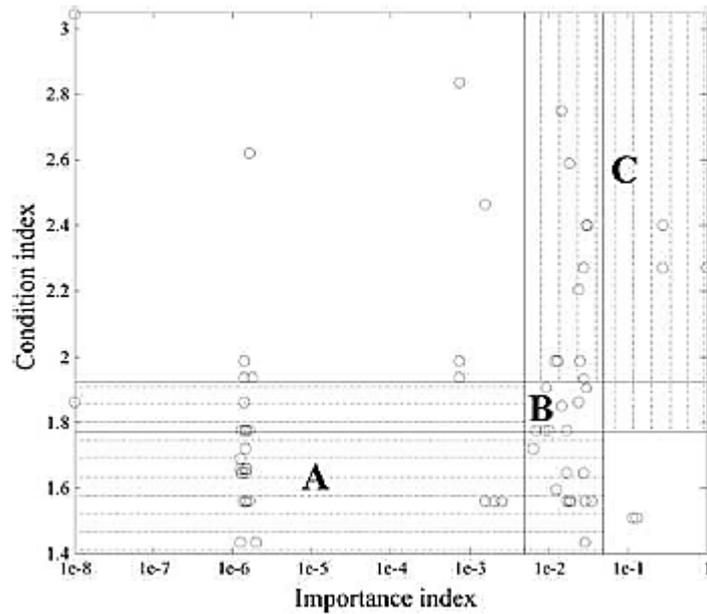


Figura 1.16: Matriz de decisión para la planificación del mantenimiento[9]

Con la aplicación del RCM se determinó que en la zona A se encontraron 56 disyuntores con menor necesidad de mantenimiento preventivo, en la zona B se ubicaron 23 disyuntores con necesidad moderada de mantenimiento preventivo y en la zona C se ubicaron 24 disyuntores con mayor necesidad de mantenimiento preventivo.

1.4.5 COMPARACIÓN DE LOS MÉTODOS DE MANTENIMIENTO DE INTERRUPTORES DE ALTO VOLTAJE

En la Tabla 1.14, se muestra un breve resumen comparativo de las tres estrategias más importantes que se han analizado con anterioridad en este trabajo de investigación.

Tabla 1.14: Resumen comparativo se los tipos de mantenimiento de los interruptores de alto voltaje

Criterios	TBM	CBM	RCM
Información de entrada	<ul style="list-style-type: none"> ▸ Recomendaciones de los fabricantes. ▸ Datos de falla recopilados por la empresa. ▸ Conocimientos adquiridos por el personal a cargo de mantenimiento. 	<ul style="list-style-type: none"> ▸ Parámetros del disyuntor (edad de servicio, fabricante, fallas, etc). ▸ Registros de datos de su comportamiento. ▸ Puede utilizar mediciones en línea de los disyuntores. 	<ul style="list-style-type: none"> ▸ Requiere los mismos datos que se emplean en la estrategia del RCM. ▸ Utiliza datos de la configuración de los equipos en la red y su disposición.
Análisis de Datos	<ul style="list-style-type: none"> ▸ Estable sus períodos de mantenimiento en base a los tiempos establecidos por los fabricantes para cada componente del disyuntor. ▸ Distribuye el personal de a acorde con la disposición de los periodos establecidos para los mantenimientos de los equipos. 	<ul style="list-style-type: none"> ▸ Requiere muestras grandes de los datos relacionados con el disyuntor para modelar el comportamiento. ▸ Estimación de los modos de fallas más probables y con alto riesgo. ▸ Estimación de índices de condición del disyuntor. 	<ul style="list-style-type: none"> ▸ Estimación de los índices de condición de los disyuntores. ▸ Calcula tasas de falla y probabilidades. ▸ Establece criterios que definan el concepto de confiabilidad según la empresa, como una mínima ENS ante alguna falla.
Decisión	<ul style="list-style-type: none"> ▸ Ejecuta los procedimientos establecidos de acuerdo con los períodos asignados para cada componente del disyuntor. 	<ul style="list-style-type: none"> ▸ Prioriza el mantenimiento de acuerdo con el modo de falla más probable en el disyuntor y su condición. Determina si hay la necesidad de una nueva estrategia de mantenimiento (TBM o CBM). 	<ul style="list-style-type: none"> ▸ Determina los disyuntores más críticos que puedan influenciar en la confiabilidad de la red. ▸ Establece la estrategia óptima de mantenimiento para cada disyuntor para tener una mínima ENS (pérdidas)
Ventajas	<ul style="list-style-type: none"> ▸ Fácil de implementar y ejecutar las tareas de mantenimiento. ▸ Facilita la gestión del personal para el mantenimiento. 	<ul style="list-style-type: none"> ▸ Predice fallas de los componentes del disyuntor. ▸ Reduce los costos de mantenimiento. ▸ Prolonga la vida útil de los disyuntores. 	<ul style="list-style-type: none"> ▸ Mejora la confiabilidad de la red. ▸ Reduce los costos de mantenimiento. ▸ Optimiza recursos materiales y humanos. ▸ Prolonga la vida útil de los disyuntores.
Desventajas	<ul style="list-style-type: none"> ▸ Mantenimiento puede ser intrusivo u ocasionar la falla. ▸ Presupuesto usado de forma ineficiente. ▸ Riesgo de fallos que no son detectados. 	<ul style="list-style-type: none"> ▸ Falta de registros de datos operativos del disyuntor. ▸ Puede resultar difícil de justificar un cambio a CBM. 	<ul style="list-style-type: none"> ▸ Complejidad de implementación. ▸ Costos iniciales elevados ▸ Requiere grandes paquetes de datos.

2 REVISIÓN SISTEMÁTICA DE LA LITERATURA

La Revisión Sistemática de la Literatura (SLR) se originó en el campo de la medicina, específicamente para abordar la inconsistencia en el asesoramiento basado en la opinión de expertos. El concepto se formalizó en la década de 1970 con el desarrollo del meta-análisis como proceso de síntesis de investigación [10]. La adopción de metodologías sistemáticas en la revisión de literatura fue impulsada por la necesidad de proporcionar un asesoramiento más fiable basado en la acumulación de resultados de experimentos científicos, en lugar de depender de opiniones individuales [11].

Una SLR es un método estructurado para recopilar, evaluar críticamente, integrar y presentar hallazgos de múltiples estudios de investigación sobre una pregunta o tema de interés específico. A diferencia de las revisiones tradicionales, una SLR sigue un protocolo definido y metodologías rigurosas que aseguran la minimización del sesgo, la replicabilidad y la credibilidad de los resultados obtenidos[10]. Esta metodología se emplea para proporcionar una evaluación exhaustiva y precisa del estado actual del conocimiento sobre un tema particular [11].

Para abordar la investigación sobre los Métodos de Mantenimiento Aplicados en Interruptores de Alto Voltaje, se ha decidido emplear la metodología de la Revisión Sistemática de la Literatura. Esta elección se fundamenta en la importancia crítica que la SRL tiene en el ámbito académico y su capacidad demostrada para aportar una base sólida y confiable para el desarrollo de políticas y prácticas en el campo de la ingeniería eléctrica. La SRL al ser una metodología rigurosa, permitirá sintetizar y analizar la evidencia existente de manera estructurada y objetiva, garantizando así la confiabilidad de los hallazgos enfocados en el área del mantenimiento.

2.1 PROTOCOLO DE INVESTIGACIÓN

El primer paso para aplicar la metodología de la SLR es la formulación del protocolo de investigación. Este protocolo tiene como objetivo principal proporcionar una guía detallada y estructurada que garantice la coherencia y calidad del proceso de revisión. Se elabora en función del tema de la investigación y los objetivos que se desean alcanzar. El protocolo incluye la definición de las preguntas de investigación, la identificación de las bases de datos a utilizar para la búsqueda, los criterios de exclusión e inclusión, los criterios de evaluación de calidad, y los campos de extracción de datos.

El establecimiento del protocolo de investigación facilita la revisión y validación de la información recopilada, asegurando que el proceso se realice de manera rigurosa,

transparente y reproducible. En las siguientes secciones se describen en detalle cada uno de los componentes del protocolo desarrollado para el tema planteado en este documento, garantizando así una revisión sistemática robusta y bien fundamentada.

2.2 PREGUNTAS DE INVESTIGACIÓN

Las preguntas de investigación constituyen el núcleo central de cualquier revisión sistemática, estas deben ser formuladas de manera clara, específica y alineadas con los objetivos del estudio. Funcionan como guía para todo el proceso de revisión, determinando el alcance y enfoque de la investigación.

A continuación, se presentan las preguntas que orientarán la búsqueda y selección de estudios relevantes, con el propósito de delimitar el tema y evitar la inclusión de estudios que no proporcionen información pertinente. Estas preguntas de investigación son esenciales en la construcción del protocolo, ya que están diseñadas para abordar cada uno de los objetivos planteados en esta investigación.

En base a los enfoques de este trabajo se construyen las siguientes preguntas de investigación:

Q1: ¿Qué métodos de mantenimiento se han utilizado en interruptores de alto voltaje?

Q2: ¿Cuál ha sido la tendencia de los mantenimientos de interruptores al alto voltaje a lo largo del tiempo?

Q3: ¿Qué enfoques innovadores y tecnologías emergentes se están utilizando actualmente en el mantenimiento de interruptores de alto voltaje?

Q4: ¿Qué política de mantenimiento de interruptores de alto voltaje son más empleadas en la actualidad?

2.3 BASES DE DATOS PARA LA BÚSQUEDA DE LA LITERATURA

Las bases de datos seleccionadas para la búsqueda de la literatura son esenciales para garantizar la exhaustividad y la relevancia de los estudios incluidos en la revisión. Estas bases de datos deben ser reconocidas en el campo de estudio y proporcionar acceso a publicaciones de alta calidad.

El presente estudio se fundamenta en el acceso y análisis de dos fuentes primordiales de información académica: IEEE Xplore y ScienceDirect. Debido a su reconocida relevancia y

exhaustividad en la oferta de investigaciones y conocimientos de última generación, se han seleccionado como los principales recursos de referencia para esta indagación.

IEEE Xplore es una plataforma en línea proporcionada por el Instituto de Ingenieros Eléctricos y Electrónicos (IEEE). Ofrece acceso a una amplia gama de contenido relacionado con la ingeniería, tecnología y las ciencias de la información, incluyendo artículos de revistas, conferencias, estándares técnicos, libros y cursos de educación continua. Es una herramienta esencial para investigadores, profesionales y estudiantes que buscan acceder a los últimos avances e investigaciones en áreas como la electrónica, la informática, la ingeniería eléctrica, las telecomunicaciones y la robótica, entre otras.

Por otro lado, ScienceDirect, una plataforma en línea de Elsevier, una de las principales editoriales académicas a nivel mundial. Proporciona acceso a una amplia colección de revistas científicas y técnicas revisadas por pares en campos que abarcan desde ciencias de la vida y físicas hasta ciencias sociales y humanidades, así como ingeniería y tecnología. Además de los artículos de revistas, ScienceDirect también ofrece libros electrónicos y herramientas de búsqueda avanzada para facilitar la navegación y el descubrimiento de contenido relevante.

2.4 CRITERIOS DE EXCLUSIÓN

Los criterios de exclusión delimitan las características de los estudios que no serán considerados en la revisión. Estos criterios pueden incluir, entre otros aspectos, la falta de relevancia temática, la baja calidad metodológica o la duplicación de resultados en diferentes publicaciones.

Se han establecido criterios específicos de exclusión que no abordan directamente las preguntas de investigación, con el fin de minimizar el ruido en los resultados y mejorar la precisión de la información.

Basándose en las preguntas de investigación formuladas, se definen ciertos criterios de exclusión que deben implementarse para asegurar que la investigación se lleve a cabo de manera adecuada.

- E1: Trabajos no relacionados con el mantenimiento de interruptores de alto voltaje, incluso si tratan sobre el mantenimiento en otros equipos eléctricos.
- E2: Nuevos métodos de medición de parámetros relacionados con el interruptor de alto voltaje.
- E3: Evaluaciones del desempeño de interruptores de alto voltaje.

E4: Pruebas de campo en interruptores de alto voltaje.

E5: Diseños y simulaciones de interruptores de alto voltaje

2.5 CRITERIOS DE CALIDAD

Los criterios de calidad se emplean para evaluar la solidez metodológica de los estudios incluidos en la revisión. Estos criterios pueden abarcar aspectos como la claridad en la definición de objetivos, la adecuación del diseño del estudio, la rigurosidad en el análisis de datos y la transparencia en la presentación de resultados.

Al igual que los criterios de exclusión, se establecen ciertos criterios de calidad con el propósito de validar la información recopilada de las fuentes de investigación. Estos criterios asegurarán que solo los estudios más robustos y bien diseñados sean parte de la Revisión Sistemática de la Literatura (SRL), proporcionando así una base sólida para investigaciones futuras.

QC1: Artículos que proporcionen la evolución de los métodos de mantenimiento de interruptores de alto voltaje.

QC2: Manuales que detallen los métodos de mantenimiento de interruptores de alto voltaje.

QC3: Artículos enfocados en el mantenimiento basado en el tiempo de interruptores de alto voltaje (TBM).

QC4: Artículos enfocados en el mantenimiento basado en la condición de interruptores de alto voltaje (CBM).

QC5: Artículos enfocados en el mantenimiento centrado en la confiabilidad de interruptores de alto voltaje (RCM).

QC6: Artículos con nuevas tecnologías de mantenimiento a interruptores de alto voltaje.

QC7: Artículos que comparen resultados de los diferentes métodos de mantenimiento

QC8: Estudios que presenten resultados cuantitativos.

2.6 CAMPOS DE EXTRACCIÓN DE DATOS

Los campos de extracción de datos especifican la información que se recopilará de cada estudio incluido en la revisión. Estos pueden abarcar detalles sobre el diseño del estudio, la población estudiada y los métodos de intervención utilizados.

Dado que algunos informes no siempre incluyen datos relevantes, pueden estar redactados de manera ambigua o incompleta. Por ello, se han definido campos de extracción de datos esenciales para asegurar una recopilación uniforme y completa de la información. Esto facilitará la comparación y síntesis de los resultados de diferentes estudios. Es fundamental definir claramente los campos de extracción de datos para delimitar adecuadamente el ámbito de investigación al que se está enfocando.

D1: Métodos de mantenimiento aplicados a interruptores de alto voltaje.

D2: Muestras de datos históricos que se han tomado de registros reales.

D3: Bases de datos reales o sintéticas empleadas en la experimentación de los mantenimientos.

D4: Estudios probabilísticos acerca de los modos de falla de los interruptores de alto voltaje.

2.7 DIAGRAMA DE FLUJO DE LA METODOLOGÍA DE LA SRL

Luego del planteamiento del protocolo de investigación acorde al tema de este trabajo, se realiza el diagrama de flujo mostrado en la Figura 2.1, la cual detalla el procedimiento que se debe ejecutar de acuerdo con la Revisión Sistemática de la Literatura en el Mantenimiento de Interruptores de Alto Voltaje.

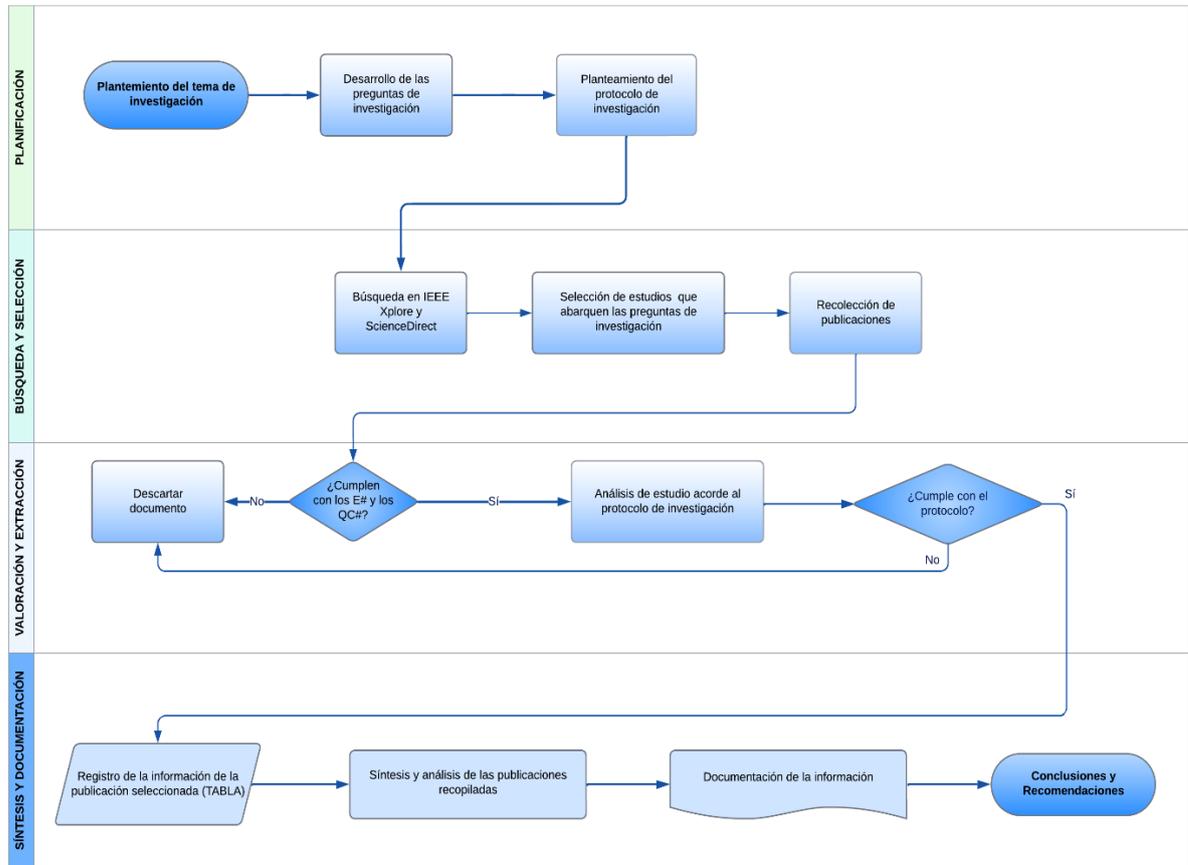


Figura 2.1: Diagrama de flujo de la ejecución del SRL

3 EJECUCIÓN DE LA REVISIÓN SISTEMÁTICA DE LA LITERATURA

En la sección anterior se planteó la metodología de la Revisión Sistemática de la Literatura, logrando establecer un protocolo adecuado para la investigación de los métodos de mantenimiento de los interruptores de alto voltaje. Con la base planteada se procede a la ejecución de la SRL.

3.1 PROCESO DE BÚSQUEDA Y SELECCIÓN

El proceso de búsqueda se llevó a cabo de manera computarizada, dado que las dos bases de datos seleccionadas contienen una gran cantidad de información escrita en inglés. Las palabras clave inicialmente utilizadas para cada base de datos fueron: ("Maintenance of high voltage circuit breakers" OR "Maintenance of power circuit breakers") AND ("Evolution of high voltage circuit breaker maintenance policies"). En la primera fase de búsqueda en IEEE Xplore se identificaron 138 resultados, mientras que en ScienceDirect se encontraron 86 resultados, los cuales incluían manuales, libros y artículos de conferencias. A pesar de aplicar criterios de exclusión, la búsqueda de los artículos resultó insuficiente debido a las

diversas metodologías involucradas en el mantenimiento de los interruptores de alto voltaje.

Con el fin de mejorar la precisión de la información, se aplicaron criterios de calidad (QC1, QC2, QC6, QC7 y QC8), considerando previamente los principales métodos de mantenimiento (TBM, CBM, RCM). El proceso de búsqueda se enfocó en cada uno de estos métodos, utilizando palabras clave específicas en ambas bases de datos: ("Time-Based Maintenance of high voltage circuit breakers" OR "TBM of high voltage circuit breakers"), ("Condition-Based Maintenance of high voltage circuit breakers" OR "CBM of high voltage circuit breakers") AND ("Reliability-Based Maintenance of high voltage circuit breakers" OR "RCM of high voltage circuit breakers").

En la siguiente fase de búsqueda, se procedió principalmente a la revisión de los abstracts de cada publicación arrojada por las bases de datos, y algunos de estos artículos fueron leídos en su totalidad. Al realizar una búsqueda manual centrada en el TBM, se recopilaron únicamente 2 artículos de conferencia de IEEE Xplore; respecto al CBM, se encontraron 26 artículos en IEEE Xplore y 11 en ScienceDirect; mientras que, para el RCM, se identificaron 18 artículos en IEEE Xplore y 5 en ScienceDirect.

En resumen, de IEEE Xplore se encontraron 138 artículos, de los cuales se seleccionaron 46, mientras que en ScienceDirect se identificaron 86 artículos, de los cuales se seleccionaron 16. La gran diferencia que existe entre los artículos encontrados y los artículos seleccionados radica en que la mayoría de los artículos que se encontraron estaban enlazados las palabras clave, además, abarcaban temas como plantas eólicas y fotovoltaicas, coordinación de protecciones, pruebas de disyuntores y algunos criterios pertenecientes a los criterios de exclusión, por esta razón la mayoría de los artículos fueron analizados con mayor detalle para que sea un archivo seleccionado o descartado. En la Figura 3.1 se presentan estos resultados de manera gráfica, evidenciando una considerable cantidad de artículos relacionados con el mantenimiento de interruptores de alto voltaje.

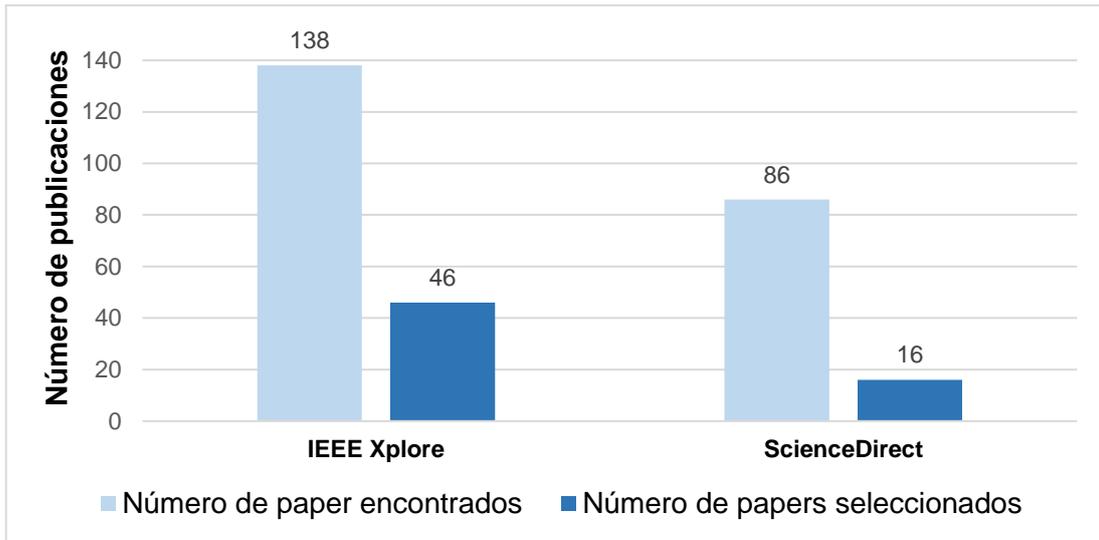


Figura 3.1: Número de artículos recopilados de las bases de datos empleando el Protocolo de Investigación

Es posible que existan más publicaciones que otro investigador incluya en su revisión, ya que la extracción de información y la selección de cada documento requieren la interpretación del autor y su tutor. Sin embargo, el protocolo de investigación garantiza que la información recolectada se enfoque en el tema planteado de esta investigación.

4 RESULTADOS DE LA SRL DEL MANTENIMIENTO DE INTERRUPTORES DE ALTO VOLTAJE

4.1 DISTRIBUCIÓN DE LOS ARTÍCULOS DE LAS PUBLICACIONES EN EL TIEMPO

En la Figura 4.1 muestra que la distribución de los artículos seleccionados se encuentra contemplada entre los años 2002 al 2024, un rango temporal de 22 años. Se puede observar una línea de tendencia creciente en la aparición de artículos relacionados con políticas de mantenimiento de interruptores de alto voltaje, del año 2002 al 2012 se tuvo un número promedio 2.07 de publicaciones por año, mientras que a partir del año 2013 al 2024 se tuvieron un número promedio de 4 publicaciones por año, datos promedios obtenidos en base a los artículos que se seleccionaron únicamente en este trabajo.

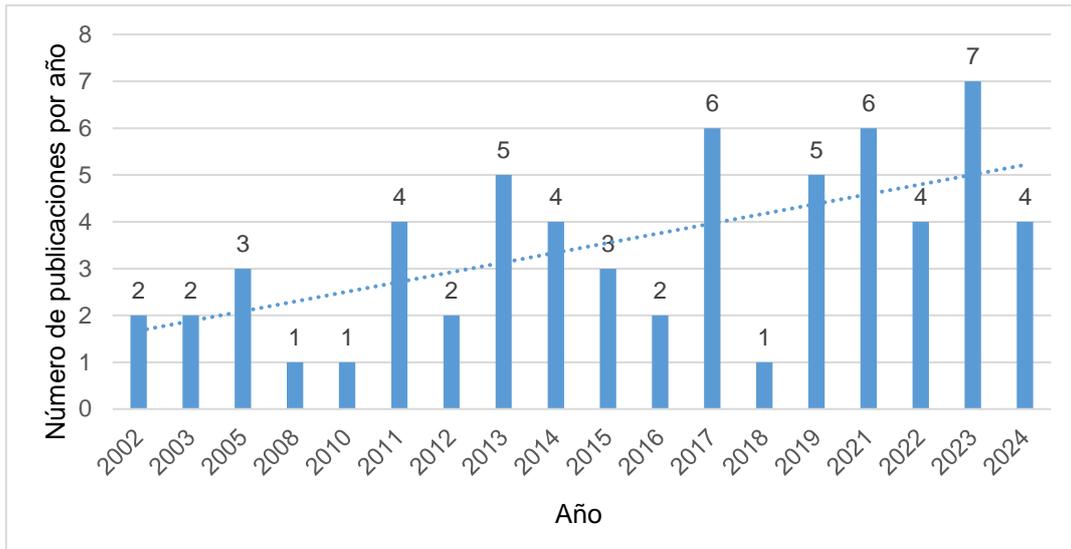


Figura 4.1: Número de publicaciones seleccionadas por año

Los artículos seleccionados se clasificaron en tres tipos de mantenimiento como son el Mantenimiento Basado en el Tiempo (TBM), el Mantenimiento Basado en la Condición (CBM) y el Mantenimiento Centrado en la Confiabilidad (RCM), la distribución de estas publicaciones de acuerdo con su tipo de mantenimiento se observa en la Figura 4.2.

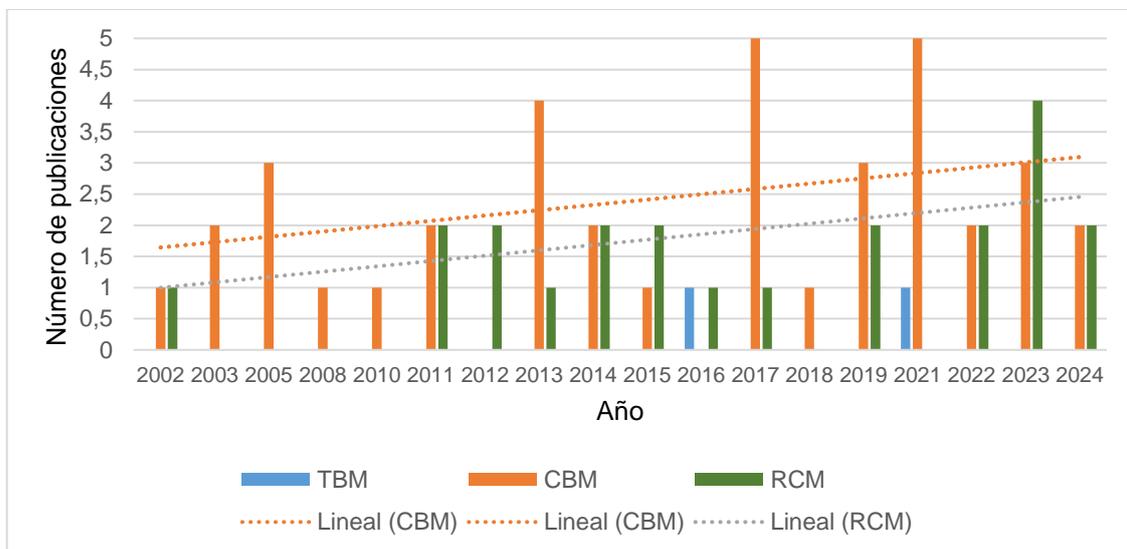


Figura 4.2: Número de publicaciones seleccionadas por tipo de mantenimiento por año

La cantidad limitada de artículos sobre TBM resulta en una tendencia plana en comparación con los artículos sobre CBM y RCM, que muestran una tendencia creciente y paralela. No obstante, la línea de tendencia del CBM es más pronunciada que la del RCM.

Se destaca que el interés por el RCM en el año 2002 experimentó un período de menor actividad y fue retomado en 2011, cuando el enfoque en la aplicación de este tipo de

mantenimiento en interruptores de alto voltaje comenzó a ser consistente, con un aumento gradual en las publicaciones relacionadas. En contraste con el TBM, para el cual se identificaron únicamente dos publicaciones relacionadas y no se observó la aparición de nuevos artículos a lo largo del tiempo. A través de las características detalladas anteriormente se pudo responder a las preguntas de investigación Q1 y Q2.

4.2 DISTRIBUCIÓN DE LAS PUBLICACIONES EN CONFERENCIAS Y REVISTAS DE LA IEEE Y ELSEVIER

Las publicaciones seleccionadas corresponden a artículos de revistas y artículos de conferencias, 38 de los artículos corresponden únicamente a conferencias de la IEEE mientras que 24 artículos corresponden a revistas de la IEEE y de ELSEVIER.

En la Figura 4.3 se exhiben las conferencias de las cuales se extrajeron algunos de los artículos seleccionados. Se destaca una mayor presencia en la conferencia del año 2013, denominada *IEEE Power & Energy Society General Meeting*, donde se presentaron dos publicaciones vinculadas al CBM. El resto de las conferencias muestra la participación de un artículo correspondiente a los diferentes métodos de mantenimiento contemplados en esta investigación.

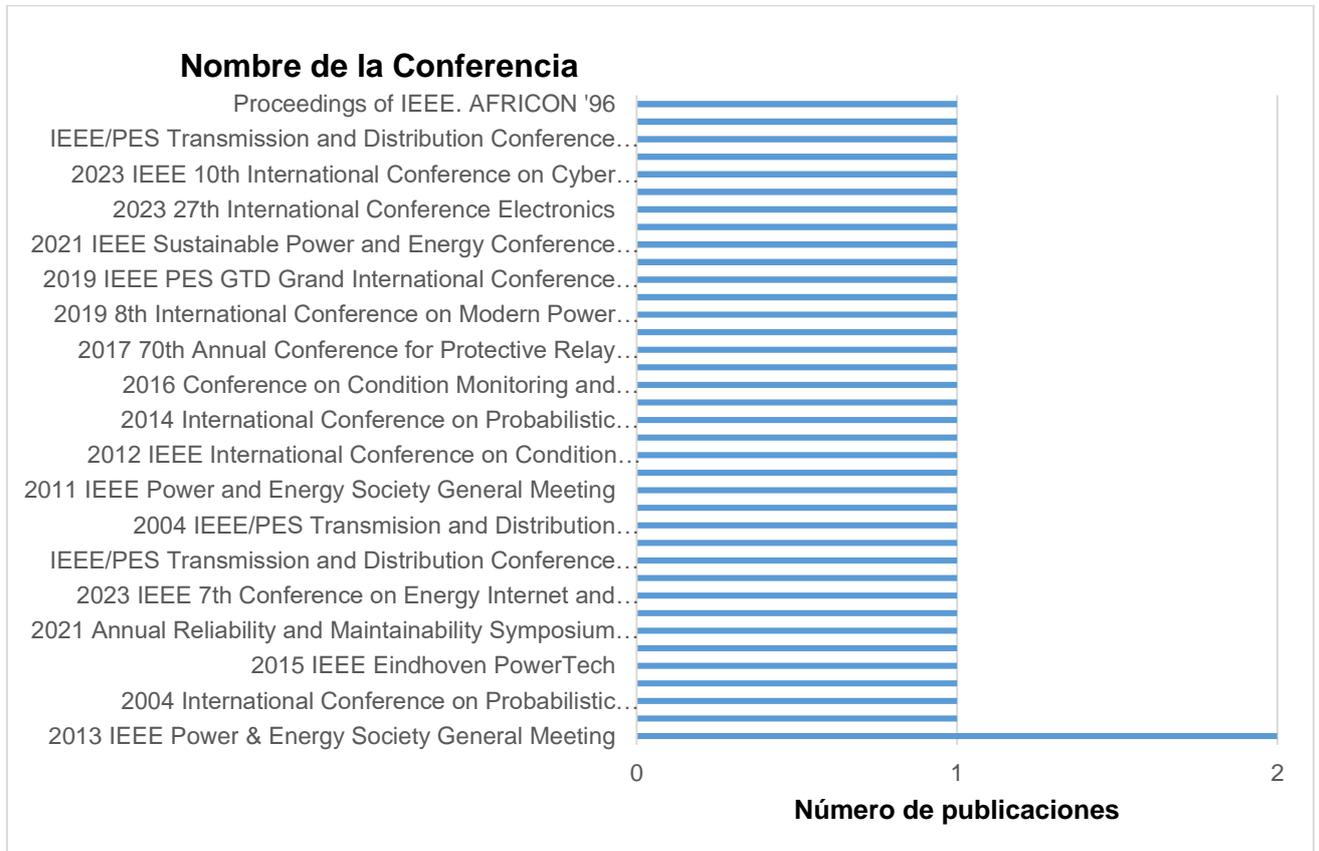


Figura 4.3: Distribución de publicaciones en conferencias de la IEEE

En la Figura 4.4 se presentan los nombres de las revistas de las cuales se extrajeron publicaciones sobre políticas de mantenimiento de interruptores de alto voltaje. Se destaca una notable participación de la revista *Electric Power System Research* de ELSEVIER, con cinco artículos relacionados con el CBM y dos con el RCM. La revista *IEEE Transactions on Power Delivery* también muestra una significativa contribución, con tres artículos sobre el CBM y uno sobre el RCM. Así mismo, la revista *International Journal of Electrical Power & Energy Systems* de ELSEVIER aporta dos artículos del CBM y uno del RCM. Las demás revistas incluidas en el análisis cuentan con un artículo seleccionado según el protocolo inicial.

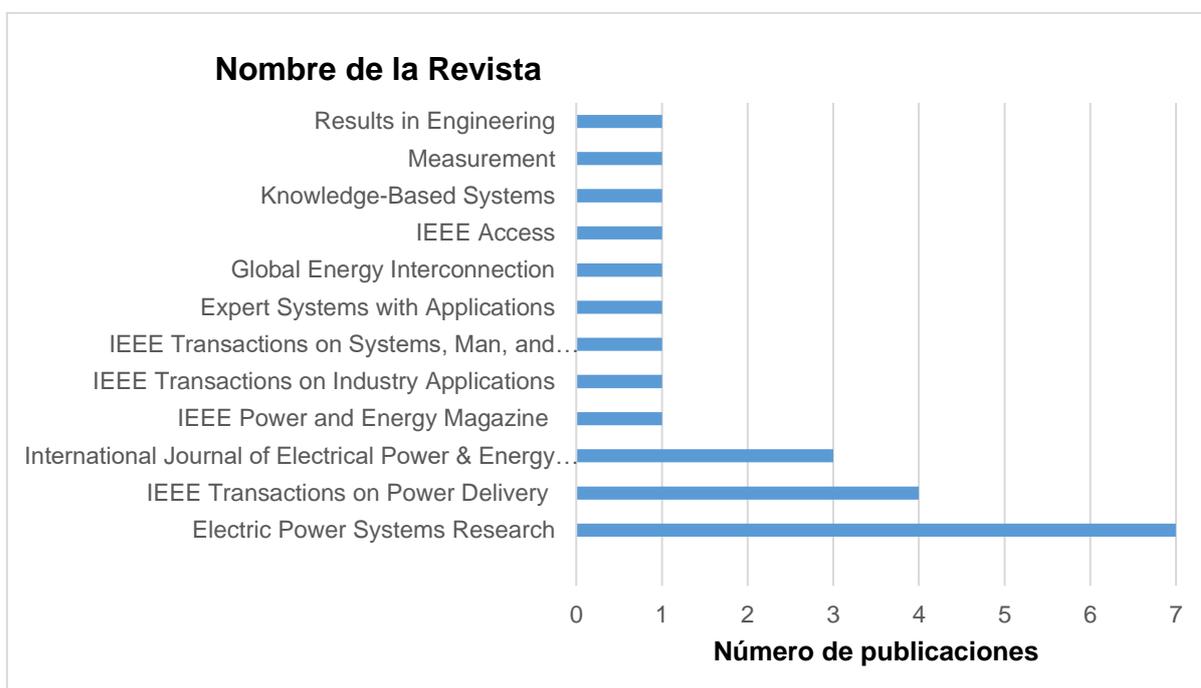


Figura 4.4: Distribución de publicaciones en revistas de la IEEE y de Elsevier

4.3 DETALLE DE LAS PUBLICACIONES SELECCIONADAS

La Tabla 4.1, es el resultado de las publicaciones seleccionadas para cumplir con los fines de este trabajo de investigación al finalizar con la aplicación de la metodología. En la tabla se encuentra el título de la publicación, el número de referencia de acuerdo con este documento, el tipo de mantenimiento, tipo de artículo es decir si es de una revista o conferencia, la fuente, el año de publicación, los enfoques empleados, el número de veces que el trabajo ha sido citado y el DOI para su fácil identificación.

Dentro de esta amplia recopilación de escritos, resalta especialmente el artículo titulado como *Circuit-Breaker Automated Failure Tracking Based on Coil Current Signature*, publicado en 2013 por la IEEE y referenciado en 70 ocasiones en documentos académicos.

El artículo mencionado habla acerca del creciente interés de las compañías eléctricas por monitorear en tiempo real la condición de los interruptores. A través del análisis de la firma de corriente de bobina, el artículo investiga el impacto de diferentes fallos y propone un algoritmo para identificar fallos incipientes basados en la corriente durante la apertura y el cierre. Se clasifica dentro de la metodología de Mantenimiento Basado en la Condición.

Otro artículo destacado en el listado de referencias es titulado como Substations SF6 Circuit Breakers: Reliability Evaluation Based on Equipment Condition publicado en el año 2017 por ELSEVIER posee 50 citas en otros documentos. Este artículo aborda la evaluación del estado del equipo para priorizar ciertas acciones de mantenimiento utilizando un índice de riesgo compuesto. Aunque podría parecer un enfoque de Mantenimiento Centrado en la Confiabilidad, se clasifica como Mantenimiento Basado en la Condición debido a que no profundiza en los modos de falla y sus consecuencias en conjunto con el sistema, un aspecto característico del RCM.

La Tabla 4.1 revela la distribución del uso de diferentes metodologías de mantenimiento en los artículos analizados. Se observa que el método de Mantenimiento Basado en el Tiempo es empleado por el 3.2% de los estudios, seguido por el Mantenimiento Basado en la Confiabilidad, el cual representa el 35.5% de los casos. Sin embargo, es importante destacar que el enfoque predominante es el Mantenimiento Centrado en la Condición, el cual abarca el 61.3% de los artículos analizados.

Este resultado indica una clara preferencia por las políticas de Mantenimiento Centradas en la Condición de los interruptores de alto voltaje, lo cual proporciona una respuesta a la pregunta de investigación Q4.

Además, la tabla muestra una variedad de nuevos enfoques y tecnologías utilizadas en cada tipo de mantenimiento, tales como el uso de Series Temporales, Máquinas de Vectores de Soporte de Mínimos Cuadrados (LS-SVM), Monitoreo en Línea, Fuzzy C-means, Redes Neuronales, Distribuciones de Weibull, entre otros. Estos hallazgos proporcionan una respuesta a la pregunta de investigación Q3.

Tabla 4.1.A: Detalles específicos de los artículos seleccionados de los Métodos de Mantenimiento de Interruptores de Alto Voltaje

Título de la publicación	Tipo de mantenimiento	Tipo de artículo	Nombre de revista/conferencia	Fuente	Año	Enfoques empleados	Veces citado	DOI
Condition monitoring of high voltage circuit breakers[12]	CBM	Artículo de Conferencia	Proceedings of IEEE. AFRICON '96	IEEE Xplore	2002	Equipos de medición basado en microprocesadores y herramientas de monitoreo de condición comerciales	8	10.1109/AFRCON.1996.563009
Reliability-centered maintenance of MV circuit-breakers[13]	RCM	Artículo de Conferencia	2001 IEEE Porto Power Tech Proceedings	IEEE Xplore	2002	Selecciona índices de condición y de importancia	8	10.1109/PTC.2001.964850
Improving circuit breaker maintenance management tasks by applying mobile agent software technology[14]	CBM	Artículo de Conferencia	IEEE/PES Transmission and Distribution Conference and Exhibition	IEEE Xplore	2003	Tecnologías de agentes móviles	14	10.1109/TDC.2002.1177574
New maintenance method of circuit breaker driving by DC solenoid making use of the closing current waveform measurement[15]	CBM	Artículo de Conferencia	IEEE/PES Transmission and Distribution Conference and Exhibition	IEEE Xplore	2003	Medición de la forma de onda de la corriente de cierre y métodos de gestión numérica	5	10.1109/TDC.2002.1177575
Implementation of reliability-centered maintenance for circuit breakers[16]	RCM	Artículo de Conferencia	IEEE Power Engineering Society General Meeting, 2005	IEEE Xplore	2005	Consideración de la condición real del equipo	10	10.1109/PES.2005.1489338
Distribution substation transformer and circuit breaker diagnoses with the assistance of realtime monitoring[17]	CBM	Artículo de Conferencia	2004 IEEE/PES Transmission and Distribution Conference and Exposition: Latin America (IEEE Cat. No. 04EX956)	IEEE Xplore	2005	Sistema de monitoreo en tiempo real	5	10.1109/TDC.2004.1432374
To develop a set of profiles for a family of Alliant Energy's oil circuit breakers[18]	CBM	Artículo de Conferencia	2004 International Conference on Probabilistic Methods Applied to Power Systems	IEEE Xplore	2005	Desarrollo de perfil de interruptores, toma y análisis de muestras de aceite	1	0-9761319-1-9
External diagnosis of Gas Circuit Breaker contact wearing[19]	CBM	Artículo de Conferencia	2005 IEEE Russia Power Tech	IEEE Xplore	2008	Uso de corriente de falla y tiempo de arco	2	10.1109/PTC.2005.4524379
If It Ain't Broke...[20]	RCM	Artículo de Revista	IEEE Power and Energy Magazine	IEEE Xplore	2010	Combinas índices de confición y confiabilidad.	1	10.1109/MPE.2010.938510
Assessing circuit breaker performance using condition-based data and Bayesian approach[21]	CBM	Artículo de Revista	Electric Power Systems Research	ScienceDirect	2011	Definición de índices de rendimiento y un enfoque de actualización bayesiana	45	https://doi.org/10.1016/j.epsr.2011.04.010
Age-dependent maintenance strategies of medium-voltage circuit-breakers and transformers[22]	RCM	Artículo de Revista	Electric Power Systems Research	ScienceDirect	2011	Series temporales	17	https://doi.org/10.1016/j.epsr.2011.03.018
Circuit breaker prognostics using SF6 data[23]	CBM	Artículo de Conferencia	2011 IEEE Power and Energy Society General Meeting	IEEE Xplore	2011	Monitoreo de la densidad de SF6, regresión lineal y pronóstico de fallos	14	10.1109/PES.2011.6039599

Tabla 4.1. B: Detalles específicos de los artículos seleccionados de los Métodos de Mantenimiento de Interruptores de Alto Voltaje

Título de la publicación	Tipo de mantenimiento	Tipo de artículo	Nombre de revista/conferencia	Fuente	Año	Enfoques empleados	Veces citado	DOI
Design of online circuit breaker condition monitoring hardware[24]	CBM	Artículo de Conferencia	The 2nd International Conference on Control, Instrumentation and Automation	IEEE Xplore	2011	Monitoreo en línea, sensores, electrónica y tecnología de la información	2	10.1109/ISCO.2016.7727108
Evaluation of residual service life of high voltage circuit breaker[25]	RCM	Artículo de Conferencia	2012 China International Conference on Electricity Distribution	IEEE Xplore	2012	Modelo de confiabilidad difusa y aleatoria, teoría de predicción gris	1	10.1109/CICED.2012.6508698
Improvement of reliability of closing latch in spring type operating mechanism of high voltage circuit breakers[26]	RCM	Artículo de Conferencia	PES T&D 2012	IEEE Xplore	2012	Utiliza el concepto de diferencia de tiempo de reinicio.	1	10.1109/TDC.2012.6281558
Circuit-Breaker Automated Failure Tracking Based on Coil Current Signature[27]	CBM	Artículo de Revista	IEEE Transactions on Power Delivery	IEEE Xplore	2013	Detección de falla incipientes basados en la corriente de bobina de disparo o cierre	70	10.1109/TPWRD.2013.2276630
Reliability estimation of high voltage SF6 circuit breakers by statistical analysis on the basis of the field data[28]	RCM	Artículo de Revista	Electric Power Systems Research	ScienceDirect	2013	Análisis estadísticos de datos históricos para estimación de la confiabilidad	44	https://doi.org/10.1016/j.epsr.2013.04.014
Security-based circuit breaker maintenance management[29]	CBM	Artículo de Conferencia	2013 IEEE Power & Energy Society General Meeting	IEEE Xplore	2013	Datos de monitoreo basado en la condición y evaluación del impacto en la seguridad	15	10.1109/PESMG.2013.6672293
Assessing circuit breaker life cycle using condition-based data[30]	CBM	Artículo de Conferencia	2013 IEEE Power & Energy Society General Meeting	IEEE Xplore	2013	Distribuciones de Probabilidad	10	10.1109/PESMG.2013.6673062
The condition-based maintenance concept for 500 kV circuit breakers in PLN P3B Jawa Bali — Indonesia[8]	CBM	Artículo de Conferencia	2012 IEEE International Conference on Condition Monitoring and Diagnosis	IEEE Xplore	2013	Técnica de FMEA/FMECA (Análisis de Modos y Efectos de Falla/Análisis de Modos, Efectos y Criticidad de Falla)	1	10.1109/CMD.2012.6416196
Reliability improvement of distribution system using Reliability Centered Maintenance[31]	RCM	Artículo de Conferencia	2014 IEEE PES T&D Conference and Exposition	IEEE Xplore	2014	Índices de confiabilidad	8	10.1109/TDC.2014.6863360
Failure rate analysis of circuit breaker and its preventive maintenance application[32]	CBM	Artículo de Conferencia	2014 International Conference on Probabilistic Methods Applied to Power Systems (PMAPS)	IEEE Xplore	2014	Análisis estadístico y distribuciones de Weibull	5	10.1109/PMAPS.2014.6960623
What Is RCM and How Could It Be Applied to the Critical Loads?[33]	RCM	Artículo de Revista	IEEE Transactions on Industry Applications	IEEE Xplore	2014	Procesos de mantenimiento optimizados y transferencia automática de interruptores	3	10.1109/TIA.2014.2379951
The Condition Based Maintenance Evaluation Model on On-post Vacuum Circuit Breaker[34]	CBM	Artículo de Revista	Systems Engineering Procedia	ScienceDirect	2014	Índices de evaluación de condición y riesgo, técnica de minería de datos	1	https://doi.org/10.1016/j.sepro.2011.11.064

Tabla 4.1.C: Detalles específicos de los artículos seleccionados de los Métodos de Mantenimiento de Interruptores de Alto Voltaje

Título de la publicación	Tipo de mantenimiento	Tipo de artículo	Nombre de revista/conferencia	Fuente	Año	Enfoques empleados	Veces citado	DOI
LS-SVM based substation circuit breakers maintenance scheduling optimization[35]	CBM	Artículo de Revista	International Journal of Electrical Power & Energy Systems	ScienceDirect	2015	Utiliza máquinas de vectores de soporte de mínimos cuadrados (LS-SVM)	18	https://doi.org/10.1016/j.ijepes.2014.09.013
RCM scheduling optimization for circuit breakers based on LS-SVM[36]	RCM	Artículo de Conferencia	2014 International Conference on Connected Vehicles and Expo (ICCVE)	IEEE Xplore	2015	Máquinas de vectores de soporte mínimos cuadrados (LS-SVM)	1	10.1109/ICCVE.2014.7297536
Expert system to support maintenance scheduling of high voltage circuit breakers[37]	RCM	Artículo de Conferencia	2015 IEEE Eindhoven PowerTech	IEEE Xplore	2015	Lógica difusa	0	10.1109/PTC.2015.7232826
The reliability evaluation of configuration of bus arrangement in substations by the variable failure rate of power circuit breaker under time-based maintenance[6]	TBM	Artículo de Conferencia	2016 Conference on Condition Monitoring and Diagnosis (CMD)	IEEE Xplore	2016	Distribución de Weibull y Análisis de Datos Históricos	3	10.1109/CMD.2016.7757920
Research on expert diagnosis system for mechanical fault of high voltage circuit breaker based on fuzzy matrix and neural network technology[38]	RCM	Artículo de Conferencia	2016 International Conference on Condition Monitoring and Diagnosis (CMD)	IEEE Xplore	2016	Utiliza el algoritmo de matriz difusa y redes neuronales (RBF)	3	10.1109/CMD.2016.7757795
Substations SF6 circuit breakers: Reliability evaluation based on equipment condition[39]	CBM	Artículo de Revista	Electric Power Systems Research	ScienceDirect	2017	Desarrollo de un índice de riesgo compuesto	50	https://doi.org/10.1016/j.epsr.2016.08.018
A Model-Based Hybrid Approach for Circuit Breaker Prognostics Encompassing Dynamic Reliability and Uncertainty[40]	RCM	Artículo de Revista	IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics: Systems	IEEE Xplore	2017	Realiza procesos de Márkov, integra modelos de pronósticos híbridos con conceptos de confiabilidad dinámica	30	10.1109/TSMC.2017.2685346
Real-time circuit breaker health diagnostics[41]	CBM	Artículo de Conferencia	2017 70th Annual Conference for Protective Relay Engineers (CPRE)	IEEE Xplore	2017	Utiliza sistemas de monitoreo en tiempo real	6	10.1109/CPRE.2017.8090047
SF6 gas circuit breakers reliability estimation, considering likely wear points[42]	CBM	Artículo de Conferencia	2016 51st International Universities Power Engineering Conference (UPEC)	IEEE Xplore	2017	Identificación de puntos de desgaste, estimación de la fiabilidad	2	10.1109/UPEC.2016.8114006
Trip Coil Signature Measurement and Analysis Techniques for Circuit Breaker[43]	CBM	Artículo de Conferencia	2016 7th International Conference on Intelligent Systems, Modelling and Simulation (ISMS)	IEEE Xplore	2017	Análisis de la firma de la bobina de disparo	1	10.1109/ISMS.2016.28

Tabla 4.1. D: Detalles específicos de los artículos seleccionados de los Métodos de Mantenimiento de Interruptores de Alto Voltaje

Título de la publicación	Tipo de mantenimiento	Tipo de artículo	Nombre de revista/conferencia	Fuente	Año	Enfoques empleados	Veces citado	DOI
A Hybrid Knowledge-Based and Data-Driven Method for Aging-Dependent Reliability Evaluation of High-Voltage Circuit Breaker[44]	CBM	Artículo de Revista	IEEE Transactions on Power Delivery	IEEE Xplore	2017	Utiliza el modelo BHT-ARIMA y distribución de Weibull	1	10.1109/TPWRD.2023.3314083
Benefits of Permanent Travel Measurement in High Voltage Circuit Breaker Online Monitoring[45]	CBM	Artículo de Conferencia	2018 International Conference on Diagnostics in Electrical Engineering (Diagnostical)	IEEE Xplore	2018	Medición permanente del recorrido, monitoreo de la densidad del gas SF6	1	10.1109/DIAGNOSTIKA.2018.8526036
A New Vibration Analysis Approach for Detecting Mechanical Anomalies on Power Circuit Breakers[46]	CBM	Artículo de Revista	IEEE Access	IEEE Xplore	2019	Espectro marginal de Hilbert (HMS) y descomposición de modo variacional (VMD)	38	10.1109/ACCESS.2019.2893922
Artificial intelligence SF6 circuit breaker health assessment[47]	CBM	Artículo de Revista	Electric Power Systems Research	ScienceDirect	2019	Utiliza métodos de inteligencia artificial para la estimación del estado del equipo	20	https://doi.org/10.1016/j.epsr.2019.105912
Research on Reliability Optimization Method of Disconnecting Circuit Breakers[48]	RCM	Artículo de Conferencia	2019 IEEE 3rd Conference on Energy Internet and Energy System Integration (EI2)	IEEE Xplore	2019	Optimización de la confiabilidad de los disyuntores de desconexión (DCB)	1	10.1109/EI247390.2019.9062115
Lifetime Availability Analysis of High Voltage Circuit Breakers for Maintenance Optimization[49]	CBM	Artículo de Conferencia	2019 8th International Conference on Modern Power Systems (MPS)	IEEE Xplore	2019	Monitoreo del estado de la condición	1	10.1109/MPS.2019.8759677
Criticality Evaluation of HV Circuit Breakers in Distribution Substations[50]	RCM	Artículo de Conferencia	2019 IEEE PES GTD Grand International Conference and Exposition Asia (GTD Asia)	IEEE Xplore	2019	Utiliza el Método de Ruta Exitosa (SPM) para la evaluación de la confiabilidad	0	10.1109/GTDAsia.2019.8715964
A novel data-driven method for maintenance prioritization of circuit breakers based on the ranking SVM[51]	CBM	Artículo de Revista	International Journal of Electrical Power & Energy Systems	ScienceDirect	2021	Utiliza agrupamiento fuzzy C-means (FCM) combinado con máquina de soporte vectorial (SVM)	13	https://doi.org/10.1016/j.ijepes.2021.106779
Real-Time Remaining Useful Life Prediction for High-Voltage Circuit Breakers Based on the Degradation Model and Data-Driven[52]	CBM	Artículo de Conferencia	2021 IEEE Sustainable Power and Energy Conference (ISPEC)	IEEE Xplore	2021	Modelo de degradación exponencial y algoritmo Bayesiano	2	10.1109/iSPEC53008.2021.9735485
Time Based Preventative Maintenance Policies for Circuit Breakers with Multiple Failure Types[5]	TBM	Artículo de Conferencia	2021 Annual Reliability and Maintainability Symposium (RAMS)	IEEE Xplore	2021	Modelo de proceso de renovación de tendencias y método de máxima verosimilitud	0	10.1109/RAMS48097.2021.9605785
Research on the Service Life of High-Voltage Vacuum Circuit Breaker of High-speed Train[53]	CBM	Artículo de Conferencia	2021 IEEE 4th International Electrical and Energy Conference (CIEEC)	IEEE Xplore	2021	Análisis de la trayectoria de degradación	0	10.1109/CIEEC50170.2021.9510823

Tabla 4.1. E: Detalles específicos de los artículos seleccionados de los Métodos de Mantenimiento de Interruptores de Alto Voltaje

Título de la publicación	Tipo de mantenimiento	Tipo de artículo	Nombre de revista/conferencia	Fuente	Año	Enfoques empleados	Veces citado	DOI
Online Defect Elimination Equipment for High Voltage Isolation Switch Based on Laser Cleaning Technology[54]	CBM	Artículo de Conferencia	2021 IEEE 4th International Conference on Automation, Electronics and Electrical Engineering (AUTEEE)	IEEE Xplore	2021	Tecnología de limpieza laser	0	10.1109/AUTEEE52864.2021.9668326
A practical knowledge-based ranking approach to identify critical circuit breakers in large power systems[55]	CBM	Artículo de Revista	Knowledge-Based Systems	ScienceDirect	2021	Sistemas de monitoreo en línea	0	https://doi.org/10.1016/j.knosys.2021.107237
Fault diagnosis of high voltage circuit breaker based on multi-sensor information fusion with training weights[56]	RCM	Artículo de Revista	Measurement	ScienceDirect	2022	Utiliza la teoría de Dempster/Shfer (D-S) y descomposición de paquetes de wavelet, además de redes neuronales.	11	https://doi.org/10.1016/j.measurement.2022.110894
Measurement and Operation Based Condition Monitoring Methodology for High Voltage Circuit Breakers[57]	CBM	Artículo de Conferencia	2022 IEEE PES Innovative Smart Grid Technologies Conference Europe (ISGT-Europe)	IEEE Xplore	2022	Curva de Envejecimiento Esperado	6	10.1109/ISGT-Europe54678.2022.9960521
Application of Bioinspired Antennas in the Monitoring of High Voltage Circuit Breakers[58]	CBM	Artículo de Revista	IEEE Transactions on Power Delivery	IEEE Xplore	2022	Monitoreo radiométrico de interruptores de HV con antenas planas de monopolo de banda ancha	3	10.1109/TPWRD.2022.3170309
A fuzzy-logic-based method for maintenance prioritization of high-voltage SF6 circuit breakers, considering uneven wear[59]	RCM	Artículo de Revista	Results in Engineering	ScienceDirect	2022	Lógica difusa para estimar la fiabilidad de los interruptores	0	https://doi.org/10.1016/j.rineng.2022.100788
Prediction method of mechanical state of high-voltage circuit breakers based on LSTM-SVM[60]	CBM	Artículo de Revista	Electric Power Systems Research	ScienceDirect	2023	Redes neuronales de memoria a corto y largo plazo (LSTM) con vectores de soporte (SVM)	6	https://doi.org/10.1016/j.epsr.2023.109224
An approach based on wavelets and machine learning to build a prediction model for SF6 filling pressure of high-voltage circuit breakers[61]	CBM	Artículo de Revista	Electric Power Systems Research	ScienceDirect	2023	Utiliza el análisis de componentes vecinos (NCA), transformada discreta de wavelets (DWT)	4	https://doi.org/10.1016/j.epsr.2022.108974

Tabla 4.1. F: Detalles específicos de los artículos seleccionados de los Métodos de Mantenimiento de Interruptores de Alto Voltaje

Título de la publicación	Tipo de mantenimiento	Tipo de artículo	Nombre de revista/conferencia	Fuente	Año	Enfoques empleados	Veces citado	DOI
Reliability modeling of multi-terminal DC circuit breaker and its impact on multi-terminal DC distribution network[62]	RCM	Artículo de Revista	International Journal of Electrical Power & Energy Systems	ScienceDirect	2023	Utiliza índices de confiabilidad multidimensionales y el método de conjunto de corte mínimo	3	https://doi.org/10.1016/j.ijepes.2022.108888
Condition Assessment of Power Circuit Breakers Based on Machine Learning Algorithms[63]	RCM	Artículo de Revista	IEEE Transactions on Power Delivery	IEEE Xplore	2023	Aprendizaje automático y redes neuronales convolucionales	2	10.1109/TPWRD.2023.3248157
Incremental Multivariate State Estimation Technique-Based Fault Estimation Method for Motor-driven High-Voltage Circuit Breakers[64]	CBM	Artículo de Conferencia	2023 IEEE 10th International Conference on Cyber Security and Cloud Computing (CSCloud)/2023 IEEE 9th International Conference on Edge Computing and Scalable Cloud (EdgeCom)	IEEE Xplore	2023	Estimación de estado multivariable incremental y estimación de fallas	0	10.1109/CSCloud-EdgeCom58631.2023.00060
Design of Distributed Detection System for High Voltage Intelligent Breaker Secondary System Based on Dynamic Closed Loop[65]	RCM	Artículo de Conferencia	2023 IEEE International Conference on Advanced Power System Automation and Protection (APAP)	IEEE Xplore	2023	Buble cerrado dinámico y series temporales multidimensionales	0	10.1109/APAP59666.2023.10348467
Incorporating Service Type in Aging Failure Model of High Voltage Circuit Breaker[66]	RCM	Artículo de Conferencia	2023 27th International Conference Electronics	IEEE Xplore	2023	Modelo que se basa en la función gaussiana y estimación del índice de confiabilidad	0	10.1109/IEEECONF58372.2023.10177602
A novel mechanical fault diagnosis for high-voltage circuit breakers with zero-shot learning[67]	CBM	Artículo de Revista	Expert Systems with Applications	ScienceDirect	2024	Utiliza el método R-MLL, la transformada de wavelet y una red convolucional (CNN)	1	https://doi.org/10.1016/j.eswa.2023.123133
Research on Evaluation Method of AC Filter Circuit Breaker Based on Fuzzy Hierarchy Method[68]	RCM	Artículo de Conferencia	2023 IEEE 7th Conference on Energy Internet and Energy System Integration (EI2)	IEEE Xplore	2024	Método de jerarquías difusa	0	10.1109/EI259745.2023.10513278
Analysis of multiple-faults of high-voltage circuit breakers based on non-negative matrix decomposition[69]	CBM	Artículo de Revista	Global Energy Interconnection	ScienceDirect	2024	Detección de múltiples fallas y monitoreo en tiempo real en línea	0	https://doi.org/10.1016/j.gloi.2024.04.006
An Analytical Study of a Tripping by Three-phase Inconsistent Fault in 220kV GIS Circuit Breaker[70]	RCM	Artículo de Conferencia	2023 5th International Conference on Electrical Engineering and Control Technologies (CEECT)	IEEE Xplore	2024	Análisis de las condiciones operativas del disyunto y medidas de control detalladamente	0	10.1109/CEECT59667.2023.10420734

4.4 Conclusiones

- Se lograron detallar las estrategias de mantenimiento aplicadas a interruptores de alto voltaje, comenzando con el mantenimiento correctivo, el cual resultaba ser el menos eficiente y provocaba mayores pérdidas económicas. Posteriormente, surgió el TBM como una forma de mantenimiento preventivo basado principalmente en pruebas y recomendaciones de los fabricantes para determinar un período adecuado según el componente y tipo de disyuntor. Luego, el CBM se implementó, orientado a establecer el mantenimiento adecuado del disyuntor en función de su condición. Finalmente, el mantenimiento RCM se destacó por incorporar una mayor cantidad de datos, como la disposición de los equipos en la red, para ofrecer una mayor confiabilidad al momento de realizar el mantenimiento del equipo.
- Aunque la aparición de cada estrategia de mantenimiento permite mitigar fallos y prolongar la vida útil de los equipos con mayor eficiencia, la adopción de estas estrategias dependerá del capital disponible que la empresa pueda asignar. La precisión y una mejor gestión de los activos requerirán la adquisición de equipos de medición, el registro de datos y la contratación de expertos que puedan definir los parámetros adecuados para cada tipo de mantenimiento. Por lo tanto, la implementación efectiva de estas metodologías demandará una inversión significativa en presupuesto para su ejecución.
- Durante la ejecución de la SRL se observó una notable disparidad en la cantidad de artículos seleccionados entre ScienceDirect y IEEE Xplore. Este fenómeno puede atribuirse a la naturaleza amplia y multidisciplinaria de ScienceDirect, que abarca no solo la ingeniería eléctrica, sino también otras ramas de la ingeniería, las energías y diversas disciplinas científicas. En contraste, IEEE Xplore se centra principalmente en la ingeniería eléctrica y disciplinas relacionadas. Por lo tanto, mientras que ScienceDirect ofrece una variedad más amplia de contenido que trasciende las fronteras de una sola área temática, IEEE Xplore se especializa en un campo más específico, lo que resulta en una marcada diferencia en el número de artículos disponibles entre ambas plataformas.
- El análisis de la distribución temporal de los artículos revela una tendencia creciente en el interés por las políticas de mantenimiento de interruptores de alto voltaje, indicando un aumento en la investigación y desarrollo en este campo. Este crecimiento está respaldado por la abundante disponibilidad de datos obtenidos a través de avanzados sistemas de monitoreo en línea. Además, se observa un

incremento notable en el estudio de políticas de mantenimiento basadas en la condición, impulsado por los avances tecnológicos en los sistemas eléctricos. Aunque el enfoque RCM muestra un volumen menor de publicaciones comparado con el CBM, su relevancia está en ascenso, reflejando la creciente necesidad de garantizar la confiabilidad de los sistemas eléctricos, en línea con consideraciones económicas.

- Se ha logrado sintetizar y detallar la información de los artículos sobre las estrategias de mantenimiento de interruptores de alto voltaje en la Tabla 4.1. La recolección de publicaciones revela una menor presencia de artículos relacionados con el TBM en comparación con el CBM y RCM, principalmente debido a su limitada fundamentación en recomendaciones de fabricantes y la experiencia operativa de las empresas. Al analizar la tabla, se observa que el enfoque predominante es el Mantenimiento Centrado en la Condición, abarcando un notable 61.3% de los artículos analizados. Estos hallazgos reflejan un creciente interés y adopción de métodos avanzados para asegurar la confiabilidad y eficiencia de los sistemas eléctricos.

4.5 Recomendaciones

- Se recomienda investigar otras estrategias utilizadas en el CBM y RCM aparte de las que se explicaron en este trabajo. Es crucial entender en detalle qué tipos de datos se pueden recopilar y cómo se utilizan estos datos para prever y programar las actividades de mantenimiento. Permitiendo proporcionar un conocimiento más completo sobre las herramientas y métodos para la predicción de fallas.
- Se recomienda replicar el ejemplo de aplicación del Mantenimiento Basado en la Condición descrito en este TIC, utilizando una base de datos de interruptores de alto voltaje de una subestación en Ecuador. Los resultados obtenidos deberían compararse con las prácticas de mantenimiento actuales en la empresa. Esta comparación podría revelar posibles mejoras y beneficios derivados de la implementación de esta nueva estrategia de mantenimiento.

5 REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] CIGRE, *Switching Equipment International Council on Large Electric Systems (CIGRE) Study Committee A3: High Voltage Equipment*. 2019.
- [2] G. David, "The Development of a Methodology to Determine the Maintenance

- Strategy for High Voltage Circuit Breakers,” University of Strathclyde Glasgow, 2010.
- [3] J. Moubray, *Enhanced reliability-centered maintenance*, Second Edi., vol. 9, no. 3. 1991.
- [4] CIGRE, *Power System Assets: Investment, Management, Methods and Practices*. 2022.
- [5] W. Wascom and Y. Xiang, “Time Based Preventative Maintenance Policies for Circuit Breakers with Multiple Failure Types,” *Proc. - Annu. Reliab. Maintainab. Symp.*, vol. 2021-May, 2021, doi: 10.1109/RAMS48097.2021.9605785.
- [6] S. Lipirodjanapong, C. Suwanasri, and T. Suwanasri, “The reliability evaluation of configuration of bus arrangement in substations by the variable failure rate of power circuit breaker under time-based maintenance,” *C. 2016 - Int. Conf. Cond. Monit. Diagnosis*, pp. 705–708, 2016, doi: 10.1109/CMD.2016.7757920.
- [7] R. Ahmad and S. Kamaruddin, “An overview of time-based and condition-based maintenance in industrial application,” *Comput. Ind. Eng.*, vol. 63, no. 1, pp. 135–149, 2012, doi: 10.1016/j.cie.2012.02.002.
- [8] R. Sety, P. L. N. Persero, and P. B. J. Ba, “The Conditioned Maintenance Concept for 500 kV C Circuit t Break kers in n PLN P3B P Ja awa Bal li – Ind donesia,” no. September, pp. 529–532, 2013, doi: 10.1109/CMD.2012.6416196.
- [9] M. Abbasghorbani, H. R. Mashhadi, and Y. Damchi, “Reliability-centred maintenance for circuit breakers in transmission networks,” *IET Gener. Transm. Distrib.*, vol. 8, no. 9, pp. 1583–1590, 2014, doi: 10.1049/iet-gtd.2013.0530.
- [10] B. Kitchenham, O. Pearl Brereton, D. Budgen, M. Turner, J. Bailey, and S. Linkman, “Systematic literature reviews in software engineering - A systematic literature review,” *Inf. Softw. Technol.*, vol. 51, no. 1, pp. 7–15, 2009, doi: 10.1016/j.infsof.2008.09.009.
- [11] D. Pati and L. N. Lorusso, “How to Write a Systematic Review of the Literature,” *Heal. Environ. Res. Des. J.*, vol. 11, no. 1, pp. 15–30, 2018, doi: 10.1177/1937586717747384.
- [12] M. H. B. de Grijp, J. S. Bedet, R. A. Hopkins, and J. E. Greyling, “Condition monitoring of high voltage circuit breakers,” *IEEE AFRICON Conf.*, vol. 2, pp. 880–885, 1996, doi: 10.1109/AFRCON.1996.563009.

- [13] J. Schlabbach and T. Berka, "Reliability-centred maintenance of MV circuit-breakers," *2001 IEEE Porto Power Tech Proc.*, vol. 4, pp. 301–305, 2001, doi: 10.1109/PTC.2001.964850.
- [14] M. Kezunovic, X. Xu, and D. Wong, "Improving circuit breaker maintenance management tasks by applying mobile agent software technology," *Proc. IEEE Power Eng. Soc. Transm. Distrib. Conf.*, vol. 2, no. ASIA PACIFIC, pp. 782–787, 2002, doi: 10.1109/TDC.2002.1177574.
- [15] T. Sugimoto, T. Watanabe, and I. Iwamoto, "New maintenance method of circuit breaker driving by DC solenoid making use of the closing current waveform measurement," *Proc. IEEE Power Eng. Soc. Transm. Distrib. Conf.*, vol. 2, no. ASIA PACIFIC, pp. 788–791, 2002, doi: 10.1109/TDC.2002.1177575.
- [16] T. Chan, C. C. Liu, and J. W. Choe, "Implementation of Reliability-Centered Maintenance for circuit breakers," *2005 IEEE Power Eng. Soc. Gen. Meet.*, vol. 1, no. i, pp. 684–690, 2005, doi: 10.1109/pes.2005.1489338.
- [17] P. S. D. Kayano, M. S. Silva, L. C. Magrini, Y. P. Calderón, J. A. Jardini, and F. E. C. Veiga, "Distribution substation transformer and circuit breaker diagnoses with the assistance of real-time monitoring," *2004 IEEE/PES Transm. Distrib. Conf. Expo. Lat. Am.*, pp. 185–189, 2004, doi: 10.1109/TDC.2004.1432374.
- [18] A. Parthasarathy, "To develop a set of profiles for a family of Alliant Energy's oil circuit breakers | IEEE Conference Publication | IEEE Xplore," 2004. <https://ieeexplore.ieee.org/document/1378826> (accessed Jul. 04, 2024).
- [19] K. Miyake *et al.*, "External diagnosis of gas circuit breaker contact wearing," *2005 IEEE Russ. Power Tech, PowerTech*, 2005, doi: 10.1109/PTC.2005.4524379.
- [20] B. Desai, M. Walther, and J. Haufler, "If it ain't broke...", *IEEE Power Energy Mag.*, vol. 8, no. 6, pp. 48–52, Nov. 2010, doi: 10.1109/MPE.2010.938510.
- [21] S. Natti and M. Kezunovic, "Assessing circuit breaker performance using condition-based data and Bayesian approach," *Electr. Power Syst. Res.*, vol. 81, no. 9, pp. 1796–1804, Sep. 2011, doi: 10.1016/J.EPSR.2011.04.010.
- [22] X. Zhang and E. Gockenbach, "Age-dependent maintenance strategies of medium-voltage circuit-breakers and transformers," *Electr. Power Syst. Res.*, vol. 81, no. 8, pp. 1709–1714, Aug. 2011, doi: 10.1016/J.EPSR.2011.03.018.
- [23] S. E. Rudd, V. M. Catterson, S. D. J. McArthur, and C. Johnstone, "Circuit breaker

- prognostics using SF6 data,” *IEEE Power Energy Soc. Gen. Meet.*, 2011, doi: 10.1109/PES.2011.6039599.
- [24] L. Mallikar-Godbole and B. E. Kushare, “Design of online condition monitoring hardware device for SF6 circuit breaker,” *Proc. 10th Int. Conf. Intell. Syst. Control. ISCO 2016*, Oct. 2016, doi: 10.1109/ISCO.2016.7727108.
- [25] K. Huang and S. Zhao, “Evaluation of residual service life of high voltage circuit breaker,” *China Int. Conf. Electr. Distrib. CICED*, 2012, doi: 10.1109/CICED.2012.6508698.
- [26] L. Yu *et al.*, “Improvement of reliability of closing latch in spring type operating mechanism of high voltage circuit breakers,” *Proc. IEEE Power Eng. Soc. Transm. Distrib. Conf.*, 2012, doi: 10.1109/TDC.2012.6281558.
- [27] A. A. Razi-Kazemi, M. Vakilian, K. Niayesh, and M. Lehtonen, “Circuit-breaker automated failure tracking based on coil current signature,” *IEEE Trans. Power Deliv.*, vol. 29, no. 1, pp. 283–290, 2014, doi: 10.1109/TPWRD.2013.2276630.
- [28] X. Zhang, E. Gockenbach, Z. Liu, H. Chen, and L. Yang, “Reliability estimation of high voltage SF6 circuit breakers by statistical analysis on the basis of the field data,” *Electr. Power Syst. Res.*, vol. 103, pp. 105–113, Oct. 2013, doi: 10.1016/J.EPSR.2013.04.014.
- [29] P. Dehghanian, M. Kezunovic, G. Gurralla, and Y. Guan, “Security-based circuit breaker maintenance management,” *IEEE Power Energy Soc. Gen. Meet.*, 2013, doi: 10.1109/PESMG.2013.6672293.
- [30] Y. Guan, M. Kezunovic, P. Dehghanian, and G. Gurralla, “Assessing circuit breaker life cycle using condition-based data,” *IEEE Power Energy Soc. Gen. Meet.*, 2013, doi: 10.1109/PESMG.2013.6673062.
- [31] K. Tirapong and S. Titti, “Reliability improvement of distribution system using reliability centered maintenance,” *Proc. IEEE Power Eng. Soc. Transm. Distrib. Conf.*, Jul. 2014, doi: 10.1109/TDC.2014.6863360.
- [32] C. Suwanasri, S. Lipirodjanapong, T. Suwanasri, and W. Wangdee, “Failure rate analysis of circuit breaker and its preventive maintenance application,” *2014 Int. Conf. Probabilistic Methods Appl. to Power Syst. PMAPS 2014 - Conf. Proc.*, Nov. 2014, doi: 10.1109/PMAPS.2014.6960623.
- [33] R. Arno, N. Dowling, S. Fairfax, R. J. Schuerger, and J. Weber, “What is RCM and

- how could it be applied to the critical loads?," *IEEE Trans. Ind. Appl.*, vol. 51, no. 3, pp. 2045–2053, May 2015, doi: 10.1109/TIA.2014.2379951.
- [34] C. Yanbin and C. Bo, "The Condition Based Maintenance Evaluation Model on On-post Vacuum Circuit Breaker," *Syst. Eng. Procedia*, vol. 4, pp. 182–188, Jan. 2012, doi: 10.1016/J.SEPRO.2011.11.064.
- [35] L. Jian and T. Tianyuan, "LS-SVM based substation circuit breakers maintenance scheduling optimization," *Int. J. Electr. Power Energy Syst.*, vol. 64, pp. 1251–1258, Jan. 2015, doi: 10.1016/J.IJEPES.2014.09.013.
- [36] Y. Kai and L. Jian, "RCM scheduling optimization for circuit breakers based on LS-SVM," *2014 Int. Conf. Connect. Veh. Expo, ICCVE 2014 - Proc.*, pp. 162–169, 2014, doi: 10.1109/ICCVE.2014.7297536.
- [37] D. T. Dos Santos and J. G. Rolim, "Expert system to support maintenance scheduling of high voltage circuit breakers," *2015 IEEE Eindhoven PowerTech, PowerTech 2015*, Aug. 2015, doi: 10.1109/PTC.2015.7232826.
- [38] P. Hou, S. Bai, Y. Ge, Y. Zhang, and H. Zhang, "Research on expert diagnosis system for mechanical fault of high voltage circuit breaker based on fuzzy matrix and neural network technology," *C. 2016 - Int. Conf. Cond. Monit. Diagnosis*, pp. 139–143, Nov. 2016, doi: 10.1109/CMD.2016.7757795.
- [39] E. A. L. Vianna, A. R. Abaide, L. N. Canha, and V. Miranda, "Substations SF6 circuit breakers: Reliability evaluation based on equipment condition," *Electr. Power Syst. Res.*, vol. 142, pp. 36–46, Jan. 2017, doi: 10.1016/J.EPSR.2016.08.018.
- [40] J. I. Aizpurua, V. M. Catterson, I. F. Abdulhadi, and M. S. Garcia, "A Model-Based Hybrid Approach for Circuit Breaker Prognostics Encompassing Dynamic Reliability and Uncertainty," *IEEE Trans. Syst. Man, Cybern. Syst.*, vol. 48, no. 9, pp. 1637–1648, Sep. 2018, doi: 10.1109/TSMC.2017.2685346.
- [41] J. M. Byerly, C. Schneider, R. Schloss, and I. West, "Real-time circuit breaker health diagnostics," *70th Annu. Conf. Prot. Relay Eng. CPRE 2017*, Oct. 2017, doi: 10.1109/CPRE.2017.8090047.
- [42] E. A. L. Vianna, A. R. Abaide, L. N. Canha, and P. L. Vianna, "SF6 gas circuit breakers reliability estimation, considering likely wear points," *Proc. - 2016 51st Int. Univ. Power Eng. Conf. UPEC 2016*, vol. 2017-January, pp. 1–6, Jul. 2016, doi: 10.1109/UPEC.2016.8114006.

- [43] H. Ahmad and T. S. Kiong, "Trip Coil Signature Measurement and Analysis Techniques for Circuit Breaker," *Proc. - Int. Conf. Intell. Syst. Model. Simulation, ISMS*, vol. 0, pp. 261–267, Jul. 2016, doi: 10.1109/ISMS.2016.28.
- [44] H. Xu *et al.*, "A Hybrid Knowledge-Based and Data-Driven Method for Aging-Dependent Reliability Evaluation of High-Voltage Circuit Breaker," *IEEE Trans. Power Deliv.*, vol. 38, no. 6, pp. 4384–4396, Dec. 2023, doi: 10.1109/TPWRD.2023.3314083.
- [45] N. Gariboldi and P. L. Corliss, "Benefits of Permanent Travel Measurement in High Voltage Circuit Breaker Online Monitoring," *2018 Int. Conf. Diagnostics Electr. Eng. Diagnostika 2018*, Nov. 2018, doi: 10.1109/DIAGNOSTIKA.2018.8526036.
- [46] Q. Yang, J. Ruan, Z. Zhuang, D. Huang, and Z. Qiu, "A New Vibration Analysis Approach for Detecting Mechanical Anomalies on Power Circuit Breakers," *IEEE Access*, vol. 7, pp. 14070–14080, 2019, doi: 10.1109/ACCESS.2019.2893922.
- [47] M. Žarković and Z. Stojković, "Artificial intelligence SF6 circuit breaker health assessment," *Electr. Power Syst. Res.*, vol. 175, p. 105912, Oct. 2019, doi: 10.1016/J.EPSR.2019.105912.
- [48] L. Han, T. Feng, S. Gu, Y. Jiang, Y. Wan, and L. Cheng, "Research on Reliability Optimization Method of Disconnecting Circuit Breakers," *2019 3rd IEEE Conf. Energy Internet Energy Syst. Integr. Ubiquitous Energy Netw. Connect. Everything, EI2 2019*, pp. 997–1002, Nov. 2019, doi: 10.1109/EI247390.2019.9062115.
- [49] C. Mihalcea, F. Munteanu, C. Nemes, and F. Baiceanu, "Lifetime Availability Analysis of High Voltage Circuit Breakers for Maintenance Optimization," *Proc. 2019 8th Int. Conf. Mod. Power Syst. MPS 2019*, May 2019, doi: 10.1109/MPS.2019.8759677.
- [50] S. Rodmanee and D. Rerkpreedapong, "Criticality Evaluation of HV Circuit Breakers in Distribution Substations," *2019 IEEE PES GTD Gd. Int. Conf. Expo. Asia, GTD Asia 2019*, pp. 802–807, May 2019, doi: 10.1109/GTDASIA.2019.8715964.
- [51] Y. Lu and Y. Li, "A novel data-driven method for maintenance prioritization of circuit breakers based on the ranking SVM," *Int. J. Electr. Power Energy Syst.*, vol. 129, p. 106779, Jul. 2021, doi: 10.1016/J.IJEPES.2021.106779.
- [52] X. Wei, K. Li, H. Wang, F. Chang, Y. Lu, and L. Sun, "Real-Time Remaining Useful

- Life Prediction for High-Voltage Circuit Breakers Based on the Degradation Model and Data-Driven,” *Proc. - 2021 IEEE Sustain. Power Energy Conf. Energy Transit. Carbon Neutrality, iSPEC 2021*, pp. 3781–3786, 2021, doi: 10.1109/ISPEC53008.2021.9735485.
- [53] J. Li, H. Dong, P. Yang, Y. Shi, and J. Liu, “Research on the Service Life of High-Voltage Vacuum Circuit Breaker of High-speed Train,” *Proc. 2021 IEEE 4th Int. Electr. Energy Conf. CIEEC 2021*, May 2021, doi: 10.1109/CIEEC50170.2021.9510823.
- [54] Y. Deng, Y. Zhang, K. Lin, S. Wei, and G. Cui, “Online Defect Elimination Equipment for High Voltage Isolation Switch Based on Laser Cleaning Technology,” *4th IEEE Int. Conf. Autom. Electron. Electr. Eng. AUTEEE 2021*, pp. 182–186, 2021, doi: 10.1109/AUTEEE52864.2021.9668326.
- [55] A. P. Shishavan and A. A. Razi-Kazemi, “A practical knowledge-based ranking approach to identify critical circuit breakers in large power systems,” *Knowledge-Based Syst.*, vol. 227, p. 107237, Sep. 2021, doi: 10.1016/J.KNOSYS.2021.107237.
- [56] J. Zhang, Y. Wu, Z. Xu, Z. Din, and H. Chen, “Fault diagnosis of high voltage circuit breaker based on multi-sensor information fusion with training weights,” *Measurement*, vol. 192, p. 110894, Mar. 2022, doi: 10.1016/J.MEASUREMENT.2022.110894.
- [57] S. Asefi *et al.*, “Measurement and Operation Based Condition Monitoring Methodology for High Voltage Circuit Breakers,” *IEEE PES Innov. Smart Grid Technol. Conf. Eur.*, vol. 2022-October, 2022, doi: 10.1109/ISGT-EUROPE54678.2022.9960521.
- [58] A. C. De Oliveira *et al.*, “Application of Bioinspired Antennas in the Monitoring of High Voltage Circuit Breakers,” *IEEE Trans. Power Deliv.*, vol. 37, no. 5, pp. 4418–4426, Oct. 2022, doi: 10.1109/TPWRD.2022.3170309.
- [59] I. Diahovchenko, P. Korzh, and M. Kolcun, “A fuzzy-logic-based method for maintenance prioritization of high-voltage SF6 circuit breakers, considering uneven wear,” *Results Eng.*, vol. 16, p. 100788, Dec. 2022, doi: 10.1016/J.RINENG.2022.100788.
- [60] X. Zheng, J. Li, Q. Yang, C. Li, and S. Kuang, “Prediction method of mechanical state of high-voltage circuit breakers based on LSTM-SVM,” *Electr. Power Syst.*

- Res., vol. 218, p. 109224, May 2023, doi: 10.1016/J.EPSR.2023.109224.
- [61] F. E. Bezerra, S. G. Di Santo, and G. M. Junior, "An approach based on wavelets and machine learning to build a prediction model for SF6 filling pressure of high-voltage circuit breakers," *Electr. Power Syst. Res.*, vol. 216, p. 108974, Mar. 2023, doi: 10.1016/J.EPSR.2022.108974.
- [62] S. Ouyang, Y. Huang, and M. Yang, "Reliability modeling of multi-terminal DC circuit breaker and its impact on multi-terminal DC distribution network," *Int. J. Electr. Power Energy Syst.*, vol. 147, p. 108888, May 2023, doi: 10.1016/J.IJEPES.2022.108888.
- [63] K. Obarcanin, D. Skulj, and B. Lacevic, "Condition Assessment of Power Circuit Breakers Based on Machine Learning Algorithms," *IEEE Trans. Power Deliv.*, vol. 38, no. 4, pp. 2596–2606, Aug. 2023, doi: 10.1109/TPWRD.2023.3248157.
- [64] W. Li *et al.*, "Incremental Multivariate State Estimation Technique-Based Fault Estimation Method for Motor-driven High-Voltage Circuit Breakers," *Proc. - 2023 IEEE 10th Int. Conf. Cyber Secur. Cloud Comput. 2023 IEEE 9th Int. Conf. Edge Comput. Scalable Cloud, CSCloud-EdgeCom 2023*, pp. 311–317, 2023, doi: 10.1109/CSCLOUD-EDGECom58631.2023.00060.
- [65] X. Su, M. Liu, H. Liao, and J. Qiu, "Design of Distributed Detection System for High Voltage Intelligent Breaker Secondary System Based on Dynamic Closed Loop," *2023 Int. Conf. Adv. Power Syst. Autom. Prot. APAP 2023*, pp. 366–370, 2023, doi: 10.1109/APAP59666.2023.10348467.
- [66] S. Asefi, J. Kilter, and M. Landsberg, "Incorporating Service Type in Aging Failure Model of High Voltage Circuit Breaker," *Proc. 2023 27th Int. Conf. Electron. Electron. 2023*, 2023, doi: 10.1109/IEEECONF58372.2023.10177602.
- [67] Q. Yang and Y. Liao, "A novel mechanical fault diagnosis for high-voltage circuit breakers with zero-shot learning," *Expert Syst. Appl.*, vol. 245, p. 123133, Jul. 2024, doi: 10.1016/J.ESWA.2023.123133.
- [68] X. Zhang, Q. Li, W. Ruan, H. Ma, Y. Chen, and P. Han, "Research on Evaluation Method of AC Filter Circuit Breaker Based on Fuzzy Hierarchy Method," *2023 IEEE 7th Conf. Energy Internet Energy Syst. Integr. EI2 2023*, pp. 1110–1114, 2023, doi: 10.1109/EI259745.2023.10513278.
- [69] Y. Zhou, Z. Ma, H. Chen, and R. Wang, "Analysis of multiple-faults of high-voltage

circuit breakers based on non-negative matrix decomposition,” *Glob. Energy Interconnect.*, vol. 7, no. 2, pp. 179–189, Apr. 2024, doi: 10.1016/J.GLOEI.2024.04.006.

- [70] J. Xiaoyuan *et al.*, “An Analytical Study of a Tripping by Three-phase Inconsistent Fault in 220kV GIS Circuit Breaker,” *Proc. - 2023 5th Int. Conf. Electr. Eng. Control Technol. CEECT 2023*, pp. 396–400, 2023, doi: 10.1109/CEECT59667.2023.10420734.