



Desarrollo de un modelo homologado para determinar la criticidad de los interruptores de potencia en subestaciones convencionales.

Yster Santiago Herrera Herrera

Artículo de investigación presentado para optar al título de Especialista en Gerencia de Mantenimiento

Asesor

Noe Alejandro Mesa Quintero, Magíster (MSc) en Ingeniería

Universidad de Antioquia
Facultad de Ingeniería
Especialización en Gerencia de Mantenimiento
Medellín, Antioquia, Colombia
2024

Cita	Yster Santiago Herrera Herrera
Referencia Estilo IEEE (2020)	Y. S. Herrera Herrera, “Desarrollo de un modelo homologado para determinar la criticidad de los interruptores de potencia en subestaciones convencionales.”, Trabajo de grado especialización, Especialización en Gerencia de Mantenimiento, Universidad de Antioquia, Medellín, Antioquia, Colombia, 2024.



Especialización en Gerencia de Mantenimiento, Cohorte XVIII.



Centro de Documentación de Ingeniería (CENDOI)

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

Universidad de Antioquia - www.udea.edu.co

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

Dedicatoria

A mis queridos padres, Yster y Yaneth, con amor y profunda gratitud, dedico este trabajo a ustedes. Su amor incondicional, apoyo inquebrantable y sabios consejos han sido mi roca en el camino hacia el crecimiento profesional y personal. Gracias a su constante aliento y sacrificio, he podido alcanzar este logro como ser humano y profesional. Su ejemplo de dedicación y perseverancia siempre me inspira a dar lo mejor de mí.

Agradecimientos

Quiero expresar mi sincero agradecimiento a todas las personas que han sido parte de mi camino profesional y personal. Sus enseñanzas, apoyo y amistad han sido fundamentales en mi desarrollo. En especial, quiero dedicar unas palabras de gratitud a Ana Isabel. Su amor incondicional, comprensión y aliento constante han sido fuente de fortaleza y motivación. Gracias por estar a mi lado, compartiendo cada desafío y celebrando cada logro.

TABLA DE CONTENIDO

RESUMEN.....	8
ABSTRACT.....	9
I. INTRODUCCIÓN.....	10
II. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA.....	11
A. Reducción de tiempos.....	11
B. Reducción de costos.....	11
C. Actualización del dato.....	12
III. JUSTIFICACIÓN.....	13
IV. OBJETIVOS.....	15
VI. MARCO TEÓRICO.....	16
VII. METODOLOGÍA.....	21
A. Probabilidad de falla.....	21
B. Consecuencia calidad.....	24
C. Consecuencia personas.....	25
D. Consecuencia ambiental.....	27
E. Consecuencia financiera.....	31
F. Cálculo de criticidad.....	33
VIII RESULTADOS.....	37
IX. CONCLUSIONES.....	38
REFERENCIAS.....	39

LISTA DE TABLAS

TABLA I TIEMPO PROMEDIO EMPLEADO PARA HACER UN ANÁLISIS DE CRITICIDAD.....	11
TABLA II COSTO PROMEDIO DE UN ANÁLISIS DE CRITICIDAD. [3]	12
TABLA III GUÍA DE NIVELES DE CONSECUENCIA PARA CADA IMPACTO. ADAPTADO DE [1].....	19
TABLA IV PRIORIDADES PARA DETERMINAR EL TIEMPO ENTRE FALLA DEL ACTIVO.....	22
TABLA V CLASIFICACIÓN DE LA PROBABILIDAD.....	23
TABLA VI ACCIÓN REMEDIAL EN CASO DE UNA CONTINGENCIA CON UN INTERRUPTOR	24
TABLA VII MÁXIMAS HORAS ANUALES PERMITIDAS EN EL STR POR LA CREG [4].	25
TABLA VIII MÁXIMAS HORAS ANUALES PERMITIDAS EN EL STN POR LA CREG [4].	25
TABLA IX CLASIFICACIÓN DE CONSECUENCIA PARA EL IMPACTO CALIDAD.	25
TABLA X RESULTADOS DE ANÁLISIS DE CRITICIDAD MANUALES PARA LOS INTERRUPTORES DE POTENCIA DIFERENCIADO POR TENSIÓN DE OPERACIÓN.....	26
TABLA XI RESULTADOS DE ANÁLISIS DE CRITICIDAD MANUALES PARA LOS INTERRUPTORES DE POTENCIA DIFERENCIADO POR DISPOSICIÓN.	26
TABLA XII RESULTADOS DE ANÁLISIS DE CRITICIDAD MANUALES PARA LOS INTERRUPTORES DE POTENCIA DIFERENCIADO POR ELEMENTO EXTINTOR DE ARCO.....	26
TABLA XIII CLASIFICACIÓN DE CONSECUENCIA PARA EL IMPACTO PERSONAS...	27
TABLA XIV CLASIFICACIÓN DE CONSECUENCIA PARA EL IMPACTO CALIDAD.	29
TABLA XV CLASIFICACIÓN DE CONSECUENCIA PARA EL IMPACTO AMBIENTAL.	30
TABLA XVI ÍNDICE DE PRECIOS INTERRUPTORES [13].	32
TABLA XVII CLASIFICACIÓN DE CONSECUENCIA PARA EL IMPACTO FINANCIERO.	33

TABLA XVIII ESTIMACIÓN DE REDUCCIÓN DE COSTOS Y TIEMPO CON UN ANÁLISIS DE CRITICIDAD HOMOLOGADO.37

LISTA DE FIGURAS

Fig. 1. Proceso de criticidad adaptado de la Norzok Z-008.....	10
Fig. 2. Matriz de criticidad. Adaptado de [8]	17
Fig. 3. Uptime y Downtime para MTTF.	21
Fig. 4. Cantidad de interruptores por medio extintor de arco.	28
Fig. 5. Distribución de los kilogramos de SF ₆ en interruptores de potencia por nivel de tensión.	29
Fig. 6. Explosión de interruptor de potencia de media tensión.	31
Fig. 7. Cantidad de activos por nivel de criticidad.....	34
Fig. 8. Resultados por impacto de una muestra de interruptores.	35

RESUMEN

Este documento aborda el desarrollo de un modelo que emplea criterios estandarizados para evaluar la criticidad de los interruptores de potencia en una subestación de energía convencional. La metodología propuesta se basa en la norma o estándar Norzok Z-008. Este enfoque combina la información de estudios previos, datos proporcionados por una empresa del sector de la energía y la pericia de expertos en el campo. El propósito fundamental es respaldar la calificación de criticidad con una base sólida de datos y que para futuros activos el dato de criticidad se pueda calcular de manera automática.

***Palabras clave* — Criticidad, interruptores de potencia, gestión de activos, mantenimiento.**

ABSTRACT

This document addresses the development of a model that employs standardized criteria to evaluate the criticality of power circuit breaker in a conventional power substation. The proposed methodology is based on the Norzok Z-008 standard. This approach combines information from previous studies, data provided by an energy sector company, and the expertise of field experts. The main purpose is to support criticality qualification with a solid database and to enable automatic calculation of criticality data for future assets.

***Keywords* — criticality, power circuit breaker, asset management, maintenance.**

I. INTRODUCCIÓN

La norma Norzok Z-008 establece una base para un adecuado programa de mantenimiento, debido a que proporciona un proceso eficiente basado en el análisis de costo, riesgo y beneficio.

Esta norma propone un análisis de criticidad basado en consecuencia y probabilidad, analizadas en los impactos salud de las personas, ambiente, calidad y financiero [1].

La primera actividad para realizar un análisis de criticidad siguiendo los parámetros establecidos por la norma es seleccionar los activos a analizar, luego se debe recolectar información técnica del activo como lo es: función, redundancia, subfunción, especificaciones del activo, condiciones operativas, modo de falla crítico (que es aquella que genera el cese inmediato de la capacidad de realizar la función requerida y debe entenderse como la que puede generar el mayor impacto a la organización) [2]. Paso seguido se realizará un análisis de los efectos de la falla, tiempos de indisponibilidad generado, tiempo medio de ocurrencia de la falla analizada y consecuencias en los impactos definidos. La Figura 1 resume el proceso de criticidad.

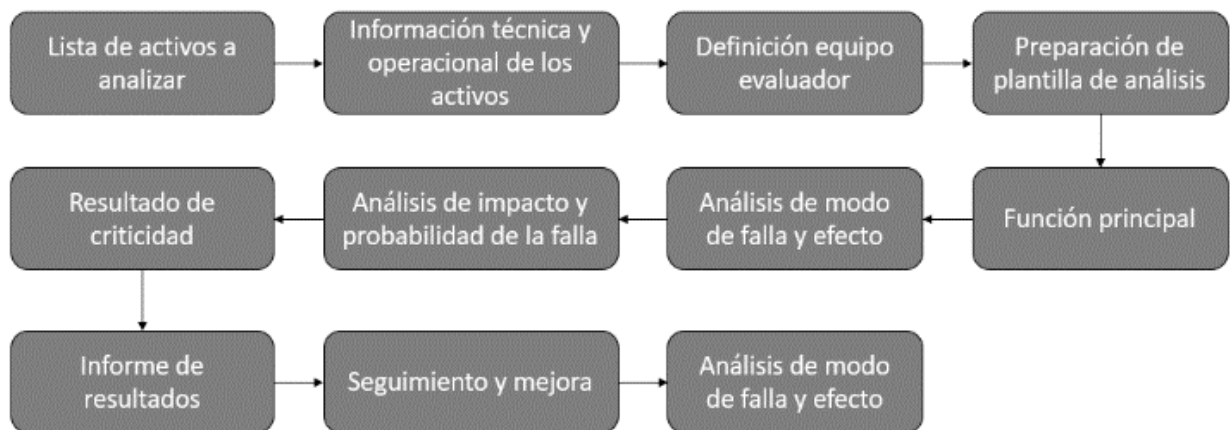


Fig. 1. Proceso de criticidad adaptado de la Norma Norzok Z-008.

A lo largo de esta investigación se van a proponer criterios homologados para los interruptores de potencia de manera que pueda realizarse el análisis de criticidad de manera más eficiente con el objetivo de reducir costos, tiempo y facilidad en la actualización del dato.

II. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

Realizar el proceso de análisis de criticidad siguiendo la norma Norzok Z-008 toma una gran cantidad de tiempo cuando se hace de forma manual, es decir, se prepara una plantilla de Excel con una casilla para cada una de la información necesaria para el ejercicio y que se va llenando por el equipo evaluador que son los ingenieros de mantenimiento, planeación y cualquier otro personal de conocimiento específico que pueda aportar al ejercicio, por ende, este proceso tiene algunas oportunidades de mejora:

A. Reducción de tiempos

Este proceso toma bastante tiempo, debido a la necesidad de programar sesiones de trabajo con el equipo evaluador, estas sesiones pueden durar de 2 a 4 horas semanales y se pueden extender durante meses [3]. Teniendo en cuenta algunos análisis de criticidad realizados previamente para centralizados (Tabla I), se estima entonces que cada estudio tarda alrededor de 43 horas en promedio, pero depende de la cantidad de activos que se estén analizando.

TABLA I
TIEMPO PROMEDIO EMPLEADO PARA HACER UN ANÁLISIS DE CRITICIDAD.

Instalación	Cantidad de activos	Tiempo [h]
Subestación de energía A	270	33
Subestación de energía B	489	45
Subestación de energía C	406	34
Subestación de energía D	414	36
Subestación de energía E	264	30
Subestación de energía F	230	44
Subestación de energía G	1298	79

B. Reducción de costos

Este proceso toma bastante tiempo, debido a la necesidad de programar sesiones de trabajo con el equipo evaluador, estas sesiones pueden durar de 2 a 4 horas semanales y se pueden extender

durante meses [3]. Teniendo en cuenta algunos análisis de criticidad realizados previamente para centralizados (Tabla I), se estima entonces que cada estudio tarda alrededor de 43 horas en promedio, pero depende de la cantidad de activos que se estén analizando.

TABLA II
COSTO PROMEDIO DE UN ANÁLISIS DE CRITICIDAD. [3]

Instalación	\$ 4.656.719
Activo	\$ 22.745

C. Actualización del dato

En Colombia desde el 2014 y por exigencia regulatoria las empresas de transmisión y distribución de energía deben certificarse en ISO 55001 [4], la cual en uno de sus deberes especifica “La organización debe planificar: acciones para tratar esos riesgos y oportunidades, considerando cómo los riesgos y las oportunidades pueden cambiar a lo largo del tiempo” [5]. Basados en esto es necesario inicialmente tener el dato de criticidad para cada uno de los activos a los que se les realiza gestión con el objetivo de identificar sus riesgos, además, el dato debe ser actualizado pues como especifica la ISO55001 en su ítem 6.1 es necesario identificar como cambian en el tiempo.

Analizando los tres puntos planteados anteriormente, se identifica que pueden realizarse mejoras en estos 3 ítems de manera que disminuya el tiempo empleado para hacer el análisis de criticidad, los costos que esto conlleva y la actualización que exige la normatividad, buscando ser más efectivos y de esta forma los planes de mantenimiento aprovechen la información de criticidad, que es esencial para evaluar el potencial impacto de un fallo del activo en la organización y, en consecuencia, para desarrollar un plan de mantenimiento más efectivo para aquellos activos de alta criticidad.

III. JUSTIFICACIÓN

En el contexto de las subestaciones convencionales, comprender la criticidad de los interruptores de potencia es de vital importancia por varias razones fundamentales. En primer lugar, estos dispositivos son componentes críticos en el sistema eléctrico, siendo responsables de controlar y proteger el flujo de energía. Por lo tanto, comprender su criticidad ayuda a garantizar la fiabilidad y disponibilidad del suministro eléctrico, lo que es crucial para mantener las operaciones comerciales en funcionamiento.

La norma Norzok Z-008 proporciona un marco sólido para establecer programas de mantenimiento adecuados, asegurando así la integridad y confiabilidad de los equipos. Su relevancia radica en que establece directrices claras y específicas para el mantenimiento de equipos críticos, como los interruptores de potencia, lo que contribuye a reducir el riesgo de fallas y accidentes.

La criticidad de los interruptores de potencia puede tener un impacto significativo en varios aspectos de una organización. En términos de seguridad, una falla en estos dispositivos podría resultar en riesgos para el personal y el público en general. Además, los impactos ambientales derivados de una falla pueden ser graves, especialmente si se produce un derrame de aceite u otros contaminantes. Desde el punto de vista financiero, las interrupciones en el suministro eléctrico pueden tener costos operativos y pérdidas económicas significativas.

Optimizar los procesos de análisis de criticidad es esencial para reducir tiempos y costos, así como para facilitar la actualización de datos, en línea con las exigencias regulatorias como la norma ISO 55001. Esto garantiza que las organizaciones puedan mantener sus programas de mantenimiento al día y cumplir con los estándares de calidad y seguridad.

Es fundamental priorizar la gestión de activos en función de su criticidad para garantizar la sostenibilidad y eficiencia de las operaciones. Al enfocar los recursos y esfuerzos en los activos más críticos, las organizaciones pueden maximizar su rendimiento y minimizar el riesgo de fallas catastróficas.

Finalmente, contar con modelos homologados que permitan evaluar la criticidad de manera eficiente y automática es crucial para mejorar la toma de decisiones estratégicas en mantenimiento y gestión de activos. Estos modelos proporcionan una base sólida para la identificación y priorización de acciones correctivas y preventivas, lo que contribuye a la mejora continua de los procesos y la optimización del rendimiento del sistema eléctrico.

IV. OBJETIVOS

A. Objetivo general

El objetivo general de esta investigación es desarrollar un modelo homologado para determinar la criticidad de los interruptores de potencia en subestaciones convencionales, basado en la norma Norzok Z-008, con el fin de optimizar la gestión de activos y el mantenimiento en el sector de la energía.

B. Objetivos específicos

- Aplicar la metodología propuesta por la norma Norzok Z-008 para realizar un análisis de criticidad basado en consecuencia y probabilidad de falla.
- Evaluar los impactos en la salud de las personas, el ambiente, la calidad y los aspectos financieros de la organización en caso de falla de los interruptores de potencia.
- Establecer criterios homologados para la calificación de criticidad de los interruptores de potencia, considerando la probabilidad de falla y las consecuencias asociadas.
- Validar el modelo desarrollado mediante la evaluación de 1,629 interruptores de potencia en subestaciones convencionales, identificando los activos críticos que requieren atención inmediata.

VI. MARCO TEÓRICO

Con un mundo en continua evolución debido a la incorporación permanente de actores geopolíticos, amenazas relacionadas con desastres ambientales por el cambio climático o virus como el covid 19, obligan a las empresas a modificar sus proyecciones financieras de ingresos y por lo tanto ajustar sus gastos, para que guarden concordancia con estos y asegurar la sostenibilidad, lo que implica tomar decisiones constantemente.

Este tipo de situaciones generan cambios en la planeación, lo que obliga a priorizar las gestiones en los activos, como su modernización, repotenciación y reposición. Debemos entonces elegir unos activos, pero renunciar a trabajar en otros, para soportar esta importante decisión es fundamental conocer las consecuencias que generan los activos al fallar y que tan probable es que estos activos fallen. Es decir, llevar el cálculo del riesgo a nivel de activo, esto es la criticidad.

Existen diferentes metodologías para realizar análisis de criticidad; cada una busca el mismo objetivo que es priorizar entre sistemas, equipos o componentes. Algunas de las metodologías que existen y que tienen una amplia aceptación en la industria son [6]:

- **El método Ciliberti:** este método incluye un análisis de riesgo para la seguridad de los procesos y otro para determinar el impacto en la producción. Estos dos análisis se unen en una matriz global que entrega la criticidad del elemento analizado. Es un método muy completo que tiene en cuenta la seguridad, higiene y ambiente (SHA) y producción separadamente para luego unir los resultados [6].
- **El Mantenimiento Basado en Criticidad (CBM):** esta estrategia busca priorizar las actividades de mantenimiento en relación con el impacto que puede generar el evento de falla a las finanzas considerando la integridad mecánica y la regulación que se debe seguir [7].
- **El estándar Norsok Z-008:** proporciona un proceso eficiente basado en el análisis de costo, riesgo y beneficio. Esta norma propone un análisis de criticidad basado en consecuencia y probabilidad, analizadas en los impactos salud de las personas, ambiente, calidad y financiero [1]. Este estándar fue creado para plantas de petróleo y gas, pero puede adaptarse a las necesidades de cualquier industria.

La metodología Ciliberti, Mantenimiento Basado en Criticidad y la Norma Norsok Z-008 permite estimar de una manera adecuada la criticidad de cualquier tipo de activo.

La criticidad puede definirse principalmente a partir de dos variables: la probabilidad y la consecuencia. Se busca determinar el nivel de criticidad basándose en la probabilidad de que ocurra un evento y el grado de afectación que dicho evento de falla podría generar. Matemáticamente, la criticidad se puede expresar por la ecuación 1.

$$CRITICIDAD = CONSECUENCIA \times PROBABILIDAD \quad (1)$$

El equipo de trabajo debe definir los intervalos y la escala para calificar las consecuencia y probabilidad de falla de los activos, utilizando la matriz presentada en la Figura 2.

PROBABILIDAD		CONSECUENCIA				
		Mínima	Menor	Moderada	Mayor	Máxima
		10	20	30	40	50
Muy alta	4	40	80	120	160	200
Alta	3	30	60	90	120	150
Media	2	20	40	60	80	100
Baja	1	10	20	30	40	50

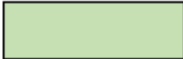


NC		SC		C	
----	---	----	--	---	---

Fig. 2. Matriz de criticidad. Adaptado de [8]

Como se observa en la Figura 2, los niveles de criticidad que puede tener un activo son NC: No crítico, SC: Semi-crítico y C: Crítico. Un aspecto importante para destacar de esta propuesta es que la escala de consecuencia es mayor que la de probabilidad. Esto se analiza debido a que un activo que genere una consecuencia máxima, pero tenga una probabilidad baja ya es señal de que tiene un nivel semi-crítico y requiere atención. Un buen ejemplo de estos casos es una represa en una central hidráulica. Por otro lado, los activos que tienen una probabilidad muy alta de falla, pero una consecuencia mínima se puede considerar como no críticos. Un claro ejemplo de esto puede ser un fusible cuyo fallo no afecte significativamente los impactos.

La Norzok Z-008 propone algunos impactos para analizar las posibles consecuencias si se materializa un evento de falla, y son las siguientes:

Calidad o producción: todas las organizaciones tienen compromisos con los grupos de interés, y en este sentido, es importante buscar conservar esos compromisos pactados. Un ejemplo de ello es la regulación CREG 015, la cual deben seguir los negocios de transmisión y distribución en Colombia.

Salud de las personas: el compromiso con la seguridad de las personas es indiscutible. En esos casos, no se deben tolerar muertes en el desarrollo del objeto social de la empresa.

Medio Ambiente: con el crecimiento actual en la conservación ambiental, no es aceptable permitir impactos irreparables en el medio ambiente como resultado de una falla en el proceso productivo de la empresa.

Financiero: todas las organizaciones, excepto aquellas sin ánimo de lucro, buscan alcanzar un propósito estratégico de generación de valor, velando por la estabilidad financiera de la empresa.

Para cada uno de los impactos se propone hacer un análisis de criticidad, es decir se van a determinar las posibles consecuencias que generaría un evento de falla crítico en el activo y se determina la probabilidad de que ocurra el evento de falla. Para el evento de falla se debe seleccionar aquel que afecta completamente la función principal del activo y el que genere las consecuencias más relevantes, con el objetivo de analizar el potencial de afectación que tiene el activo para la empresa.

Siguiendo lo mencionado anteriormente, se obtendrán cuatro datos de criticidad, uno para cada impacto. Por lo tanto, el valor de criticidad que se asigna al activo debería ser el valor máximo entre ellos. Esto se debe a que todos tienen el mismo nivel de importancia.

Es requerido definir unas escalas de calificación para las consecuencias. Estas deben hacerse de acuerdo con criterios de seguridad global, medio ambiente, y que reflejen la afectación a la planta cuando se trata de la consecuencia financiera [1]. Las escalas presentadas en la tabla 3, se deducen de la propuesta hecha por el estándar Norzok Z-008, ajustando la escala para 5 niveles. Estos niveles son una simple guía y cada organización puede definir los propios según el nivel de tolerancia al riesgo que tenga.

TABLA III
GUÍA DE NIVELES DE CONSECUENCIA PARA CADA IMPACTO. ADAPTADO DE [1]

Consecuencia	Calidad	Seguridad de las personas	Medio ambiente	Financiero
Máxima	Afectación completa a la disponibilidad establecida por la organización o exigida por un ente regulador (especificar límite máximo aceptado).	El evento puede generar la muerte de una persona.	Afectación irreparable para el medio ambiente.	Costo máximo para la empresa (especificar costo).
Mayor	Afectación mayor a la disponibilidad establecida por la organización o exigida por un ente regulador (especificar límites).	El evento puede generar graves lesiones a las personas.	Afectaciones que requieran un tiempo considerable para su reparación.	Costo mayor para la empresa (especificar límites de costo).
Moderada	Afectación moderada a la disponibilidad establecida por la organización o exigida por un ente regulador (especificar límites).	El evento puede generar lesiones que requieren tratamiento médico.	Afectaciones moderadas al entorno.	Costo moderado para la empresa (especificar límites de costo).
Menor	Afectación menor a la disponibilidad establecida por la organización o exigida por un ente regulador (especificar límites)	Accidentes e incidentes menores.	Accidentes e incidentes menores.	Costo menor para la empresa (especificar límites de costo).
Mínima	Ninguna afectación a la disponibilidad.	No hay posibilidad de lesiones.	No hay ninguna afectación al medio ambiente.	Costo insignificante.

Otro paso importante en la metodología consiste en identificar las señales que entregan los activos y el sistema, para lograr plasmar con datos las potenciales consecuencias que se presentarían ante la falla de los activos en cada uno de los objetos de impacto, esto significa que

no se trata de una calificación directa y cualitativa, por el contrario, se combinan diversos datos obtenidos de los sistemas de información para lograr un resultado cuantitativo.

El procedimiento descrito se realiza para cada objeto de impacto tanto para la variable de consecuencia como probabilidad, de esta forma analizamos los activos dentro del sistema de transmisión y distribución de energía y también las instalaciones inmersas en este. Así se obtiene un panorama detallado de los activos e instalaciones que al fallar impactan en mayor medida los logros de la organización, lo que permite tener una priorización de estos y por lo tanto generar una gestión de mayor cuidado a lo largo de su vida útil.

VII. METODOLOGÍA

Para cualquier sistema eléctrico de potencia es de vital importancia mantener la continuidad, para ellos uno de los activos que asegura el correcto funcionamiento son los interruptores de potencia los cuales se encargan de a dar apertura y cierre a un circuito, con la capacidad de interrumpir corrientes para las que fue diseñado, rápidamente y en cualquier instante, sin producir sobretensiones peligrosas que puedan afectar al sistema o en caso de trabajar en estado normalmente abierto debe ser capaz de cerrar bajo corrientes de falla sin sufrir daño en sus contactos [9].

A. Probabilidad de falla.

Para determinar la probabilidad del evento de falla se hará uso del concepto del tiempo medio para la falla (MTTF), usando el tiempo registrado en las ordenes de trabajo asociadas al modo de falla crítico.

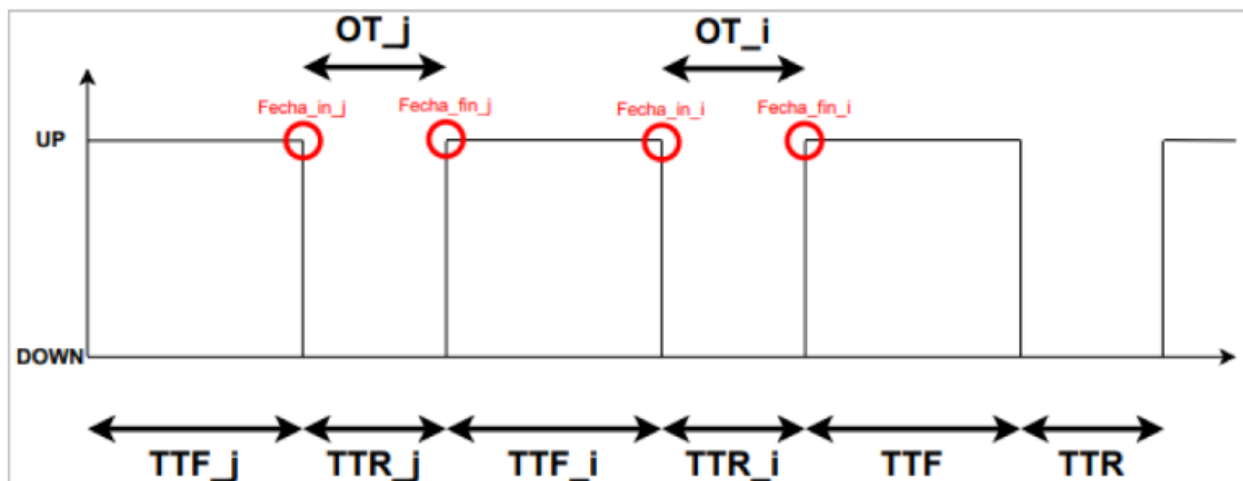


Fig. 3. Uptime y Downtime para MTTF.

El MTTF se calcula como el promedio de los TTF de cada OT, dicho de otro modo, el promedio de los Uptime. Además, como se observa en la Tabla 4, es importante conocer y ser capaces de extraer de la orden de trabajo las fechas, si se tiene un sistema de información como un EAM, este sería la fuente principal de la información. Es claro que no en todos los escenarios las

ordenes de trabajo son diligenciadas de una manera eficiente, por tal motivo es posible tomar información basados en la siguiente tabla de priorización:

TABLA IV
PRIORIDADES PARA DETERMINAR EL TIEMPO ENTRE FALLA DEL ACTIVO

	Descripción	Variables
1	Fecha de falla OT	Promedio de tiempos de operación de los tipos de activos hasta que ocurre la falla.
2	Históricos de criticidad	17 años
3	Información de literatura	18,59 años

La fecha de duración según los históricos de criticidad se tomó de los análisis de criticidad previos, donde se evaluaron 277 interruptores de potencia y que se realizaron con personal experto de mantenimiento, operaciones y planeación.

La duración promedio según la literatura, se tomó de estudios donde se analizaron modos de falla en partes vivas y aislamiento, mecanismo de operación y circuito de control para 486 interruptores de potencia [10], cualquiera de estos considerado falla crítica, y otro donde se analizaron 607 interruptores de potencia de las subestaciones de energía de alta tensión [11].

Los valores mencionados anteriormente deben ser evaluados en una tabla con el objetivo de asignarles un nivel de probabilidad. Esta probabilidad se define en función de la tolerancia al riesgo, la expectativa de vida útil operativa o financiera e incluso la confiabilidad esperada. Para este ejercicio, se seguirá lo establecido en la siguiente tabla, la cual está alineada con la vida útil regulatoria que debe cumplir el activo.

TABLA V
CLASIFICACIÓN DE LA PROBABILIDAD

Probabilidad	Clasificación	Descripción	Probabilidad de ocurrencia en la vida útil del activo
4	Muy alta	Es probable que ocurra muchas veces	Mayor al 85%
3	Alta	Es probable que ocurra muchas veces	60.1% - 85%
2	Media	Es probable que ocurra algunas veces	20.1% - 60%
1	Baja	Baja probabilidad de ocurrencia	Menor al 20%

B. Consecuencia calidad.

La ocurrencia de una falla crítica en los interruptores de potencia demandará una acción inmediata para reemplazar el activo. En el sector eléctrico colombiano, las empresas tienen planes de contingencia establecidos para tales situaciones. Esto se debe a que reconocen la importancia de los interruptores de potencia para el sistema eléctrico, así como a las exigencias regulatorias que les obligan a restablecer el servicio sin demora. En este contexto, se procedió a revisar los planes de restablecimiento de una empresa del sector, encontrando los tiempos registrados en la siguiente tabla.

TABLA VI
ACCIÓN REMEDIAL EN CASO DE UNA CONTINGENCIA CON UN INTERRUPTOR

Interruptor	Descripción de la acción
Falla de un interruptor de 13.2 kV	Cambio de interruptor por uno de los disponibles. Tiempo estimado para el cambio: 1 hora
Falla de un interruptor de 44 kV	Revisar y analizar la falla revisar y en caso de ser necesario instalar uno de repuesto o bahía móvil disponible. Tiempo estimado para el cambio: 72 horas
Falla de un interruptor de 115 kV	Revisar y analizar la falla revisar y en caso de ser necesario instalar uno de repuesto o bahía móvil disponible. Tiempo estimado para el cambio: 72 horas
Falla de un interruptor de 230 kV	Revisar y analizar la falla revisar y en caso de ser necesario instalar uno de repuesto o bahía móvil disponible. Tiempo estimado para el cambio: 72 horas

Para ubicar estos valores en la matriz y califica la consecuencia del impacto a la calidad se puede hacer siguiendo lo establecido en la regulación la cual menciona: “Calidad del servicio de distribución. La calidad del servicio del STR se determinará a partir de la información recolectada por el CND sobre la duración de las indisponibilidades de los activos de cada STR.” [4].

TABLA VII
MÁXIMAS HORAS ANUALES PERMITIDAS EN EL STR POR LA CREG [4].

Grupo de activos	MHAI
Conexión del OR al STN	65
Equipo de Compensación	18
Línea del STR	38
Barrajes sin bahías de maniobra	15
Barrajes con bahías de maniobra	30

TABLA VIII
MÁXIMAS HORAS ANUALES PERMITIDAS EN EL STN POR LA CREG [4].

Grupo de activos	MHAI
Conexión al STN	51
Equipos de Compensación	31
Línea Nivel de Tensión 4	38
Módulo de Barraje	15

Basados en las tablas presentadas anteriormente se pueden definir la clasificación de niveles de consecuencia que generaría la indisponibilidad del activo.

TABLA IX
CLASIFICACIÓN DE CONSECUENCIA PARA EL IMPACTO CALIDAD.

Consecuencia	Clasificación	Tipo de interruptores
50	Máxima	Interruptores de 44 kV, 115 kV, 230kV o de niveles de tensión mayor.
10	Mínima	Interruptores de 13.2 kV

C. Consecuencia personas.

Para la definición de la consecuencia a personas se analizaron lo descrito en la evaluación base de criticidad para 277 interruptores de potencia de tensiones de operación entre 13.2kV, 44kV, 115kV, 220kV y 500kV. Este análisis se realizó con equipo de mantenimiento, planeación y operación del negocio de transmisión y distribución para una empresa del sector. Del análisis se

logró identificar que las características de nivel de tensión, disposición y elemento extintor de arco son características importantes del activo y con los que se puede clasificar el nivel de consecuencia que generaría la falla crítica analizada que fue falla en partes vivas y aislamiento, mecanismo de operación que genere una explosión del interruptor de potencia.

TABLA X
RESULTADOS DE ANÁLISIS DE CRITICIDAD MANUALES PARA LOS INTERRUPTORES DE POTENCIA DIFERENCIADO POR TENSIÓN DE OPERACIÓN.

Tensión de operación (kV)	Cantidad de activos	El evento puede ocasionar golpes, cortaduras o explosiones que puede ocasionar la muerte de una persona.	Ninguna afectación
220	22	100%	0%
110	53	100%	0%
44	32	100%	0%
13,2	170	18%	82%

TABLA XI
RESULTADOS DE ANÁLISIS DE CRITICIDAD MANUALES PARA LOS INTERRUPTORES DE POTENCIA DIFERENCIADO POR DISPOSICIÓN.

Disposición	Cantidad de activos	El evento puede ocasionar golpes, cortaduras o explosiones que puede ocasionar la muerte de una persona.	Ninguna afectación
BAHIAS	102	100%	0%
CELDAS	169	0%	100%
BARRAJE	6	83%	17%

TABLA XII
RESULTADOS DE ANÁLISIS DE CRITICIDAD MANUALES PARA LOS INTERRUPTORES DE POTENCIA DIFERENCIADO POR ELEMENTO EXTINTOR DE ARCO.

Elemento extintor de arco	Cantidad de activos	El evento puede ocasionar golpes, cortaduras o explosiones que puede ocasionar la muerte de una persona.	Ninguna afectación
ACEITE	41	100%	0%
SF6	170	94%	6%
VACIO	66	0%	100%

Siguiendo lo planteado anteriormente, podemos analizar y clasificar el nivel de consecuencias que la falla de un interruptor de potencia puede ocasionar en las personas, la calificación se puede observar en la tabla XIII. Se evidencia que los interruptores con niveles de operación de 44 kV o superiores son más robustos y poseen una mayor carga energética, lo que puede representar un riesgo potencial de lesiones fatales para las personas. En comparación, los interruptores de 13.2 kV, que se encuentran principalmente en celdas que funcionan como frente muerto y absorber en gran medida la explosión generada en caso de una eventual falla del interruptor.

TABLA XIII
CLASIFICACIÓN DE CONSECUENCIA PARA EL IMPACTO PERSONAS.

Consecuencia	Clasificación	Elemento extintor de arco	Tensión de operación (kV)	Descripción
50	Máxima	SF6, aceite o vacío	110, 220 o más	El evento puede ocasionar golpes o cortaduras que puede generar la muerte de una persona.
40	Mayor	SF6, aceite o vacío	44	El evento puede generar graves lesiones a las personas.
30	Moderada	Aceite	13,2	El evento puede ocasionar golpes o cortaduras que puede ocasionar un daño físico moderado a una persona.
30	Moderada	SF6	13,2	El evento puede ocasionar golpes o cortaduras que puede ocasionar un daño físico moderado a una persona.

D. Consecuencia ambiental.

Para definir el impacto ambiental, la característica más importante en los interruptores de potencia es el medio extintor de arco que utilizan. Del portafolio de activos analizados, se puede observar en la Figura 4 que existen interruptores con SF6, aceite y vacío. Para los dos primeros, la cantidad de fluido dependerá del tamaño. En la Figura 5 se muestra la distribución de los datos de cantidad del SF6 en kilogramos según la tensión de operación del activo y en la tabla XIV el promedio de aceite en kilogramos por nivel de tensión.

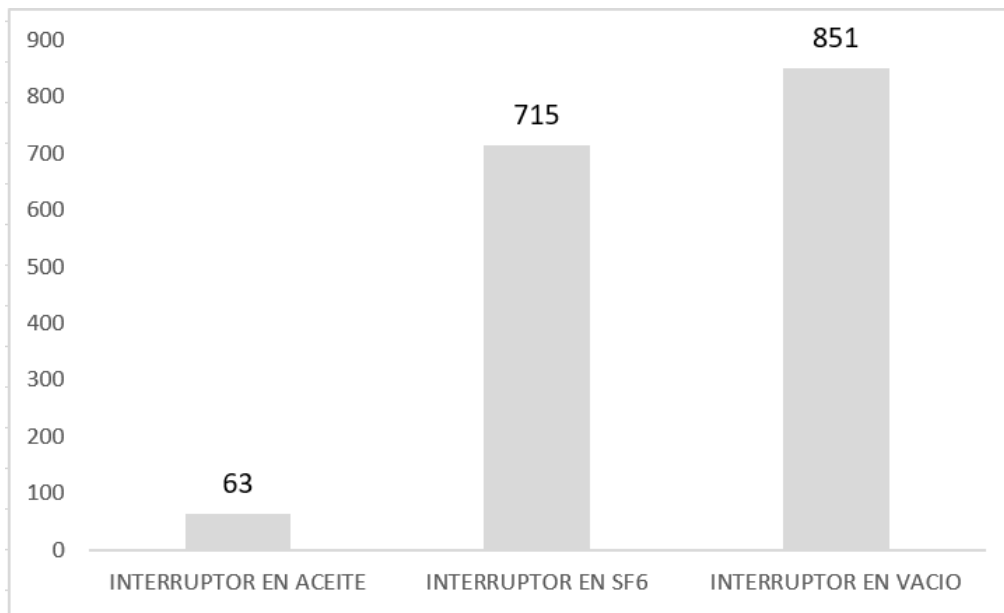


Fig. 4. Cantidad de interruptores por medio extintor de arco.

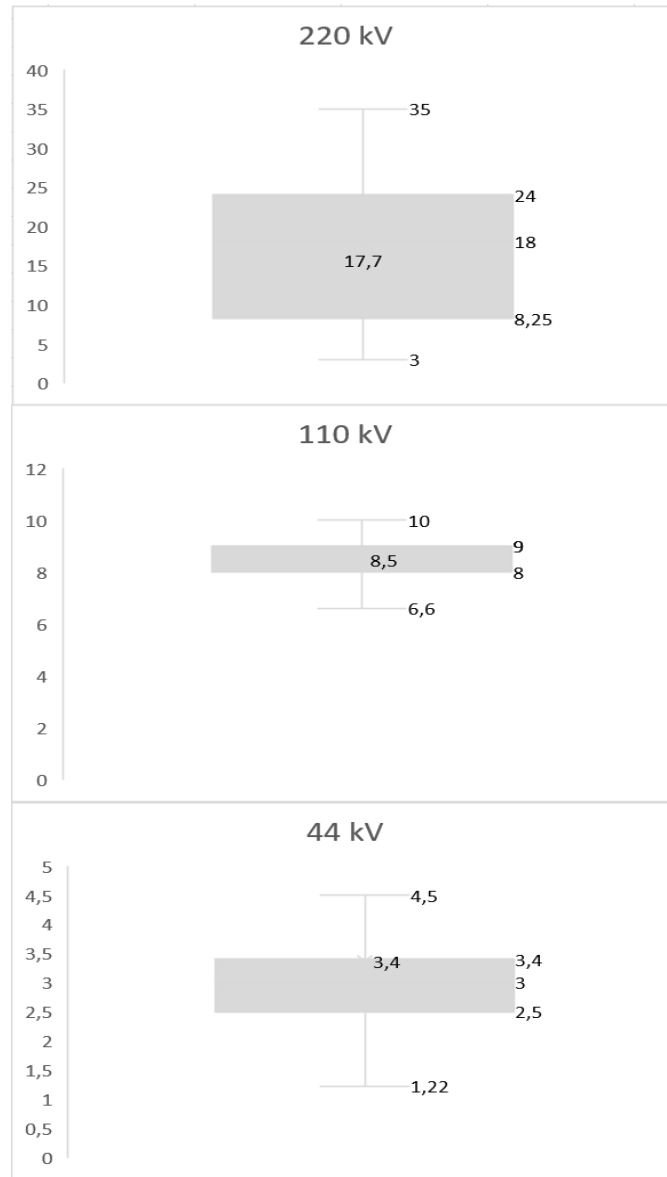


Fig. 5. Distribución de los kilogramos de SF6 en interruptores de potencia por nivel de tensión.

TABLA XIV
CLASIFICACIÓN DE CONSECUENCIA PARA EL IMPACTO CALIDAD.

Tensión de operación (kV)	Promedio de aceite (kg)
13.2	8
44	98
110	153
220	300

El SF6 en Colombia no tiene una regulación ambiental respecto al control de emisiones, por tal motivo una forma de medir el impacto es con los datos máximos emitidos por la organización en un periodo de tiempo que puede ser el último año previo al análisis. El potencial de calentamiento global del SF6 es aproximadamente 23.500 veces mayor que el del dióxido de carbono (CO2) en un período de 100 años [12]. Este valor se ha determinado mediante investigaciones científicas y está respaldado por organismos internacionales como el Panel Intergubernamental sobre Cambio Climático (IPCC) y la Convención Marco de las Naciones Unidas sobre el Cambio Climático (CMNUCC), que han evaluado y documentado el impacto de los diferentes gases de efecto invernadero en el calentamiento global. Haciendo una comparación entre los datos de kilogramos de SF6 que hay en cada interruptor se evidencia que equivalen a menos del 2% de las tCO2 generadas por la organización, por tal motivo ante una eventual falla que genere la fuga total del SF6 no va a impactar en gran medida el indicador y la calificación para los interruptores de SF6 se resume en la Tabla XV.

En el caso de los interruptores con aceite, la situación es similar. La cantidad de aceite contenida en los activos analizados varía y depende de su voltaje, modelo y marca. Para llevar a cabo la calificación correspondiente, siguiendo el instructivo para la atención de eventos ambientales que toma como referencia el libro naranja de las Naciones Unidas, la organización identifica los siguientes niveles de derrame:

- Derrame Grande: Se considera todo vertimiento accidental de líquidos cuya cantidad sea mayor a 200 litros o sólidos en una cantidad mayor a 300 kg.
- Derrame Moderado: Se considera todo vertimiento accidental de líquidos cuya cantidad sea menor a 200 litros o sólidos en una cantidad menor a 300 kg.

En consonancia con las directrices establecidas por la organización, se evalúa el impacto ambiental ante un evento de falla en los interruptores de potencia, como se detalla en la tabla XV.

TABLA XV
CLASIFICACIÓN DE CONSECUENCIA PARA EL IMPACTO AMBIENTAL.

Consecuencia	Calificación	Elemento extintor	Peso elemento extintor de arco de arco
50	Máxima	Aceite	Mayor o igual 300kg
30	Moderado	Aceite	Menor a 300kg
30	Moderado	SF6	Mayor a 18kg
20	Menor	SF6	Mayor a 4,5kg menor a igual a 18kg

E. Consecuencia financiera.

Para la definición del impacto financiero, se va a tener en cuenta la pérdida material del interruptor de potencia debido que ante escenarios de fallas críticas los interruptores tienden a explotar y no tienen forma de ser reparados, si no que se deben reemplazar por otro.



Fig. 6. Explosión de interruptor de potencia de media tensión.

Para determinar la remuneración de las unidades constructivas en la regulación colombiana, la Comisión de Regulación de Energía y Gas (CREG) realizó un análisis de precios de los equipos principales de una subestación de energía, utilizando diversas fuentes de información. Estas incluyeron la valoración de los elementos técnicos y componentes del Factor de Instalación de las Unidades Constructivas. El objetivo era obtener, a través del análisis estadístico de datos, un precio que reflejara de manera precisa su valor en el mercado. Las principales fuentes de información para la conformación de los precios fueron: los precios de las resoluciones vigentes para el año 2014, período en el que se llevó a cabo el estudio, la información de precios proporcionada por los agentes y, por último, referencias de precios internacionales o de fabricantes [13]. Los datos extraídos del estudio se pueden observar en la tabla XVI.

TABLA XVI
ÍNDICE DE PRECIOS INTERRUPTORES [13].

Nivel de tensión	Valor actualizado CREG	Valor de agentes	Valores internacionales	Promedio de valores
500 kV	\$ 824.410.432	\$ 913.687.996	\$ 723.984.762	\$ 820.694.396
230 kV	\$ 183.249.195	\$ 245.036.191	\$ 214.474.933	\$ 214.253.439
220 kV	\$ 86.678.325	\$ 86.797.873	\$ 121.634.244	\$ 98.370.147
44 kV	\$ 63.392.443	\$ 38.735.288	\$ 23.267.659	\$ 41.798.463
13,2 kV	\$ 43.567.588	\$ 52.413.286	\$ 17.091.691	\$ 37.690.855

Con la tabla presentada anteriormente se puede estimar el costo de un interruptor de potencia según el nivel de tensión, para saber el nivel de afectación financiera que va a generar el activo en caso de falla se va a hacer uso de la matriz que el negocio usa para estimar los niveles de afectación

cuando ocurre un evento de falla, estos valores se encuentran representados en la siguiente tabla de calificación.

TABLA XVII
CLASIFICACIÓN DE CONSECUENCIA PARA EL IMPACTO FINANCIERO.

Consecuencia	Calificación	Pérdida económica
50	Máxima	Más de 300 Millones
40	Mayor	Entre 150 y 300 Millones
30	Moderado	Entre 50 y 150 Millones
20	Menor	Entre 15 y 50 Millones
10	Mínima	Menos de 15 Millones

F. Cálculo de criticidad

Para realizar el cálculo de criticidad por cada uno de los impactos es posible conectarse directamente a los sistemas de información y por medio de un BI estandarizar el modelo bajo los criterios descritos anteriormente para cada impacto, para el caso de estudio se hizo uso de QlikSense que fue el BI utilizado para realizar la programación necesaria y consolidación de información para obtener los resultados mostrados en las siguientes figuras.

Cantidad de activos por nivel de criticidad total

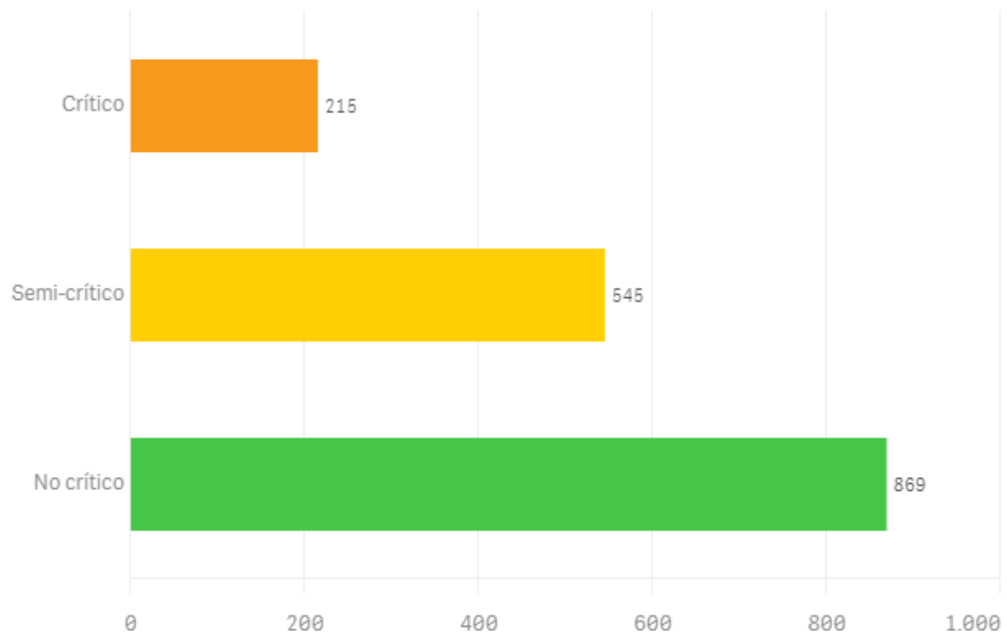


Fig. 7. Cantidad de activos por nivel de criticidad

Activo	Critici... Perso...	Descripción Críticidad Personas	Critici... Calidad	Descripción críticidad Calidad	Critici... Ambie...	Descripción Críticidad Ambiental	Critici... Financ...	Descripción Críticidad Financiero	Critici... Total	Descripción Críticidad Total	Índice de riesgo
INTERRUPTOR, LINEA, 52,0 KV, EDF SK 1-4, 44,0 KV, 40,0 KA, 35	80	Semi-crítico	100	Crítico	20	No crítico	40	No crítico	100	Crítico	240
INTERRUPTOR, 52,0 KV, EDFSK1-1, 44,0 KV, 40,0 KA, 6	80	Semi-crítico	100	Crítico	20	No crítico	40	No crítico	100	Crítico	240
INTERRUPTOR, 145,0 KV, GL312F3, 110,0 KV, 40,0 KA, 53	100	Crítico	100	Crítico	20	No crítico	60	Semi-crítico	100	Crítico	280
INTERRUPTOR, 145,0 KV, GL312F1, 110,0 KV, 10,0 KA, 4	100	Crítico	100	Crítico	20	No crítico	60	Semi-crítico	100	Crítico	280
INTERRUPTOR, LINEA, 72,5 KV, GL 309 F1, 44,0 KV, 40,0 KA, 6	80	Semi-crítico	100	Crítico	40	No crítico	40	No crítico	100	Crítico	260
INTERRUPTOR, LINEA, 145,0 KV, GL 312 F1, 110,0 KV, 40,0 KA, 11, 650,0 KV	100	Crítico	100	Crítico	40	No crítico	60	Semi-crítico	100	Crítico	300
INTERRUPTOR, TRANSFORMADOR, 145,0 KV, LTB 145D1/B, 110,0 KV, 31,5 KA, 6	100	Crítico	100	Crítico	40	No crítico	60	Semi-crítico	100	Crítico	300
INTERRUPTOR, 123,0 KV, LTB123G1, 110,0 KV, 31,5 KA, 6	100	Crítico	100	Crítico	40	No crítico	60	Semi-crítico	100	Crítico	300
INTERRUPTOR, LINEA, 72,5 KV, GL 309 F1, 44,0 KV, 25,0 KA, 18	80	Semi-crítico	100	Crítico	40	No crítico	40	No crítico	100	Crítico	260
INTERRUPTOR, LINEA, 123,0 KV, HLR1232501-E1, 110,0 KV, 25,6 KA, 7	100	Crítico	100	Crítico	60	Semi-crítico	60	Semi-crítico	100	Crítico	320
INTERRUPTOR, 145,0 KV, GL312F3, 110,0 KV, 40,0 KA, 14	100	Crítico	100	Crítico	20	No crítico	60	Semi-crítico	100	Crítico	280
INTERRUPTOR, TRANSFORMADOR, 44,0 KV, HLC 36-52/1250B, 44,0 KV, 25,0 KA, 17	80	Semi-crítico	100	Crítico	60	Semi-crítico	40	No crítico	100	Crítico	280
INTERRUPTOR, 145,0 KV, LTB 145D1/B, 110,0 KV, 31,5 KA, 40	100	Crítico	100	Crítico	40	No crítico	60	Semi-crítico	100	Crítico	300
INTERRUPTOR, LINEA, 245,0 KV, GL314, 220,0 KV, 40,0 KA, 4	100	Crítico	100	Crítico	60	Semi-crítico	80	Semi-crítico	100	Crítico	340
INTERRUPTOR, LINEA, 145,0 KV, GL312F3, 110,0 KV, 40,0 KA, 14	100	Crítico	100	Crítico	20	No crítico	60	Semi-crítico	100	Crítico	280
INTERRUPTOR, LINEA, 72,5 KV, GL 309 F1, 44,0 KV, 40,0 KA, 35	80	Semi-crítico	100	Crítico	40	No crítico	40	No crítico	100	Crítico	260
INTERRUPTOR, LINEA, 123,0 KV, LTB123G1, 110,0 KV, 25,0 KA, 6	100	Crítico	100	Crítico	40	No crítico	60	Semi-crítico	100	Crítico	300
INTERRUPTOR, 72,5 KV, GL 309 F1, 44,0 KV, 40,0 KA, 8	80	Semi-crítico	100	Crítico	40	No crítico	40	No crítico	100	Crítico	260
INTERRUPTOR, 72,5 KV, GL 309F1, 44,0 KV, 40,0 KA, 5	80	Semi-crítico	100	Crítico	40	No crítico	40	No crítico	100	Crítico	260
INTERRUPTOR, 145,0 KV, 3AP1FG, 110,0 KV, 40,0 KA, 21, 650,0 KV	100	Crítico	100	Crítico	40	No crítico	60	Semi-crítico	100	Crítico	300
INTERRUPTOR, LINEA, 52,0 KV, EDF SK 1-4, 44,0 KV, 25,0 KA, 35	80	Semi-crítico	100	Crítico	20	No crítico	40	No crítico	100	Crítico	240
INTERRUPTOR, 13,2 KV, FLUARC FG2, 13,2 KV, 31,5 KA, 47, 95,0 KV	90	Semi-crítico	30	No crítico	30	No crítico	30	No crítico	90	Semi-crítico	180
INTERRUPTOR, CIRCUITO, 13,2 KV, FLUARC FG2, 13,2 KV, 31,5 KA, 25	90	Semi-crítico	30	No crítico	30	No crítico	30	No crítico	90	Semi-crítico	180
INTERRUPTOR, 13,2 KV, FLUARC FG2, 13,2 KV, 40,0 KA, 47, 95,0 KV	90	Semi-crítico	30	No crítico	30	No crítico	30	No crítico	90	Semi-crítico	180
INTERRUPTOR, 13,2 KV, FLUARC FG2, 13,2 KV, 31,5 KA, 27, 95,0 KV	90	Semi-crítico	30	No crítico	30	No crítico	30	No crítico	90	Semi-crítico	180
INTERRUPTOR, 13,2 KV, FLUARC FG2, 13,2 KV, 25,0 KA, 18, 95,0 KV	90	Semi-crítico	30	No crítico	30	No crítico	30	No crítico	90	Semi-crítico	180
INTERRUPTOR, SERVICIOS AUXILIARES, 24,0 V, HKK15 HZ, 13,2 KV, 21,0 KA, 29	90	Semi-crítico	30	No crítico	90	Semi-crítico	30	No crítico	90	Semi-crítico	240
INTERRUPTOR, 17,5 KV, FLUARC FG2, 13,2 KV, 20,0 KA, 11	90	Semi-crítico	30	No crítico	30	No crítico	30	No crítico	90	Semi-crítico	180
INTERRUPTOR, 13,2 V, FLUARC FG2, 13,2 KV, 25,0 KA, 40, 95,0 KV	90	Semi-crítico	30	No crítico	30	No crítico	30	No crítico	90	Semi-crítico	180
INTERRUPTOR, SERVICIOS AUXILIARES, 15,0 KV, HKK 15/1240, 13,2 KV, 20,0 KA, 23	90	Semi-crítico	30	No crítico	90	Semi-crítico	30	No crítico	90	Semi-crítico	240
INTERRUPTOR, 17,5 KV, FLUARC FG2, 13,2 KV, 20,0 KA, 30, 75,0 KV	90	Semi-crítico	30	No crítico	30	No crítico	30	No crítico	90	Semi-crítico	180
INTERRUPTOR, 24,0 KV, HKK 24/1220, 13,2 KV, 31,5 KA, 25	90	Semi-crítico	30	No crítico	90	Semi-crítico	30	No crítico	90	Semi-crítico	240
INTERRUPTOR, 24,0 KV, HKK 15/1240, 13,2 KV, 20,0 KA, 72	90	Semi-crítico	30	No crítico	90	Semi-crítico	30	No crítico	90	Semi-crítico	240
INTERRUPTOR, SERVICIOS AUXILIARES, 15,0 KV, HKK15/1240, 13,2 KV, 31,5 KA, 28.1	90	Semi-crítico	30	No crítico	90	Semi-crítico	30	No crítico	90	Semi-crítico	240
INTERRUPTOR, 17,5 KV, DA2-165, 13,2 KV, 40,0 KA	90	Semi-crítico	30	No crítico	90	Semi-crítico	30	No crítico	90	Semi-crítico	240
INTERRUPTOR, 17,5 KV, DA2-165, 13,2 KV, 41,5 KA	90	Semi-crítico	30	No crítico	90	Semi-crítico	30	No crítico	90	Semi-crítico	240
INTERRUPTOR, 17,5 KV, FLUARC FG2, 13,2 KV, 40,0 KA	90	Semi-crítico	30	No crítico	30	No crítico	30	No crítico	90	Semi-crítico	180
INTERRUPTOR, 17,5 KV, A02-165, 13,2 KV, 41,5 KA, 9	90	Semi-crítico	30	No crítico	90	Semi-crítico	30	No crítico	90	Semi-crítico	240
INTERRUPTOR, 13,2 KV, FLUARC FG2, 13,2 KV, 25,0 KA	90	Semi-crítico	30	No crítico	30	No crítico	30	No crítico	90	Semi-crítico	180
INTERRUPTOR, 17,5 KV, FLUARC FG2, 13,2 KV, 20,0 KA, 10	90	Semi-crítico	30	No crítico	30	No crítico	30	No crítico	90	Semi-crítico	180
INTERRUPTOR, 13,2 KV, FLUARC FG2, 13,2 KV, 50,0 KA, 47, 95,0 KV	90	Semi-crítico	30	No crítico	30	No crítico	30	No crítico	90	Semi-crítico	180
INTERRUPTOR, SERVICIOS AUXILIARES, 15,0 KV, HKK 15/1240, 13,2 KV, 25,0 KA, 12	90	Semi-crítico	30	No crítico	90	Semi-crítico	30	No crítico	90	Semi-crítico	240
INTERRUPTOR, 13,2 V, FLUARC FG2, 13,2 KV, 31,5 KA, 40, 95,0 KV	90	Semi-crítico	30	No crítico	30	No crítico	30	No crítico	90	Semi-crítico	180
INTERRUPTOR, 17,5 KV, DA2-165, 13,2 KV, 25,0 KA	90	Semi-crítico	30	No crítico	90	Semi-crítico	30	No crítico	90	Semi-crítico	240
INTERRUPTOR, 17,5 KV, FLUARC FG 2, 13,2 KV, 25,0 KA, 4, 95,0 KV	60	Semi-crítico	20	No crítico	20	No crítico	20	No crítico	60	Semi-crítico	120
INTERRUPTOR, 15,0 KV, HKK 15/1240A, 13,2 KV, 25,0 KA, 12	60	Semi-crítico	20	No crítico	60	Semi-crítico	20	No crítico	60	Semi-crítico	160

Fig. 8. Resultados por impacto de una muestra de interruptores.

A partir del resultado de criticidad para cada interruptor analizado, se puede realizar la siguiente interpretación y debe ser usada por los responsables de los activos:

- Crítico: tomar acción inmediata sobre estos activos, aplicando métodos de ingeniería de confiabilidad y riesgos: RCA (Root Cause Analysis), RCM (Reliability Centered Maintenance), RBI (Risk Based Inspection) y CRBA (Análisis Costo-Riesgo-Beneficio), con el objetivo de minimizar el impacto en las consecuencias y mejora en los aspectos técnicos de confiabilidad, disponibilidad y mantenibilidad [8].
- Semi-crítico: revisar el plan de mantenimiento actual y fijar unas visitas específicas al activo que permita mantenerlo en condiciones adecuadas.
- No crítico: continuar con las acciones actuales de mantenimiento.

VIII RESULTADOS

En Las ventajas del desarrollo de un modelo que logre homologar la criticidad tal como se describió anteriormente está relacionada con reducción de tiempos, reducción de costos y actualización del dato, para los dos primeros las tablas a continuación muestran una estimación del ahorro que se logró con la automatización del ejercicio para 1.629 interruptores analizados:

TABLA XVIII
ESTIMACIÓN DE REDUCCIÓN DE COSTOS Y TIEMPO CON UN ANÁLISIS DE CRITICIDAD
HOMOLOGADO.

	Análisis manual	Modelo homologado	Diferencia (Análisis automático - Modelo homologado)
Reducción de costos	\$ 37.051.605	\$ 2.723.000	\$ -34.328.605
Reducción de tiempo	164 horas	48 horas	- 116 horas

El modelo propuesto es de naturaleza cualitativa y puede generar un alto nivel de incertidumbre, ya que busca adaptarse a las expectativas de riesgo tanto de la organización como del sector en el que se utiliza el interruptor. Para mejorar la robustez del modelo, sería beneficioso integrar información adicional, como detalles operativos específicos de la subestación, como la configuración de la misma, la ubicación geográfica considerando aspectos ambientales y proyecciones financieras de ingresos y pérdidas. Sin embargo, esta ampliación requeriría de una mayor disponibilidad de información y una inversión de tiempo adicional por parte del personal, lo que podría aumentar significativamente los costos del ejercicio inicialmente propuesto y cuestionar la reducción de tiempo y costos. No obstante, un modelo aplicado de manera completa y considerando todas estas variables aseguraría que las actualizaciones necesarias en cumplimiento con la normativa se realicen de manera eficiente, sin incurrir en costos ni tiempo adicionales.

IX. CONCLUSIONES

Los análisis de criticidad son fundamentales para la toma de decisiones estratégicas, ya que permiten enfocar los esfuerzos en los activos más críticos, alineando así las acciones con los niveles de riesgo de la organización. Con el modelo propuesto, se evaluaron 1,629 interruptores de potencia en subestaciones de energía convencionales, identificando que el 14% de estos interruptores son críticos y requieren atención inmediata. Esto representa un total de 215 interruptores, sobre los cuales se debe priorizar la acción, sin descuidar el mantenimiento de los demás activos. Es crucial que estos modelos estén alineados con los objetivos organizacionales, considerando diversos criterios como impacto en las personas, medio ambiente, calidad y aspectos financieros, pudiendo incluso incorporar otros factores relevantes como la reputación de la empresa.

La efectividad de estos modelos depende en gran medida del conocimiento de los activos y la experiencia del personal participante, el cual debe ser multidisciplinario para abordar todas las posibles consecuencias en caso de una falla. Además, es fundamental contar con la información necesaria y validar los criterios establecidos en el modelo con la información disponible.

La investigación sobre la criticidad de los interruptores de potencia en subestaciones convencionales resalta la necesidad de actualizar la normativa existente para caracterizar estos equipos, especialmente ante la evolución de los materiales utilizados en su fabricación. La introducción de nuevos materiales y tecnologías en la industria eléctrica plantea desafíos y oportunidades en la evaluación de la criticidad de estos activos. Por lo tanto, es imprescindible revisar y modernizar las normas vigentes para incorporar criterios que reflejen las propiedades y riesgos asociados a los nuevos materiales. Esta actualización proporcionará a las empresas del sector eléctrico herramientas más precisas para la toma de decisiones informadas en mantenimiento y gestión de activos, asegurando la seguridad y eficiencia de sus operaciones en un entorno tecnológico en constante cambio.

REFERENCIAS

- [1] NORSOK Standard Z-008, "Risk and emergency preparedness analysis." Revision 3, Nov. 2002.
- [2] American Petroleum Institute, "API STANDARD 2000: Venting Atmospheric and Low-pressure Storage Tanks", Fifth Edition, April 1998.
- [3] D. J. Gaviria, *Automatización del Análisis de Criticidad de Activos Centralizados en Centrales de Generación* [trabajo de grado]. Medellín (Colombia): Universidad Nacional de Colombia, 2023.
- [4] Comisión de Regulación de Energía y Gas (CREG), "Resolución CREG 015 de 2018: Por la cual se establecen los criterios para la determinación de la generación de energía renovable no convencional con fines de autogeneración y producción más limpia", 2018.
- [5] International Organization for Standardization (ISO), "ISO 55001:2014 - Asset Management - Management Systems - Requirements", 2014.
- [6] L. Daquinte L, J. Águila G, R. Pérez R, E. García A, "Metodología de Análisis de criticidad integral de las cosechadoras de caña de azúcar CASE IH," *Revista Ingeniería Agrícola*, ISSN-2306-1545, E-ISSN-2227-8761, Vol. 8, No. 2 (abril-mayo-junio), pp. 55-61, 2018
- [7] E. Ruiz Franklin, *plan de mantenimiento basado en criticidad para aumentar la disponibilidad de equipos área de producción de conservas de pimiento en la empresa danper trujillo s.a.c.* [trabajo de grado]. Trujillo (Perú): Universidad Cesar Vallejo, 2019.
- [8] C. Parra, A. Crespo Marquez, J. Parra, P. Viveros, F. Kristjanpoller, V. Gonzalez-Prida, and A. Balda, "Técnica de Jerarquización de Activos MCCR: Matriz de Criticidad Cualitativa de Riesgo. Caso de estudio: Unidad de Craqueo Catalítico," 2021, doi: <https://doi.org/10.13140/RG.2.2.31889.15209/1>
- [9] I. Gondres Torné, S. Lajes Choy, and A. del Castillo Serpa, "Gestión del mantenimiento a interruptores de potencia. Estado del arte," *Ingeniare. Rev. chil. ing.*, vol. 26, no. 2, pp. 192-201, jun. 2018, doi: <http://dx.doi.org/10.4067/S0718-33052018000200192>
- [10] C. Suwanasri, S. Lipirodjanapong, T. Suwanasri y W. Wangdee, "Failure rate analysis of circuit breaker and its preventive maintenance application," en 2014 International Conference on Probabilistic Methods Applied to Power Systems (PMAPS), Durham, UK, 2014, pp. 1-6. doi: 10.1109/PMAPS.2014.6960623.
- [11] T. Suwanasri, M. T. Hlaing y C. Suwanasri, "Failure Rate Analysis of Power Circuit Breaker in High Voltage Substation," *GMSARN International Journal*, vol. 8, pp. 1-6, 2014.
- [12] M. McGrath, "El gas con efecto invernadero 23.500 veces más potente que el dióxido de carbono y del que muchos jamás han oído hablar", *BBC News Mundo*. 2019, [En línea]. Disponible en: <https://www.bbc.com/mundo/noticias-49717228>
- [13] IEB, "Estudio para la determinación de unidades constructivas STN, STR y SDL. Análisis de precios de equipos principales," Comisión de Regulación de Energía y Gas (CREG),

Medellín, marzo de 2014.