INNOVACIÓN EN EL ANÁLISIS DE FALLAS: EVALUACIÓN AVANZADA DE LOCALIZACIÓN Y PROTECCIONES ELÉCTRICAS

PROPONENTES:

NOMBRE:	Juan Carlos Rodríguez Suárez			
ÁREA:	Dirección Operación			
CARGO:	Especialista Operación Red			
EMPRESA:	ISA INTERCOLOMBIA S.A.			
PAÍS:	Colombia			
CORREO:	jcrodriguez@intercolombia.com			
	AUTOR:	**x**	**COAUTOR:**	

NOMBRE:	David Álvarez Osorio			
ÁREA:	Dirección Operación			
CARGO:	Analista Análisis Operativo			
EMPRESA:	ISA INTERCOLOMBIA S.A.			
PAÍS:	Colombia			
CORREO:	dalvarez@intercolombia.com			
	AUTOR:		**COAUTOR:**	**x**

NOMBRE:	Germán Alonso Gutiérrez Ramírez			
ÁREA:	Dirección Operación			
CARGO:	Especialista Operación Red			
EMPRESA:	ISA INTERCOLOMBIA S.A.			
PAÍS:	Colombia			
CORREO:	ggutierrez@intercolombia.com			
	AUTOR:		**COAUTOR:**	**x**

NOMBRE:	Sebastián Giraldo Ríos			
ÁREA:	Dirección Operación			
CARGO:	Analista Tecnología de Información			
EMPRESA:	ISA INTERCOLOMBIA S.A.			
PAÍS:	Colombia			
CORREO:	segiraldo@intercolombia.com			
	AUTOR:		**COAUTOR:**	**x**

RESUMEN

ISA INTERCOLOMBIA ha desarrollado soluciones de diagnóstico automático de eventos en el sistema eléctrico, integrando conocimiento experto, inteligencia artificial y gestión de información. En alianza con el grupo T&T de la Universidad Nacional y la empresa MOVI Software, se desarrolló SAGESDAE, un aplicativo que automatiza la recolección de registros oscilográficos y la detección y análisis de fallas en activos de transmisión. Esta herramienta evolucionó hacia el análisis automático de protecciones y localización de fallas en líneas de transmisión aéreas, subterráneas y mixtas, permitiendo evaluar la impedancia y polarización observadas por los equipos de protección, y el cálculo de la localización y resistencia de fallas usando métodos avanzados. Estas capacidades han permitido detectar anomalías ocultas, validar ajustes de protecciones y mejorar la comprensión del comportamiento de los equipos, optimizando recursos y tiempos en la búsqueda de fallas. SAGESDAE es una solución única en Colombia, sin equivalentes internacionales, y representa una oportunidad de negocio para ISA. Su implementación ha mejorado la confiabilidad, seguridad y resiliencia del sistema eléctrico, alineándose con la estrategia empresarial.

Información Interna

PALABRAS CLAVES: Fallas, Líneas, Transmisión, Protecciones, Impedancia, Localización, Resistencia, evaluación, polarización.

CATEGORÍA: Energía – Operación

INTRODUCCIÓN

La confiabilidad del Sistema de Transmisión Nacional (STN) depende de la correcta operación de las protecciones eléctricas instaladas en las líneas de transmisión. ISA INTERCOLOMBIA, consciente de esta necesidad, desarrolló SAGESDAE, un sistema integrado que automatiza la descarga de registros ante eventos, recopila periódicamente ajustes de relés y los centraliza en una base de datos. Además, interpreta señales analógicas y digitales para determinar tipo de falla, duración, secuencia y condiciones previas y durante el evento, optimizando el análisis post-operativo.

Una vez consolidada esta plataforma, el paso consecuente fue incorporar capacidades que permitieran realizar el análisis automático de localización de fallas y evaluar el desempeño de funciones críticas como protección de distancia y sobrecorriente direccional (67N). Las soluciones comerciales existentes no ofrecen la posibilidad de visualizar el cálculo real implementado por los fabricantes, lo que limita la validación de ajustes y la detección de anomalías ocultas.

Este trabajo aborda esa necesidad mediante el desarrollo de módulos que integran algoritmos especializados para calcular impedancia aparente, polarización, localización y resistencia de falla, utilizando registros reales del STN. La propuesta se fundamenta en la revisión del estado del arte, análisis técnico de protecciones y pruebas con eventos reales, con el fin de mejorar la eficiencia operativa y la confiabilidad del sistema eléctrico.

1 ANTECEDENTES

El sistema eléctrico colombiano enfrenta el reto de gestionar eficientemente los eventos de falla que ocurren en su infraestructura de transmisión. Estos eventos generan una gran cantidad de información que debe ser analizada para tomar decisiones operativas, declarar disponibilidad de activos y cumplir con las normativas y regulación vigente. Tradicionalmente, la descarga y el análisis de la información había sido manual, demandando tiempo y recursos humanos especializados. ISA INTERCOLOMBIA, consciente de esta necesidad, ha trabajado en herramientas para el diagnóstico automático de eventos durante más de 15 años mediante investigaciones y estudios realizados por parte del personal de la Dirección Operación como los presentados en [1], [2] y [3]. Resultado de estas investigaciones y desarrollos, se crearon dos soluciones tecnológicas propias denominadas SAGES (Sistema Automático de Gestión de Equipos de Subestaciones) y DAE (Diagnóstico Automático de Eventos). Cada solución tuvo un desarrollo independiente teniendo como objetivo la descarga de información y gestión de ajustes de protecciones – en el caso de SAGES – y por otro lado, el análisis de la información análoga y digital proveniente de relés, registradores de falla y el sistema SCADA – en el caso del DAE – con el fin de obtener la secuencia temporal de la ocurrencia de un evento. En 2023 y 2024, ISA INTERCOLOMBIA integró ambas herramientas, superando el reto técnico de fusionar una aplicación web (.NET) con una de escritorio (Java), creando SAGESDAE bajo una arquitectura tecnológica unificada [4]. El resultado de esta implementación fue el aumento de la eficiencia operativa y reduciendo los tiempos de respuesta ante fallas en las líneas de transmisión. Esta integración mejoró la eficiencia operativa y redujo los tiempos de respuesta: la descarga de información pasó de 15–40 minutos a 1–5 minutos, y el análisis básico de 2–3 horas a 1–3 minutos, logrando más del 60% de eficiencia en estas tareas. Lo anterior ha permitido que el personal pueda realizar análisis a mayor profundidad, teniendo mayor énfasis en la búsqueda de anomalías ocultas e investigando fenómenos electromagnéticos no detectados antes en el sistema.

Sin embargo, desde la Dirección Operación de ISA INTERCOLOMBIA se ha continuado la innovación y el mejoramiento continuo de sus procesos. Por ello,

Información Interna

el aplicativo SAGESDAE ha evolucionado con el objetivo de proporcionar respuesta a otra necesidad crítica dentro del Sistema Interconectado Nacional SIN: contar con una herramienta robusta para evaluar de forma eficiente y precisa las ubicaciones y características de fallas en las líneas de transmisión y subtranmisión y revisar el desempeño de las protecciones eléctricas durante dichos eventos.

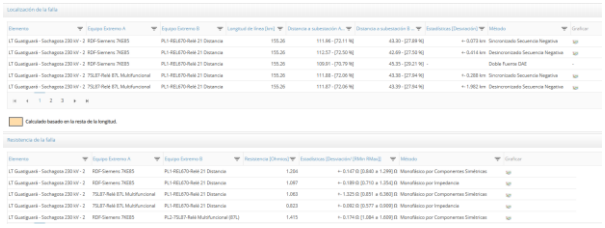
2 METODOLOGÍA

El proceso para la evaluación avanzada de la localización de fallas y las protecciones eléctricas partió de trabajos previos que se han realizado por parte del equipo de Análisis operativo de ISA INTERCOLOMBIA y que han sido probados en el proceso de análisis de fallas [4] [5]. A partir de allí, se integraron nuevas funcionalidades teniendo en cuenta el objetivo actual y la visión a futuro del aplicativo.

2.1 LOCALIZACIÓN AVANZADA DE FALLAS

En la revisión de sistemas para análisis avanzado de fallas, se identificó que el mercado carece de herramientas que ofrezcan un enfoque integral para la localización de fallas en líneas de transmisión. Las prácticas más comunes consisten en aplicar diversos métodos de manera indiscriminada, sin considerar factores como el tipo de falla, la configuración de la línea o sus características específicas [6]. Solo en 2015 la IEEE publicó un estándar con recomendaciones sobre técnicas de localización de fallas en líneas AC, orientadas a ingenieros y operadores [7]. La elección del método adecuado, su correcta implementación y validación exige personal especializado, lo que genera dependencia de expertos y retrasos en la atención de eventos. En los Centros de Control, esta situación puede prolongar la ubicación de la falla por horas o incluso días, incrementando costos operativos y riesgos asociados.

Para superar estas limitaciones, se desarrolló una solución que integra múltiples métodos de localización categorizados según la disponibilidad de información y la configuración de la línea. Estos métodos fueron evaluados con fallas reales del Sistema Eléctrico Colombiano e incluyen algoritmos para líneas aéreas, subterráneas y mixtas, así como el cálculo automático de la resistencia de falla para caracterizar el evento. Todo esto se articula mediante un sistema experto que selecciona y ejecuta los algoritmos más apropiados, consolidando los resultados en una única estimación precisa mediante análisis estadístico. El proceso se ejecuta autónomamente con base en los registros descargados en los extremos de la línea. Los resultados se presentan en tablas y gráficas como los presentados en la Figura 1 y 2, facilitando la interpretación de los usuarios del aplicativo.



Fuente: Elaboración propia

Figura 1. Tabla de localización y resistencia de falla - aplicativo SAGESDAE



Fuente: Elaboración propia

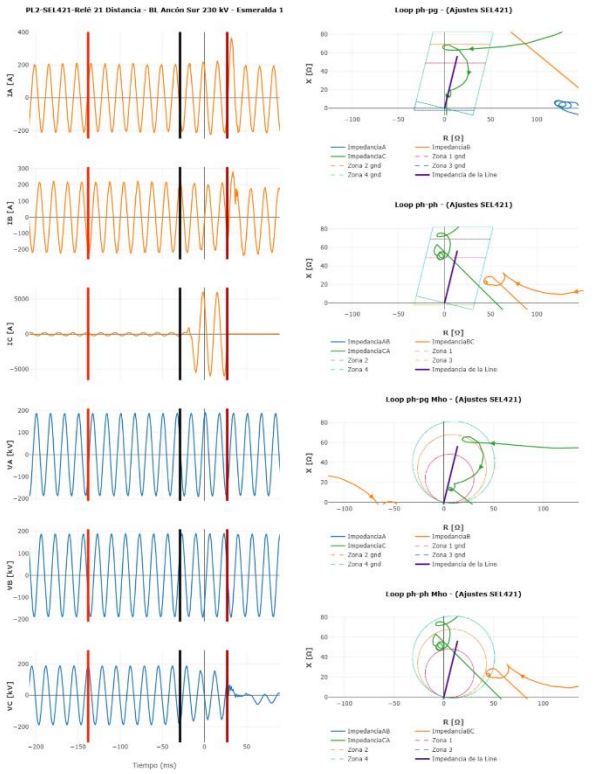
Figura 2. Gráfica de localización de falla - aplicativo SAGESDAE

2.2 EVALUACIÓN DE IMPEDANCIA APARENTE

Una de las principales necesidades de los ingenieros de protecciones es ajustar y evaluar, mediante fallas reales, el comportamiento de las funciones implementadas en los relés. Cada fabricante emplea algoritmos propios de cálculo y

Información Interna

filtrado de señales, los cuales, en muchos casos, no incluyen herramientas gráficas para facilitar dicha evaluación. Para atender esta necesidad, el sistema SAGESDAE incorporó un módulo de evaluación de impedancia para funciones de distancia, que grafica automáticamente las señales temporales y la impedancia aparente vista por la protección durante una falla, superponiéndola sobre la característica del relé. Esta característica se genera a partir de los ajustes reales del equipo en sitio, utilizando las ecuaciones específicas de cada referencia y fabricante. Así, el usuario no necesita ingresar manualmente los parámetros ni buscar la información en los ajustes del relé, optimizando el análisis técnico y reduciendo errores operativos.



Fuente: Elaboración propia

Figura 3. Gráfico de impedancia aparente relé SEL421 durante una falla - aplicativo SAGESDAE

El módulo tiene otras funcionalidades que han facilitado la realización de estudios de protecciones y cambios de ajustes, como:

- Realizar cambio de ajustes de forma manual.
- Simular la impedancia aparente de un relé visto como si fuera otro relé de una referencia diferente.
- Permite evaluar la impedancia de cualquier archivo COMTRADE mediante carga manual.
- Carga de ajustes de los relés mediante archivos.
- Integración con otros módulos de Generación de archivos COMTRADE para pruebas de relés

2.3 EVALUACIÓN DE POLARIZACIÓN DE FUNCIÓN DE PROTECCIÓN DE CORRIENTE RESIDUAL DE TIERRA 67N.

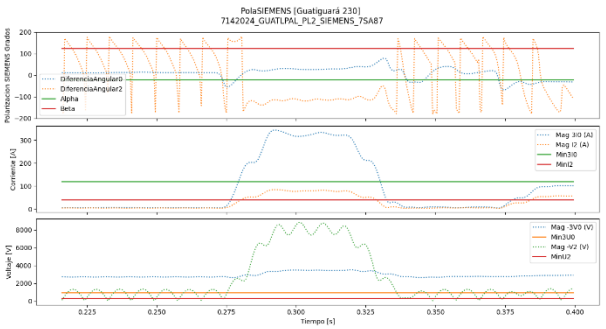
La polarización en la función direccional 67N se basa en el uso de tensiones y corrientes residuales para establecer un referente direccional, mediante umbrales de magnitud y ángulo que permiten determinar si una falla a tierra está en la dirección prevista. Generalmente se emplean tensiones y corrientes de secuencia cero o negativa (U_0, U_2), junto con criterios angulares como el ángulo de torque máximo y zonas direccionales. Estos parámetros son críticos para definir ajustes de disparo y bloqueos por baja tensión o corriente. Evaluar esta polarización muestra a muestra en señales analógicas o fasores es complejo y las herramientas tradicionales no permiten visualizar adecuadamente esta información. Además, cada fabricante aplica transformaciones propias, rotaciones de fasores y ecuaciones internas, sin ofrecer herramientas ágiles para revisar estos efectos.

Para resolverlo, se desarrolló en SAGESDAE un módulo que a través de un conjunto de tres gráficas muestran simultáneamente magnitudes, relaciones angulares de tensión-corriente y su evolución temporal para determinar la duración y los cambios de dirección de la falla vista por los relés. Los ajustes necesarios se cargan automáticamente desde la base de datos y el análisis se genera para cada oscilografía, permitiendo incluso comparar metodologías entre fabricantes.

Este enfoque ha sido clave para detectar fallas de

Información Interna

alta impedancia, donde las magnitudes son bajas y el criterio direccional depende fuertemente del ángulo. Sin esta herramienta, errores de cableado, problemas en neutros o aprietes deficientes podrían interpretarse como mala operación del relé, desviando el análisis. La solución ha permitido identificar ajustes incorrectos y anomalías ocultas, mejorando la confiabilidad y reduciendo riesgos operativos.



Fuente: Elaboración propia

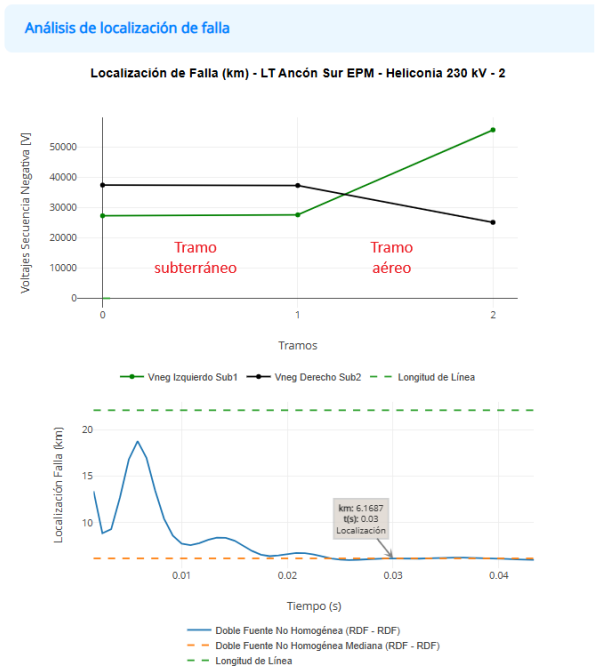
Figura 4. Gráfica de polarización función 67N- aplicativo SAGESDAE

3 RESULTADOS

Las soluciones implementadas se han usado en los análisis de eventos de los activos de transmisión de ISA INTERCOLOMBIA y han permitido una toma de decisiones rápida y confiable del Centro de Control y por consecuente, el restablecimiento de los activos y/o la entrega oportuna del sitio a inspeccionar. A continuación, se mostrarán ejemplos de resultados que se han logrado con la herramienta en tiempo real y que anteriormente dicho análisis podía tomar varias horas en lograrse.

3.1 LOCALIZACIÓN DE FALLA EN LÍNEA NO HOMOGÉNEA

El día 15 de mayo del 2025 a las 15:49 horas se presentó el disparo del circuito Ancón Sur EPM – Heliconia 2 230 kV ante una falla monofásica en la Fase B. El circuito no hizo recierre, lo cual indica que se activó la protección diferencial propia del tramo subterráneo. Este circuito presenta un tramo subterráneo de 1.126 km y uno aéreo de 20.92 km. En menos de 5 minutos el Centro de Control tuvo acceso a los registros de falla y a la localización dada por el aplicativo SAGESDAE, el cual mostraba que la falla estaba en el tramo aéreo, como se observa en la figura 4. El Centro de Control tomó la decisión de energizar el circuito basado en la localización y la correlación de ésta con descargas atmosféricas, a pesar de la señalización de operación de protección del tramo subterráneo, por lo que el circuito se normalizó a los 15 minutos. El aplicativo ayudó a tomar una decisión rápida y confiable, que en otros casos hubiese demorado varias horas. Posteriormente se encontró que la protección del tramo subterráneo tuvo una anomalía en su operación.



Fuente: Elaboración propia

Figura 5. Gráfico de localización evento LT Ancón Sur EPM - Heliconia 230 kV - 2

3.2 LOCALIZACIÓN DE FALLA DE ALTA IMPEDANCIA

El día 15 de octubre del 2025 a las 11:59 horas se presentó el disparo del circuito Porce III - Sogamoso 500 kV ante una falla monofásica Fase A. El Centro

Información Interna

de control logró establecer que la falla tenía una característica de alta impedancia y calcular su localización a través del aplicativo SAGESDAE como se presenta en la figura 6. Se observa que la falla tenía una resistencia de falla de más de 200 ohm al inicio de la falla y de alrededor de 70 ohm antes del disparo de las protecciones. Asimismo, la localización fue dada por dos métodos diferentes que son los que mejores resultados han mostrado para las fallas de alta impedancia, mostrando una coherencia en los resultados. Lo anterior permitió que tan solo unos minutos después de la falla, el equipo de líneas fuera notificado de la ubicación y características de la falla para realizar una inspección, la cual fue encontrada a 72.1 km desde la subestación Porce III. En este caso, la solución avanzada de localización permitió un ahorro en costos asociados a la indisponibilidad del circuito y la inspección.

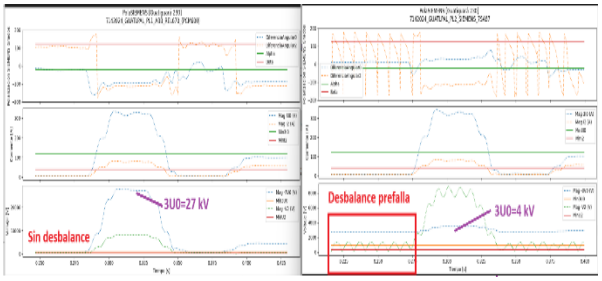


Fuente: Elaboración propia

Figura 6. Gráfico de evolución de la resistencia de falla y de localización en el evento LT Porce III - Sogamoso 500 kV – 1

3.3 DETECCIÓN DE ANOMALÍAS OCULTAS

Para un caso de disparo incorrecto de la función 67N, la comparación inicial entre las señales de corriente y tensión de ambos relés mostraba características similares. Sin embargo, al aplicar el análisis mediante el módulo de polarización (Ver figura 7), se identificó en uno de los relés un desbalance de tensión significativo, presente desde la prefalla y una diferencia más marcada durante la falla, en contraste con el otro relé. Esta evidencia condujo al hallazgo de una anomalía oculta: un mal apriete en las borneras de la conexión a tierra del cajetín del transformador de potencial (PT). Este tipo de problemas, bajo un análisis tradicional basado únicamente en medidas analógicas, habría derivado en un escalamiento al fabricante del relé y en tiempos de atención considerablemente mayores. Gracias al uso del módulo de polarización, se resolvió esta situación de forma ágil, evitando diagnósticos erróneos y demostrando el valor de la herramienta para detectar anomalías complejas y fallas ocultas.



Fuente: Elaboración propia

Figura 7. Análisis de polarización 67N

3.4 MEJORA DE AJUSTES DE PROTECCIONES

Un caso de mejora de ajustes detectados mediante el análisis de la impedancia aparente vista por un relé se realizó en la BL Betania – Hobo 115 kV. En una falla ocurrida externa al circuito Betania – Hobo 115 kV se presentó el disparo en Betania debido a operación de la zona 1 de la protección 1 REL670. Adicionalmente se halló que la protección 2 7SA87 no arrancó ni operó. Con el análisis de impedancia aparente realizado mediante SAGESDAE que se presenta en la figura 8, se detectaron dos

Información Interna

situaciones de mejora: la primera es que se estaba produciendo un sobrealcance de la zona 1 en ambas protecciones, lo que permitió que se reajustaran los alcances de la función distancia. Lo segundo fue que la protección 2 debió haber operado también por la función distancia de zona 1 y por lo tanto había una anomalía oculta en la protección. En la revisión se encontró que el núcleo de corriente asociado a la protección 2 estaba doblemente aterrizado por lo cual, no estaba midiendo correctamente la corriente de desbalance. Los análisis realizados hubieran requerido la realización de un estudio en herramientas de simulación especializadas para tratar de reproducir lo visto por el relé, ya que el fabricante no brinda una herramienta para realizarlo, lo cual hubiese requerido muchas horas del personal.

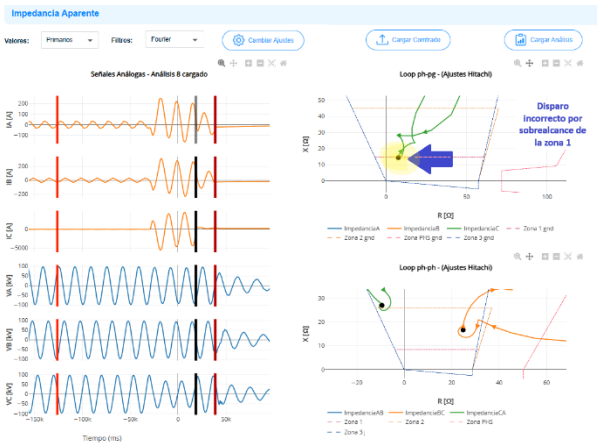


Figura 8. Gráfico de la impedancia aparente vista por el relé REL670 de la BL Betania – Hobo 115 kV

3.5 BENEFICIOS OBTENIDOS

La implementación propia del sistema evitó una inversión aproximada entre USD 60.000 y 80.000 anuales, equivalente al costo de una solución comercial con módulos de diagnóstico y localización de fallas. En su lugar, se desarrolló una solución tecnológica propia, flexible y escalable, apta para su implementación en las demás empresas ISA, con potencial de evolución y mejora continua.

Gracias a la implementación de la localización avanzada de fallas, se tiene una precisión superior a los métodos tradicionales, con márgenes de error menores al 2%, y sumado al cálculo automático de la resistencia de falla que ha permitido caracterizar eventos con mayor nivel de detalle, diferenciando tipos de fallas como aquellas causadas por vegetación, se han logrado eficiencias significativas en los costos asociados a inspecciones de fallas de alta complejidad, con reducciones de hasta el 50%.

En términos operativos, se estima una disminución superior al 30% en los tiempos de análisis, tanto en tiempo real como en el análisis post-operativo, equivalentes a 0.24 FTE (Full-Time Equivalent). Aunque los ahorros financieros son relevantes, el principal beneficio radica en la optimización de la infraestructura de gestión de equipos, manteniendo una operación confiable y segura, y permitiendo el mejoramiento continuo del desempeño de los equipos de protección.

Adicionalmente, la incorporación de módulos de evaluación de protecciones ha automatizado y simplificado el análisis de funciones críticas como distancia y sobrecorriente direccional (67N). Esto ha permitido detectar anomalías en el comportamiento de los equipos de protección, optimizar la validación de sus configuraciones y ajustar parámetros de forma más precisa. Asimismo, la detección oportuna de las anomalías ha evitado la ocurrencia de fallas de mayor criticidad que impliquen compensaciones por Energía No Suministrada (ENS) o sanciones por parte de los entes de control.

4 CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

Las nuevas implementaciones en el aplicativo SAGESDAE han demostrado beneficios tangibles en los costos asociados a la disponibilidad del personal especialista en análisis de fallas, costos de inspección y disponibilidad de activos. Asimismo, han permitido validar y mejorar las configuraciones de las protecciones y detectar anomalías ocultas que contribuyen a una mejora constante de la confiabilidad y seguridad del sistema eléctrico.

Esta solución representa una innovación estratégica, escalable y alineada con el objetivo

Información Interna

corporativo de ISA hacia 2040, orientado a cumplir los niveles de servicio con infraestructura resiliente, flexible y segura.

SAGESDAE se consolida como una herramienta única en Colombia, y hasta el momento no se ha identificado una solución equivalente en el ámbito internacional. Esta singularidad representa una oportunidad estratégica para su comercialización en el sector eléctrico, tanto a nivel nacional como global. Su desarrollo posiciona a ISA como un referente tecnológico en el análisis avanzado de fallas, destacando su liderazgo en innovación aplicada a la operación del sistema eléctrico.

5 REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

[1] CALDERÓN J., ZAPATA G., OVALLE, D. Algoritmo Neuro-Difuso para la Detección y Clasificación de Fallas en Líneas de Transmisión Eléctrica Usando ANFIS. Revista Avances en Sistemas e Informática ISSN: Universidad Nacional de Colombia Colombia, vol. 4, no. 1, pp. 101–107, Jun. 2007, Acceso: Aug. 02, 2023. [Online]. Disponible: https://docplayer.es/37785749-Revista-avances-en-sistemas-e-informatica-issn-universidad-nacional-de-colombia-colombia.html

[2] LLANO, L., ZAPATA, G., OVALLE, D. Sistema De Inferencia Difuso Para Identificar Eventos De Falla En Tiempo Real Del STE Usando Registros SOE. Avances en Sistemas e Informática, vol. 4, no. 2, May 2007, Acceso: Jun. 19, 2023. [Online]. Disponible: https://revistas.unal.edu.co/index.php/avances/article/view/9762

[3] VÁSQUEZ, Leonardo. Modelo híbrido utilizando agentes de software inteligentes y lógica difusa para el diagnóstico automático de fallas en sistemas de trasmisión de energía. 2010. Acceso: Jun. 04, 2023. [Online]. Disponible: https://repositorio.unal.edu.co/handle/unal/8043

[4] Rodríguez, J. Vásquez L, Álvarez, D. Giraldo, S. Aguilar, L Cardona, J. “Análisis Automático En Tiempo Real De Fallas En El Sistemas De Transmisión De Energía, Mediante La Mejora E Integración De Los Sistemas SAGES – DAE”. Jornadas del Conocimiento e Innovación ISA 2024, Medellín, 2024.

[5] Álvarez, D. Rodríguez, J. León, G. “Reducción De Tiempos De Proceso Y Costos De Inspección Mediante La Implementación De Un Sistema Experto Para La Localización De Fallas En Líneas De Transmisión”. Jornadas del Conocimiento e Innovación ISA 2024, Medellín, 2024.

[6] ETAP Software. Learn about ETAP Automated Fault Analysis Software (AFAS). Julio 2023. https://youtu.be/dtWtonz2QfY?si=WTz6D5mbxhP4GkAy

[7] "IEEE Guide for Determining Fault Location on AC Transmission and Distribution Lines," in IEEE Std C37.114-2014 (Revision of IEEE Std C37.114-2004), vol., no., pp.1-76, 30 Jan. 2015, doi: 10.1109/IEEESTD.2015.7024095.

HOJA DE VIDA DE LOS AUTORES

Juan Carlos Rodríguez Suárez. Ingeniero Electricista, Magister en Ingeniería Eléctrica – Universidad Industrial de Santander, 2006 y Especialista en Gerencia de Proyectos, 2021. Cargo actual: Especialista Operación Red. Dirección Operación.
jcrodriguez@intercolombia.com

David Álvarez Osorio. Ingeniero Electricista, Especialista en sistema de transmisión y distribución de energía – Universidad de los Andes, 2013. Cargo actual: Analista de análisis operativo. Dirección Operación.
dalvarez@intercolombia.com

Sebastian Giraldo Ríos. Magister en inteligencia de negocios – Universidad internacional de la Rioja España (UNIR), 2022. Cargo Actual: Analista Tecnologías de Información. Dirección Tecnologías de Información. segiraldo@intercolombia.com

Germán Alonso Gutiérrez Ramírez. Ingeniero Electricista, Especialista en Telecomunicaciones 2002, Magister en Ingeniería 2015 y Master science in Power Engineering, 2026. Cargo actual: Especialista Operación Red. Dirección Operación. gegutierrez@intercolombia.com

Información Interna