

ESCUELA POLITÉCNICA NACIONAL

**FACULTAD DE INGENIERÍA ELÉCTRICA Y
ELECTRÓNICA**

**DESARROLLO DE UNA HERRAMIENTA COMPUTACIONAL PARA
EL ANÁLISIS Y EVALUACIÓN COMPARATIVA DEL DESEMPEÑO
DE LA PROTECCIÓN DIFERENCIAL DE LÍNEA**

**TRABAJO DE TITULACIÓN PREVIO A LA OBTENCIÓN DEL TÍTULO DE
MAGISTER EN INGENIERÍA ELÉCTRICA EN DISTRIBUCIÓN**

RUBÉN OMAR SEMANATE ZAPATA

DIRECTOR: DR.- ING. FABIÁN ERNESTO PÉREZ YAULI

Quito, enero 2024

AVAL

Certifico que el presente trabajo fue desarrollado por Rubén Omar Semanate Zapata, bajo mi supervisión.



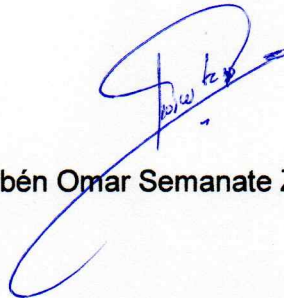
Dr.- Ing. Fabián Ernesto Pérez Yauli

DIRECTOR DEL TRABAJO DE TITULACIÓN

DECLARACIÓN DE AUTORÍA

Yo Rubén Omar Semanate Zapata, declaro bajo juramento que el trabajo 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.

A través de la presente declaración dejo constancia de que la Escuela Politécnica Nacional podrá hacer uso del presente trabajo según los términos estipulados en la Ley, Reglamentos y Normas vigentes.



Rubén Omar Semanate Zapata

DEDICATORIA

A mis padres; Inés Zapata y Rafael Semanate, ejemplo de amor, respeto, honestidad y trabajo constante.

A mis hermanos; Gabriela, Fernando y Darío, por su amor y apoyo incondicional.

A mis hijas; Sofia y Nathalya, por ser mi energía y motivación.

A mis sobrinos; Darío, Raphaella, Joaquin, Emilio y Rafael por la alegría que transmiten.

A Carlos Alfredo, por enseñarme el significado de la palabra fortaleza

A toda la familia, por el apoyo incondicional brindado

A los alumnos de la Unidad Educativa "LOUIS VICTOR DE BROGLIE", porque ser buenos no alcanza, hay que ser excelentes.

AGRADECIMIENTO

Un agradecimiento especial a mi Director de Proyecto, Dr.- Ing. Fabián Pérez por su invaluable apoyo brindado en la realización del Proyecto de Titulación.

Por medio del Ph.D. Antonio Fonseca y el Ing. Jorge Cadena a la Sección de Ingeniería de CELEC EP TRANSELECTRIC, por la motivación y transmisión de conocimiento.

Al MSc. Paúl Novillo Superintendente de Protecciones de la Empresa Eléctrica Regional CENTROSUR, por brindar el apoyo con la información necesaria para el desarrollo del presente Proyecto.

Al equipo de SERCONEL CIA. LTDA. MGs. Edwin Quisilema e, Ing. Leonardo Fonseca, por el apoyo y aporte brindado en la realización del Proyecto de Titulación.

ÍNDICE DE CONTENIDO

AVAL	I
DECLARACIÓN DE AUTORÍA.....	II
DEDICATORIA	III
AGRADECIMIENTO	IV
ÍNDICE DE CONTENIDO.....	V
RESUMEN	VII
ABSTRACT.....	VIII
1. INTRODUCCIÓN.....	1
1.1 Pregunta de investigación	4
1.2 Objetivo General	4
1.3 Objetivos Específicos	4
1.4 Alcance	4
1.5 Marco Teórico	6
1.5.1. Protección de Corriente Diferencial (87L).....	6
1.5.2. Características de Operación de IEDs Comerciales	8
1.5.3. Errores de la función 87L por saturación de TCs.....	16
1.5.4. Esquema de Pruebas de Ajuste para la Función 87L.....	19
2. METODOLOGÍA.....	21
2.1. Metodología para la Comparación y Ajuste de la Característica de Operación de la Función 87L en Función de Archivos Transitorios en formato COMTRADE	21
2.1.1. Etapa 1 – Modelación de los elementos de un SED específico	22
2.1.2. Etapa 2 – Simulación del conjunto de fallas preestablecido.....	25
2.1.3. Etapa 3 – Evaluación y ajuste de la función 87L en la herramienta computacional desarrollada.....	28
3. RESULTADOS Y DISCUSIÓN	36
3.1. Resultados	37
3.1.1. Caso 1.- Análisis de fallas simuladas en la línea de subtransmisión Sinincay – Cañar.....	37
3.1.2. Caso 2.- Análisis de una falla real en la línea de subtransmisión Arenal – Cerezos.....	54
3.1.3. Caso 3.- Análisis de una falla real en la línea de subtransmisión Turi – Lentag	60
4. CONCLUSIONES.....	67
4.1. Conclusiones.....	67

4.2. Recomendaciones.....	68
4.3. Trabajos futuros	69
5. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS	70
ANEXO A. MANUAL DE USUARIO DE LA HERRAMIENTA COMPUTACIONAL DESARROLLADA PARA EL ANÁLISIS DE LA FUNCIÓN 87L ¡Error! Marcador no definido.	
ANEXO B. RESULTADOS GRÁFICOS INICIALES OBTENIDOS PARA EL CASO 1 ¡Error! Marcador no definido.	
ANEXO C. DIFALPHA CODIGO FUENTE..... ¡Error! Marcador no definido.	

RESUMEN

El principio de la corriente diferencial es uno de los métodos más efectivos para la detección de corrientes de falla en una línea de un sistema eléctrico. Generalmente, las empresas distribuidoras utilizan la función de protección diferencial de línea (87L) de sus Dispositivos Electrónicos Inteligentes (IEDs) basándose en los ajustes de fábrica, por tanto, su parametrización no es específica para la línea que se protege y puede causar una operación no deseada.

La función 87L requiere de una revisión periódica de sus ajustes de protección debido al cambio continuo de la topología en las redes de subtransmisión y distribución. En este aspecto, los estudios de coordinación de protecciones que definen sus ajustes se dificultan, ya que no es posible generalizar una característica de operación para los IEDs comerciales, puesto que poseen diferentes algoritmos de operación.

En este trabajo de titulación, se implementa una herramienta computacional en el software MATLAB que contiene los algoritmos de operación de la función 87L de los principales fabricantes de IEDs comerciales. Además, permite analizar y comparar las características de operación de la función 87L y establecer aquella que presente un mejor desempeño mediante el ingreso de archivos en formato COMTRADE de eventos reales o simulados.

Para los casos de eventos simulados, se realiza la modelación de un sistema eléctrico de distribución específico en los softwares ATP y DIgSILENT, para posteriormente obtener una base de datos de archivos transitorios y realizar su procesamiento y análisis. Con esto se pretende aumentar la sensibilidad y confiabilidad de los IEDs que protegen a las líneas de subtransmisión y distribución, y reducir los tiempos de análisis pos-falla de la función 87L. Actualmente este análisis no es considerado por parte de las empresas distribuidoras.

PALABRAS CLAVE: Función de Protección de Línea, Archivos Transitorios, Característica de Operación, Estudios de Coordinación de Protecciones, Herramienta Computacional.

ABSTRACT

The differential current principle is one of the most effective methods for detecting line fault currents in an electrical system. Typically, enterprises to energy distribution level use differential line protection function (87L) of their Intelligent Electronic Devices (IEDs) applying default settings, therefore, the parameterization is not specific to protected line and may cause at relay an inadequate performance.

The 87L function requires a periodic adjust due to the continuous change of topology in subtransmission and distribution networks. In this respect, the protection coordination studies to define adjustments are difficult to set, since it is not possible to generalize one operating characteristic for all commercial IEDs, due to the different algorithms of operation.

In this work, a computational tool is implemented in the MATLAB programming environment, simulating 87L function operation algorithms of commercial IEDs. In addition, the developed tool has the capacity to contrasting the operating characteristics of 87L function and establish one that presents the best performance for real or simulated events in COMTRADE format.

In the simulated event cases, the modeling of a specific distribution system is made in ATP and DIgSILENT softwares, in order to obtain a database of transient files to event analysis. This analyse allow to increase the sensitivity and reliability of IEDs located in sub-transmission and distribution lines and accelerate the post-failure analysis times of 87L function. Currently, this analysis is not considered by the energy distribution enterprises.

KEYWORDS: Line Protection Function, Transient Files, Operation Feature, Protection Coordination Studies, Computational Tool.

1. INTRODUCCIÓN

Las líneas de subtransmisión y distribución son componentes importantes de un sistema eléctrico de potencia (SEP), puesto que se encargan de conectar y distribuir la mayoría de las cargas existentes en la red eléctrica con los sistemas de transmisión y generación. Por lo tanto, la confiabilidad del sistema de distribución depende en gran medida de la robustez del punto de conexión con el sistema de subtransmisión. Según la experiencia de las empresas distribuidoras, se ha evidenciado que alrededor de un 30% de los eventos de falla ocurren en las líneas de subtransmisión y distribución. Por lo tanto, se requiere de una protección que opere de manera rápida y confiable, a fin de evitar la propagación de fallas hacia los puntos de carga y con ello reducir los cortes de energía [1].

En este contexto, la función de protección diferencial de línea (87L) presenta ventajas respecto a las funciones de protección de distancia o sobrecorriente, por ejemplo: un mejor desempeño en líneas de subtransmisión o distribución con presencia de compensaciones serie, y principalmente la no dependencia de un voltaje polarizado ya que su funcionamiento está dado exclusivamente por mediciones de corriente en ambos extremos de la línea. Una desventaja que presenta esta función es la necesidad de canales confiables de comunicación lo cual incrementa los costos de su implementación [2].

Por otra parte, el principio de funcionamiento de la protección 87L es el mismo para todos los IEDs comerciales, es decir, responde a la suma fasorial de todas las corrientes de su zona de protección. Sin embargo, el procesamiento de estas corrientes en conjunto con su característica de operación varía según el modelo y marca del relé [1] [3]. Por ello, muchas empresas propietarias de los Sistemas Eléctricos de Distribución (SED) no realizan un análisis para el ajuste de esta función, más bien, utilizan los valores por defecto sugeridos por cada fabricante.

En lo que respecta a la sensibilidad y la robustez que brinda la función 87L ante eventos de falla, se han registrado variaciones en la respuesta de las distintas características de operación (diferencial porcentual simple, diferencial porcentual doble, plano alpha/beta o una combinación de las anteriores [4]) que presentan los IEDs en la industria, debido a que cada marca de IED tiene su propia lógica interna para determinar la actuación de la protección, lo cual dificulta su análisis y puede causar una mala interpretación de resultados, así como la asignación de ajustes no adecuados.

En tal aspecto, [4] presenta el estándar IEEE Std. C37.243-2015 donde se encuentra una guía de aplicación de la función de corriente diferencial para relés que utilizan comunicación digital, sin embargo, no se indican las pruebas que se deben simular para ajustar los parámetros de la característica de operación de la función 87L.

Para solventar los problemas descritos, este trabajo presenta el desarrollo de una herramienta computacional en la interfaz gráfica AppDesigner de MATLAB, que permite realizar un análisis y evaluación comparativa entre las características de operación de la función 87L de los principales fabricantes de IEDs en la industria eléctrica. Este análisis parte del procesamiento de archivos transitorios en formato COMTRADE, los cuales contienen información de los eventos de falla reales o simulados.

Para la elaboración de archivos en formato COMTRADE de eventos simulados, se definen fallas internas y externas a la línea con y sin presencia de la saturación en los transformadores de corriente (TCs), los cuales deben ser considerados para asegurar una correcta operación de la función 87L. Para ello, se modela un SED de prueba en el software de análisis de eventos transitorios ATP.

En el caso de archivos en formato COMTRADE de fallas reales, la aplicación desarrollada presentará una opción de localización para el primer punto de corriente diferencial que ingresa en la zona de operación y para el primer punto de corriente con el que la función 87L da la orden de disparo.

Ya que la herramienta computacional desarrollada incorpora los algoritmos de la función 87L de varios IEDs comerciales, también permite trasladar los ajustes de una marca de relé a otra, para evaluar la respuesta de su característica de operación a fin de incrementar su sensibilidad y seguridad, logrando así una mejora en el desempeño del IED.

Finalmente, para cada falla analizada se muestra la representación gráfica de los puntos de corriente procesados y su ubicación tanto en el plano de corriente diferencial de cada IED como en el eje del tiempo, permitiendo así una mejora en la interpretación de los resultados obtenidos para la función 87L.

Este trabajo presenta la siguiente estructura a fin de brindar una mejor y mayor comprensión a los lectores, iniciando con el Marco Teórico, capítulo en el cual se describe al sistema de protección de corriente diferencial de línea detallando las limitantes que existen entre las distintas características de operación de los IEDs comerciales y exponiendo las generalidades del estándar IEEE C37.233-2009. Se continúa con la Metodología, capítulo en el que se presenta el análisis comparativo y la contrastación gráfica de las características de operación de la función 87L de varios IEDs comerciales, a fin de establecer sus ajustes cumpliendo criterios de sensibilidad y seguridad ante la presencia de fallas en una línea de subtransmisión en específico. En el capítulo Resultados y Discusión, se muestra la validación de la metodología planteada y de la herramienta desarrollada exponiendo el análisis realizado en los casos de estudio propuestos. Finalmente, en el capítulo Conclusiones se evidencian las mejoras obtenidas en los ajustes y por lo tanto en el desempeño de la protección diferencial de línea de IEDs comerciales.

1.1 Pregunta de investigación

Actualmente en el Ecuador los estudios de coordinación de protecciones para definir los ajustes de la función de protección 87L se basan en los valores por defecto sugeridos por los fabricantes de IEDs, sin embargo, respecto a la validación de estos ajustes para una línea de subtransmisión o distribución en específico: ¿Existe una herramienta que permita realizar un análisis comparativo de varias características de operación de IEDs comerciales con el fin de determinar aquella que presente un mejor desempeño y permita mejorar la sensibilidad y seguridad de un sistema de distribución?

1.2 Objetivo General

Desarrollar una herramienta computacional que, mediante el procesamiento de señales de voltaje y corriente almacenados en archivos COMTRADE de eventos de falla reales o simulados, permita evaluar y comparar el desempeño, además de proponer los ajustes, de la protección diferencial de línea de distintos relés comerciales.

1.3 Objetivos Específicos

- Establecer criterios para los ajustes de la protección diferencial de línea 87L en base a la revisión del estado del arte.
- Desarrollar una herramienta computacional que permita analizar de manera comparativa varias características de operación de la función de protección diferencial de línea y establecer la que presenta mejor desempeño, en base al procesamiento de archivos transitorios en formato COMTRADE obtenidos de casos reales o simulados.
- Desarrollar un procedimiento de ajustes de la protección diferencial de corriente en las líneas que conectan los SEDs, en base a la característica de operación determinada con mejor desempeño.
- Validar la herramienta computacional y el procedimiento de ajustes propuestos, empleándolos en un sistema eléctrico de distribución de prueba.

1.4 Alcance

El presente trabajo de titulación plantea desarrollar un procedimiento que analice el comportamiento de la corriente diferencial y permita de manera visual validar los valores de ajuste de la función de protección de corriente diferencial de línea (87L), para lo cual se desarrollará una herramienta computacional en MATLAB usando el entorno de

programación visual, AppDesigner, que facilite el ajuste de esta función de protección para líneas de subtransmisión, distribución o para aquellas líneas que conforman el punto de conexión entre las empresas transmisoras y distribuidoras. Para ello, la herramienta deberá incorporar los algoritmos de cálculo de la corriente diferencial y de restricción de los principales fabricantes presentes en la industria eléctrica, por ejemplo: Schweitzer Engineering Laboratories (SEL), Schneider Electric, NR Electric, ABB y Siemens, los mismos que serán validados mediante la lectura de registros oscilográficos reales.

Los algoritmos de la función 87L de cada fabricante programados en la herramienta, corresponderán exclusivamente a los algoritmos diferenciales de fase. Cabe mencionar que, el algoritmo diferencial del fabricante SEL corresponde a la característica diferencial básica del Plano Alpha. De igual manera, los demás fabricantes incorporan en sus algoritmos características diferenciales porcentuales, las cuales están referenciadas en los manuales de usuario.

Las líneas planteadas para el análisis del desempeño de la función 87L corresponden a las redes de la Empresa Eléctrica Regional CENTROSUR C. A., específicamente a las líneas de subtransmisión: Arenal – Cerezos y Turi - Lentag, ambas a un nivel de 69 kV y de las cuales la empresa ha proporcionado registros oscilográficos reales de sus dos extremos, además de presentar distintos fabricantes para la aplicación del esquema de protección 87L, SEL y ABB respectivamente. Se plantea también el análisis en la línea Sinincay – Cañar de 69 kV, la cual representa uno de los puntos de enlace entre la empresa distribuidora (CENTROSUR) y la empresa transmisora (CELEC EP TRANSELECTRIC). Puesto que, la funcionalidad de la herramienta abarcará la lectura de registros oscilográficos reales o simulados, se realizará el modelamiento y simulación de un sistema de prueba que incluya las líneas de enlace ya mencionadas. Esto se realizará en el software ATPDraw, para posteriormente generar archivos transitorios en los cuales se encontrará la información del evento de falla simulado.

Para el caso del análisis pos-falla del desempeño del esquema de protección 87L de las líneas de subtransmisión Arenal – Cerezos y Turi – Lentag de 69 kV, se validarán los algoritmos de la función 87L programados. Por otra parte, se validarán los ajustes actuales que se encuentran seteados en los IEDs de las líneas en análisis, estableciendo posibles ajustes con una mayor sensibilidad ante eventos de falla al realizar el procesamiento de los registros oscilográficos en la herramienta computacional propuesta.

En la etapa de simulación se analizará la línea de subtransmisión Sinincay – Cañar de 69 kV, se obtendrán los archivos en formato COMTRADE para varios tipos de eventos de falla

abarcando: fallas internas al 10, 50 y 90 % de la línea y fallas externas en cada extremo de la línea. La simulación de las fallas antes mencionadas se realizará tomando en cuenta sus principales características como son: altas impedancias, saturación de los TCs, efecto infeed, además se analizará el flujo de potencia en estado de operación normal del esquema de protección 87L.

Una vez obtenidos los archivos transitorios de los eventos simulados en el sistema de estudio, se procederá a realizar el ajuste y validación de los parámetros de la función de protección 87L sugeridos por el fabricante de los relés asociados a la línea en análisis. Finalmente se presentarán los resultados obtenidos luego del procesamiento de los archivos en formato COMTRADE en la herramienta computacional realizada.

1.5 Marco Teórico

En esta sección se describe al sistema de protección de corriente diferencial de línea detallando las limitantes que existen entre las distintas características de operación de los IEDs comerciales.

Adicionalmente, se exponen las generalidades del estándar IEEE C37.233-2009 enfocado en las pruebas que se deben simular considerando la saturación de los transformadores de corriente (TCs) de una línea de subtransmisión o distribución, para obtener los ajustes adecuados de la protección de corriente diferencial.

1.5.1. Protección de Corriente Diferencial (87L)

El principio de corriente diferencial es considerado como el método de protección de cortocircuitos más eficiente, el cual responde a las corrientes que limitan una zona de protección [5]. Actualmente, debido al avance tecnológico de los sistemas microprocesados, la protección de corriente diferencial es considerada como una función de protección que forma parte de los Dispositivos Electrónicos Inteligentes (IEDs). La Figura 1.1 presenta de manera general los bloques internos que integran la función 87L.

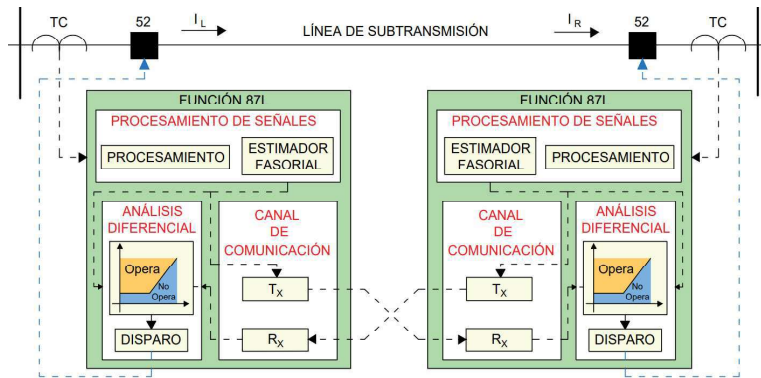


Figura 1.1. Esquema lógico simplificado de la función 87L [6].

Transformadores de Corriente (TC):

Son instrumentos de medida que permiten obtener información determinante en el comportamiento de un sistema eléctrico, tanto para condiciones normales de operación como para eventos de falla. En este caso, suministran señales de corriente en magnitudes proporcionalmente inferiores para que puedan ser procesadas por los IEDs.

Procesamiento de señales:

Se considera a todos los componentes y algoritmos internos de los IEDs encargados del muestreo, conversión y tratamiento de señales analógicas para obtener cantidades fasoriales, en el caso de la función 87L hace referencia a las señales de corriente suministradas por los (TCs) que están conectados a la línea.

Característica de Operación:

Contempla a los algoritmos internos de cada IED comercial mediante los cuales se diferencia entre las condiciones normales de operación de la línea protegida y los eventos de falla internos (dentro de la línea) y externos (fuera de la línea), con el fin de enviar o no la orden de disparo hacia el disyuntor.

Canal de Comunicación:

Comprende a todos los medios de comunicación por los cuales se envía y recibe datos (R_x y T_x respectivamente) para ser procesados por los relés de protección. En este caso, hace referencia a la transmisión y recepción de las mediciones de corriente desde un extremo de la línea protegida hacia el otro.

En lo que respecta al desempeño del relé, el adecuado funcionamiento de los bloques mencionados idealmente conlleva a una mayor confiabilidad y seguridad en la operación del relé. Sin embargo, en [3] se menciona que el desempeño de la función 87L puede verse

afectado por los algoritmos internos de protección y por problemas en los canales de comunicación. Por tales motivos y enfocándose en el alcance de este trabajo, se presenta las características de operación de los IEDs comerciales considerados para su análisis.

1.5.2. Características de Operación de IEDs Comerciales

El principio básico de la función 87L se basa en la comparación de las corrientes que entran y salen de la línea protegida. En este contexto y hasta la actualidad, se pueden encontrar dos conceptos para representar las características de operación en IEDs comerciales, estos son: la característica diferencial porcentual con sus variantes (simple o doble) y la característica diferencial plano alpha [7].

1.5.2.1. Característica Diferencial Porcentual de la función 87L

Típicamente cuando se representa de manera gráfica la característica porcentual de función 87L en el plano cartesiano (ver Figura 1.2), se consideran dos elementos básicos, estos son: la corriente diferencial y la corriente de restricción [1] [4].

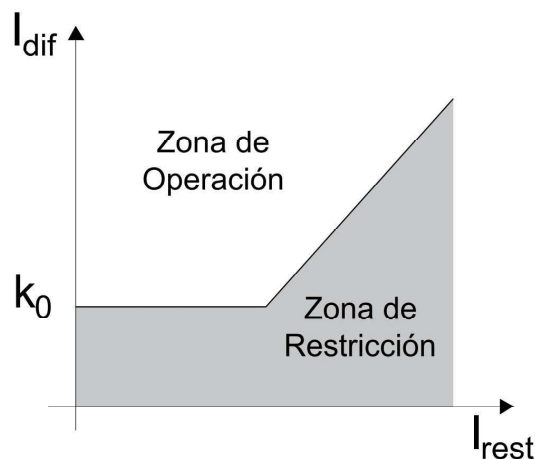


Figura 1.2. Característica diferencial porcentual simple [1].

La corriente diferencial (I_{dif}) representa a la diferencia existente entre los fasores de las corrientes que entran y salen de la línea, y además es la encargada de determinar la operación del relé. Por otra parte, la corriente de restricción (I_{rest} o I_{bias}) describe el balance entre los fasores de corriente que entran y salen de la línea [7]. Usualmente, en la literatura de protecciones el cálculo de las cantidades diferenciales y de restricción están dadas por las siguientes ecuaciones [4]:

$$I_{dif} = |I_L + I_R| \quad (1)$$

$$I_{rest} = |I_L| + |I_R| \quad (2)$$

Donde I_L e I_R son las corrientes medidas en los extremos de la línea. Ver Figura 1.1.

El objetivo de la corriente I_{rest} es brindar mayor seguridad al algoritmo de corriente diferencial, esto surge debido a que en la práctica la corriente I_{dif} bajo condiciones normales de operación no es igual a cero, principalmente por errores de medición de los TCs o por fallas en el tiempo de sincronización de los canales de comunicación [8]. Por lo tanto, la orden de disparo de la función 87L del IED se ve condicionada al cumplimiento de la lógica de corrientes $I_{dif} > I_{rest}$, siempre y cuando se encuentre por encima del mínimo valor de corriente umbral (k_0).

La corriente de restricción I_{rest} puede ser obtenida de varias formas, esto depende de los algoritmos internos de la función 87L según el modelo y la marca del IED. Es decir, a nivel comercial la función diferencial porcentual presenta variantes en su característica de operación. A continuación, se describen las características de operación porcentual de la función 87L de los principales IEDs comerciales existentes en el mercado, tales como: Schneider Electric, NR Electric, ABB, Siemens, entre otros.

1.5.2.1.1. Primera Variante

Esta variante tiene un método de cálculo de corriente I_{rest} en el cual se eleva efectivamente el ajuste del relé de manera proporcional al valor de la corriente de falla. Por lo tanto, la corriente de restricción representa el valor mayor del promedio de la intensidad medida en las tres fases presentes en cada extremo de la línea [9].

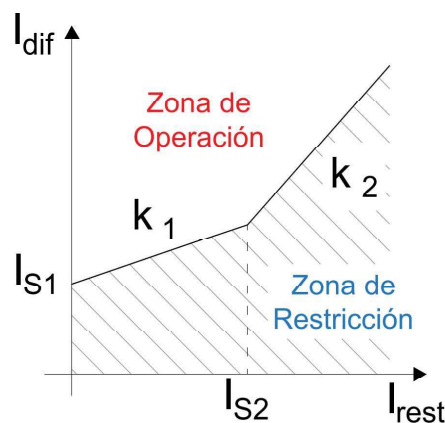


Figura 1.3. Característica de Operación Porcentual Doble – Primera Variante [9].

$$I_{dif} = |I_L + I_R| \quad (3)$$

$$I_{rest} = \frac{|I_L| + |I_R|}{2} \quad (4)$$

La Figura 1.3 presenta la característica de operación porcentual doble de este fabricante, la cual consta de cuatro ajustes:

- I_{S1} , determina el ajuste del nivel mínimo de corriente diferencial para el arranque del relé.
- k_1 , corresponde al ajuste de la primera pendiente de la característica de operación.
- I_{S2} , determina el ajuste del valor umbral de corriente de restricción sobre el cual se utiliza la pendiente k_2 .
- k_2 , corresponde al ajuste de la segunda pendiente de la característica de operación.

La Tabla 1.1 presenta los criterios de disparo de la función 87L en esta característica de operación.

Tabla 1.1. Criterios de disparo - Primera variante [9].

Sección	Criterio de disparo
$ I_{rest} < I_{S2}$	$ I_{dif} > k_1 \cdot I_{rest} + I_{S1}$
$ I_{rest} > I_{S2}$	$ I_{dif} > k_2 \cdot I_{rest} - (k_2 - k_1) \cdot I_{S2} + I_{S1}$

1.5.2.1.2. Segunda Variante

En esta segunda variante se tiene un método de cálculo de la corriente I_{rest} segregado por fases. Se establecen dos secciones para la característica de operación: la primera sección o de baja pendiente, está destinada a una mayor sensibilidad para fallas internas leves, y la segunda sección o de pendiente alta, está destinada a evitar el ingreso de grandes corrientes desequilibradas [10].

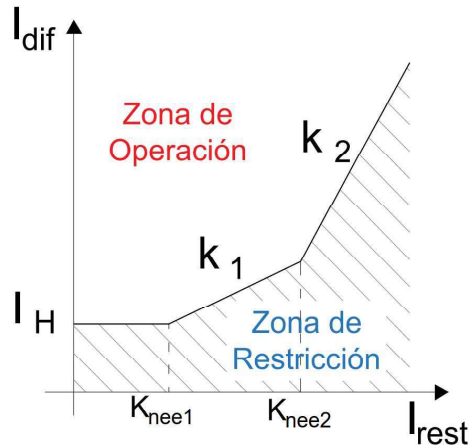


Figura 1.4. Característica de Operación Doble Porcentual – Segunda Variante [10].

$$I_{dif} = |I_L + I_R| \quad (5)$$

$$I_{rest} = |I_L| + |I_R| \quad (6)$$

La Figura 1.4 presenta la característica de operación porcentual doble de este fabricante, la cual consta de los siguientes ajustes:

- I_H , determina el ajuste del nivel mínimo de corriente diferencial de arranque del relé.
- k_1 y k_2 , corresponde al valor de baja y alta pendiente respectivamente.
- K_{nee1} y K_{nee2} , determina los ajustes de los valores umbrales de la corriente de restricción sobre las cuales actúan las pendientes k_1 y k_2 .

La Tabla 1.2 presenta los criterios de disparo de la función 87L en esta característica de operación.

Tabla 1.2. Criterios de disparo - Segunda variante [10].

Sección	Criterio de disparo
$ I_{rest} < K_{nee1}$	$ I_{dif} > I_H$
$K_{nee2} \leq I_{rest} < K_{nee2}$	$ I_{dif} > (I_H + k_1(I_{rest} - K_{nee1}))$
$ I_{rest} > K_{nee2}$	$ I_{dif} > (I_H + k_1(I_{rest} - K_{nee2}) + k_2(I_{rest} - K_{nee2}))$

1.5.2.1.3. Tercera Variante

En esta variante se tiene un método de cálculo de la corriente I_{rest} por cada fase, sin embargo, para el funcionamiento del algoritmo interno se toma el máximo valor obtenido entre las fases. Se establecen tres secciones en la característica de operación. Las dos

primeras secciones presentan mayor selectividad destinadas a la detección de fallas internas leves. Mientras la tercera sección, brinda mayor seguridad para fallas externas o condiciones no perturbadas [11]. Esto se muestra en la Figura 1.5.

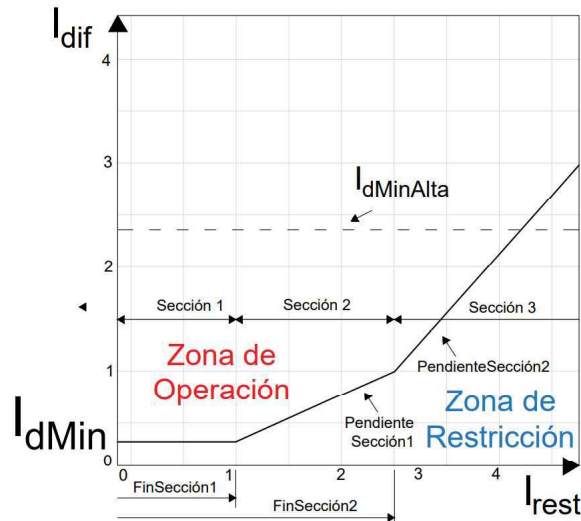


Figura 1.5. Característica de Operación Doble Porcentual - Tercera Variante [11].

$$I_{dif} = |I_L + I_R| \quad (7)$$

$$I_{rest} = |I_L| + |I_R| \quad (8)$$

Esta variante presenta los siguientes ajustes:

- I_{dMin} , determina el ajuste del nivel mínimo de corriente diferencial para el arranque del relé.
- $PendienteSección_1$ y $PendienteSección_2$, corresponden al valor de baja y alta pendiente respectivamente.
- $FinSección_1$ y $FinSección_2$, determinan los ajustes de los valores umbrales de la corriente de restricción sobre las cuales actúan las pendientes $PendienteSección_1$ y $PendienteSección_2$.

La Tabla 1.3 presenta los criterios de disparo de la función 87L en esta característica de operación.

Tabla 1.3. Criterios de disparo - Tercera variante [11].

Sección	Criterio de disparo
Sección 1	$ I_{dif} > I_{dMin}$
Sección 2	$ I_{dif} > (I_{dMin} + PendienteSección_1 (I_{rest} - FinSección_1))$
Sección 3	$ I_{dif} > (I_{dMin} + PendienteSección_1 (I_{rest} - FinSección_2) \dots + \dots + PendienteSección_2 (I_{rest} - FinSección_2))$

1.5.2.1.4. Cuarta Variante

Esta característica de operación incluye en el cálculo de la corriente I_{rest} una aproximación de los errores que presentan los TC en condiciones normales de operación y también en condiciones de falla. Para este fin, se utilizan los errores de TC definidos en el estándar IEC 60044 -1, estos son [12]:

- *Error A del TC:* considera el error del transformador con intensidad nominal multiplicado por un factor de seguridad. Hace referencia a la divergencia entre la corriente medida y la corriente nominal primaria.
- *Error B del TC:* considera el error del transformador a intensidad nominal multiplicado por un factor de seguridad para sobrecorriente.

La característica de operación, así como las ecuaciones para el cálculo de la cantidad diferencial y de restricción para esta variante se presentan a continuación:

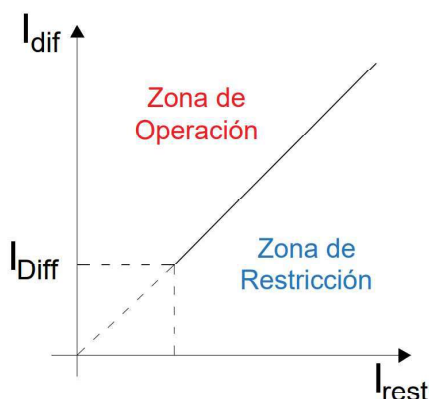


Figura 1.6. Característica de Operación Doble Porcentual - Cuarta Variante [12].

$$I_{dif} = |I_L + I_R| \quad (9)$$

$$I_{rest} = I_{Diff} + |I_L| \cdot \text{ErrorA}_{TC_L} + |I_R| \cdot \text{ErrorA}_{TC_R} \quad (10)$$

$$I_{rest} = I_{Diff} + |I_L| \cdot \text{ErrorB}_{TC_L} + |I_R| \cdot \text{ErrorB}_{TC_R} \quad (11)$$

La Figura 1.6 presenta la característica de operación porcentual doble de esta variante, la cual consta de los siguientes ajustes:

- I_{Diff} , determina el ajuste del nivel mínimo de corriente diferencial para el arranque del relé.
- I_{rest} , es calculada según el nivel de la corriente de falla medida por la protección, en el caso de que esta corriente sea mayor que el valor umbral $I_{dMinAlta}$ se utiliza la expresión (11), mientras que para valores de corriente de falla menores a este umbral se utiliza la expresión (10). Los errores A o B de los TCs son utilizados dependiendo de la expresión empleada para el cálculo de I_{rest} .

1.5.2.1.5. Representación de condiciones normales de operación del sistema en el plano diferencial porcentual

En condiciones normales de operación de un sistema eléctrico, las corrientes: diferencial y de restricción, no representan en el plano porcentual puntos de disparo de la función 87L, puesto que generalmente su valor es menor a la corriente diferencial umbral asignada en los ajustes del IED (ver Figura 1.7).

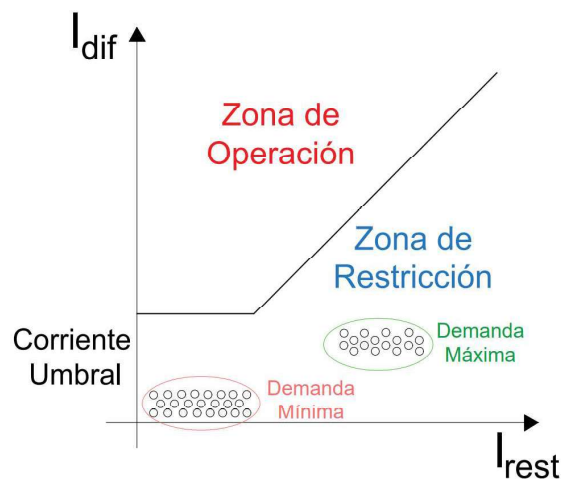


Figura 1.7. Condiciones de operación en la característica diferencial porcentual.

Una vez presentado las distintas variantes de la característica diferencial porcentual que utilizan los principales IEDs comerciales para determinar la operación de la función 87L

ante demandas de carga, fallas internas y externas respecto a la línea protegida, se continua con la descripción de la segunda característica de operación de la función diferencial.

1.5.2.2. Característica Diferencial Plano Alpha de la función 87L

La característica de operación plano alpha se basa en la comparación de la relación entre la corriente del relé local I_L y la corriente del relé remoto I_R , es decir, compara magnitudes y ángulos individuales de las corrientes de la zona protegida [4].

Tradicionalmente, para esta característica la relación de corrientes es calculada por la siguiente expresión:

$$K = I_R / I_L \quad (12)$$

La Figura 1.8 presenta la característica de operación, la cual consisten en una región circular centrada en el origen del plano complejo de corrientes y que constituye la frontera entre las zonas de operación y de restricción.

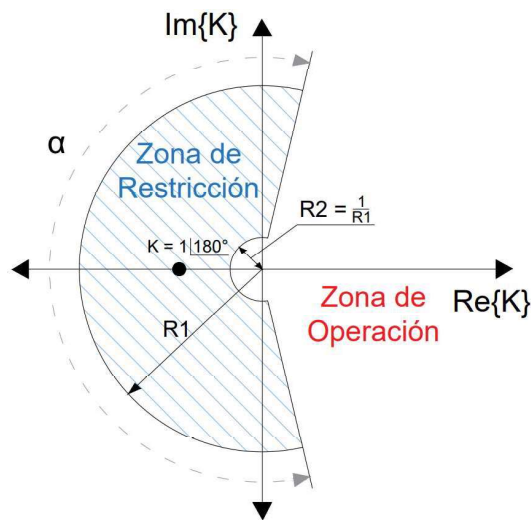


Figura 1.8. Característica Diferencial Plano Alpha [4].

Esta característica de operación presenta típicamente dos parámetros de ajuste, el radio de bloqueo R_1 y el ángulo de cobertura α , cuyos valores se encuentran generalmente para R_1 entre 5 y 10 [pu], y para α entre 160° y 210° . El radio menor R_2 es calculado implícitamente como el inverso de R_1 .

1.5.2.2.1. Representación de condiciones normales de operación del sistema en el plano diferencial plano alpha

En condiciones de equilibrio, idealmente las dos corrientes de la línea a proteger (I_L e I_R) son iguales en magnitud y opuestas en fase. Esto produce que el punto de operación K tenga un valor de $1 \angle 180^\circ$ [1] y se ubique en la zona de restricción. Sin embargo, debido al retraso de canal presente en el sistema de comunicación (fibra óptica, red de datos, etc.) que utiliza la función 87L, el valor del ángulo del punto de operación K puede variar entre $\pm 21.6^\circ$ [6].

Con base a la Figura 1.9, se muestra la importancia de proporcionar canales de comunicación dedicados y de alta fidelidad, a fin de reducir el efecto que producen los errores por retraso en la transmisión de datos.

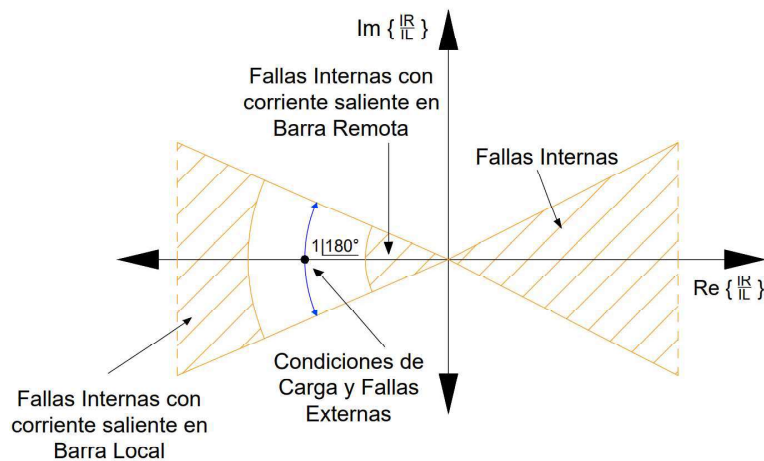


Figura 1.9. Condiciones de operación en la característica diferencial plano alpha [6].

Una vez que se han descrito las variantes de las características de operación más usadas por los IEDs comerciales y su operación ante condiciones normales, fallas internas y externas en un sistema eléctrico, se continúa con la explicación del efecto que provoca la saturación de los TCs en la operación de la función 87L.

1.5.3. Errores de la función 87L por saturación de TCs

Debido a que la función 87L depende esencialmente de la seguridad y precisión que brinden los transformadores de corriente, es necesario explicar los inconvenientes que se tienen cuando el núcleo ferromagnético de los TCs se encuentra saturado, ya sea por altas corrientes o por un burden (carga conectada al devanado secundario del TC) elevado.

El núcleo ferromagnético por naturaleza tiene características de excitación no lineal, es decir, durante eventos de cortocircuitos, excitación u otros procesos electromagnéticos

complejos e inusuales, el TC puede llegar a saturarse y conducir a la distorsión de la corriente secundaria, interfiriendo con la operación correcta del IED [13].

Para evitar esto, se debe asegurar que bajo condiciones críticas los TCs operen en la zona lineal de su curva de magnetización (ver Figura 1.10), proporcionando así la suficiente corriente para que el IED opere adecuadamente. En este contexto, se debe asegurar lo siguiente [14]:

- Un núcleo de buena calidad para trabajar a bajos niveles de saturación.
- No trabajar con un burden que exceda al nominal.
- No trabajar a circuito abierto, ya que se puede llegar a una sobresaturación e inducir altos voltajes en el devanado secundario.

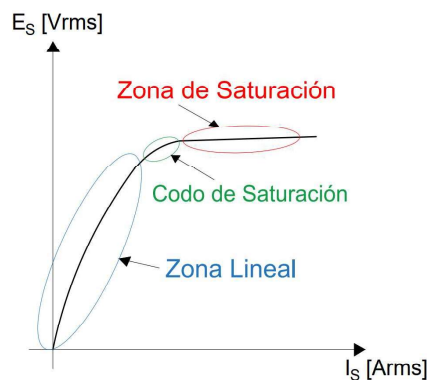


Figura 1.10. Curva de saturación para TCs.

En el contexto de la función 87L, la saturación de TCs no es un problema para las fallas internas, sin embargo, sí constituye un inconveniente para las fallas externas con un grado desigual de saturación en los TCs de los extremos de la línea. Cuando el TC de un extremo de la línea se satura, y el otro no, las corrientes secundarias que ingresan en los IEDs causan que se mida una corriente diferencial, lo cual provoca una mala operación de la protección. La Figura 1.11 presenta las ondas de corriente durante la saturación del núcleo del TC de un extremo de la línea ante una falla trifásica externa [15].

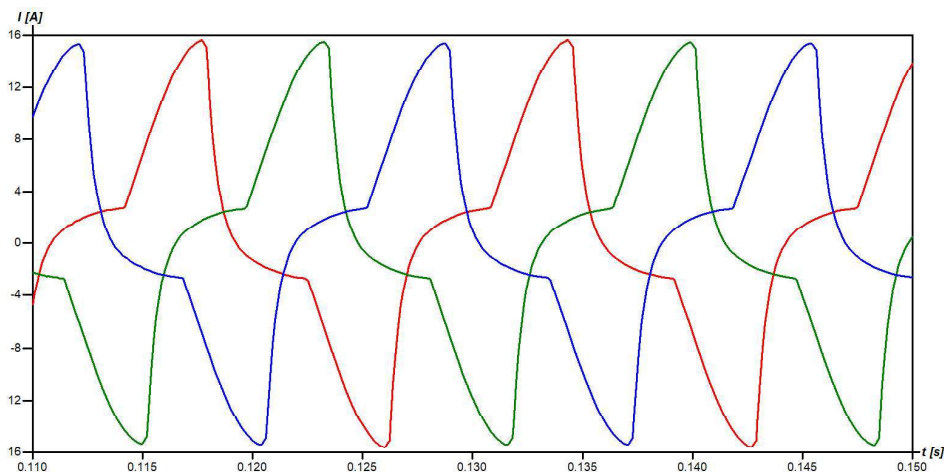


Figura 1.11. Saturación de TC ante una falla trifásica externa.

Dependiendo del tipo de IED comercial, la función 87L incorporada puede estar equipada con un detector de saturación de TC, el cual modifica adaptivamente el sesgo o pendiente de la característica diferencial porcentual (ver Figura 1.12).

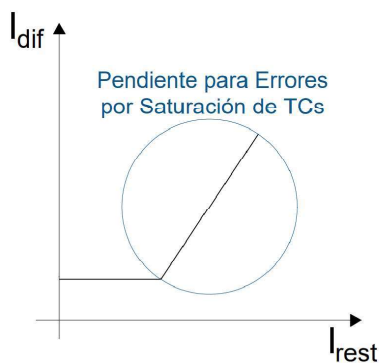


Figura 1.12. Pendiente para errores por saturación de TCs [15].

El efecto de la saturación y otros errores de TCs deben ser considerados en la configuración de los ajustes de la función 87L sin importar la marca del IED, es decir, estos ajustes deben evitar una sensibilidad excesiva y brindar un margen seguridad. Para ello, según se recomienda en [15], para características porcentuales se debe modificar el ajuste de las pendientes, mientras que para la característica plano alpha se debe variar el radio de cobertura menor.

Como parte del alcance de este trabajo y en base a la revisión del estado del arte, se plantea un esquema de pruebas transitorias necesarias para definir un ajuste adecuado de la función 87L al realizar el análisis de una línea de subtransmisión o distribución específica.

1.5.4. Esquema de Pruebas de Ajuste para la Función 87L

La característica de operación de la función 87L debe ser ajustada de manera específica para una línea y no únicamente cumplir con lo sugerido por el fabricante, esto debido al distinto comportamiento que posee respecto a otros elementos de un sistema eléctrico como generadores, barras o transformadores, y principalmente por la amplia variedad de fallas que pueden ocurrir en una línea de subtransmisión o distribución [16].

Si bien el estándar IEEE Std. C37.243-2015 se encuentra enfocado en la aplicación de la función de corriente diferencial para relés que utilizan comunicación digital, este estándar no presenta un apartado donde se indiquen las pruebas que se deben realizar para ajustar los parámetros de la característica de operación de la función 87L para una línea de manera específica.

Por lo tanto, la Tabla 1.4 presenta el conjunto de las fallas que son consideradas en este trabajo para realizar el análisis de la respuesta de las características de operación mencionadas en la sección 1.5.2.

Tabla 1.4. Esquema de pruebas para el ajuste de la función 87L.

Tipo de Falla	Ubicación de la Falla [%] línea	Con Saturación de TCs		Sin Saturación de TC	
		<i>Impedancia de Falla</i>		<i>Impedancia de Falla</i>	
		<i>Alta [Ω]</i>	<i>Baja [Ω]</i>	<i>Alta [Ω]</i>	<i>Baja [Ω]</i>
Configuración para Fallas Internas					
<ul style="list-style-type: none"> • Trifásica (3F) • Bifásica (2F) • Bifásica a tierra (2FG) • Monofásica (1F) 	10, 50 y 90	---	---	20	0 y 5
Configuración para Fallas Externas					
<ul style="list-style-type: none"> • Trifásica (3F) • Bifásica (2F) • Bifásica a tierra (2FG) • Monofásica (1F) 	Barra Local y Barra Remota	20	0 y 5	---	---

La representación gráfica de la ubicación del conjunto de pruebas enunciado en la Tabla 1.4 se presenta en la Figura 1.13.

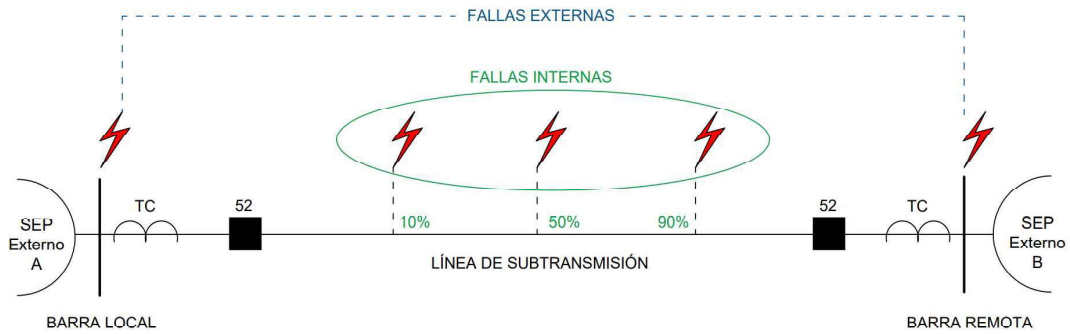


Figura 1.13. Representación gráfica de ubicación de fallas en la línea.

Se debe mencionar que, el conjunto de fallas a simular en el SED de estudio considera niveles bajos y altos de saturación en los TCs ubicados en un extremo de la línea, mientras los TCs del otro lado no presentan esta condición. De esta manera, se analiza la mayor cantidad de fallas posibles y sus peores condiciones las cuales pueden conllevar una mala operación de la protección.

Además, el análisis de la corriente de demanda máxima es considerada para establecer y validar el valor de la corriente diferencial umbral de la función 87L en cualquiera de sus variantes mencionadas.

2. METODOLOGÍA

En esta sección se presenta la metodología propuesta para analizar comparativamente las características de operación de la función 87L de varios IEDs comerciales y establecer los ajustes cumpliendo criterios de sensibilidad y seguridad para mejorar el desempeño de la protección diferencial ante la presencia de fallas en una línea de subtransmisión en específico.

2.1. Metodología para la Comparación y Ajuste de la Característica de Operación de la Función 87L en Función de Archivos Transitorios en formato COMTRADE

De acuerdo con el alcance establecido, en el caso de la característica porcentual, para determinar el valor de la corriente diferencial umbral y de las pendientes, o en el caso de la característica plano alpha, para determinar el valor del radio y ángulo de cobertura, el presente trabajo ha sido separado en tres etapas, tal como se muestra en la Figura 2.1.

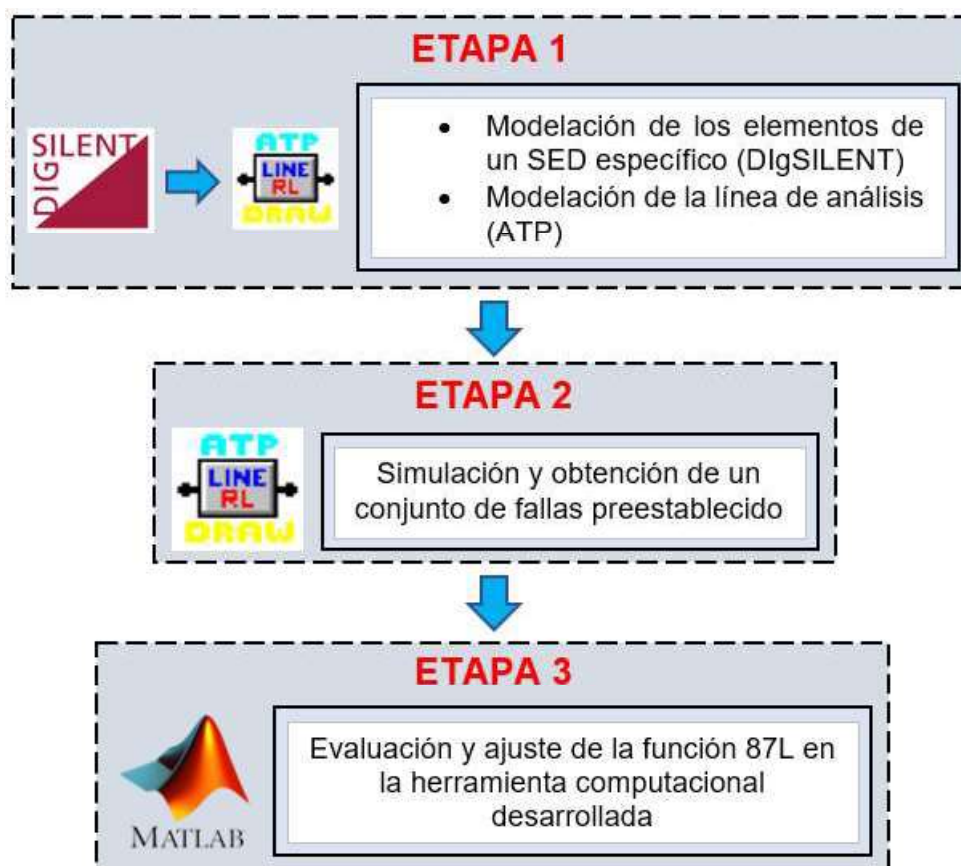


Figura 2.1. Metodología de ajuste propuesta.

A continuación, se describe de manera general lo contemplado en cada etapa de la metodología propuesta:

- *Etapa 1:* se enfoca en la modelación de los elementos de un sistema eléctrico de distribución de estudio para obtener los equivalentes Thévenin en ambos extremos de la línea de interés. Esta etapa se desarrolla en el software PowerFactory de DlgSILENT y ATP.
- *Etapa 2:* contempla la simulación del conjunto de fallas determinadas en las secciones anteriores para obtener archivos transitorios en formato COMTRADE. Esta etapa se desarrolla en el software de análisis transitorio ATP.
- *Etapa 3:* se encuentra dirigida al procesamiento de datos en la herramienta computacional desarrollada para el análisis de la característica de operación de la función 87L y el posterior ajuste de todas sus variantes descritas en este trabajo. Esta última etapa es desarrollada en el entorno de programación de MATLAB.

2.1.1. Etapa 1 – Modelación de los elementos de un SED específico

En esta etapa se realiza la modelación del sistema eléctrico de distribución en DlgSILENT PowerFactory, considerando la información necesaria de la topología y parámetros eléctricos de los elementos del sistema, tales como: acoplamiento mutuo de las líneas, retorno por tierra, o la afectación por la transposición.

En tal aspecto, para la modelación de las líneas de subtransmisión se debe disponer de información de su estructura, geometría y tipo de conductores, y para los instrumentos de medición como TCs y Transformadores de Potencial (TPs): la relación de transformación y su curva de saturación en valores rms o en flujo magnético. Por lo tanto, en esta etapa se describe la modelación del sistema de la Figura 2.2, sobre el cual se obtendrán las impedancias de las fuentes equivalentes ubicadas en los extremos de la línea de interés Sinincay – Cañar a 69 kV.

El sistema de estudio contempla el escenario de máxima demanda teniendo un flujo de potencia por la línea interés es de 13.4 [MW] en potencia activa y 4 [MVA_r] de potencia reactiva, con una corriente de 117 [A].

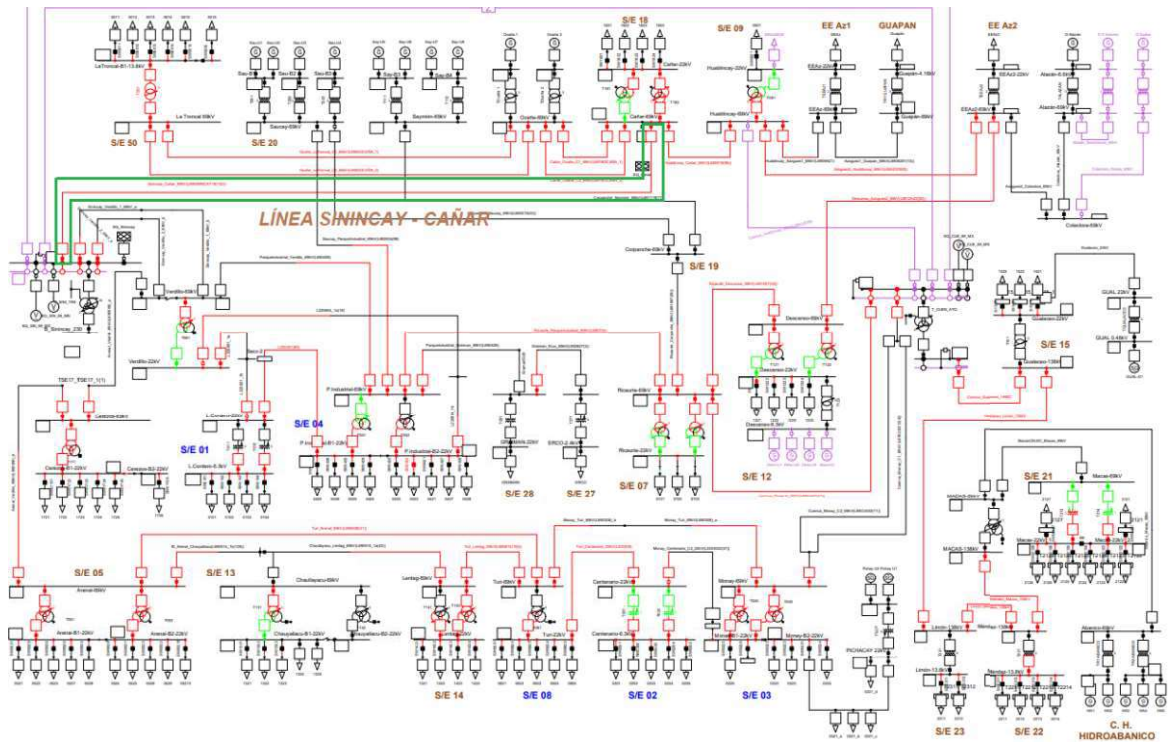


Figura 2.2. Modelación del sistema eléctrico de distribución Regional Centro Sur.

2.1.1.1. Modelación de las líneas de subtransmisión

Las líneas de subtransmisión deben ser modeladas con su geometría seleccionando la estructura Tower Geometry Type (TyGeo). La Figura 2.3 presenta el ingreso de los conductores de las líneas con un modelo PI omitiendo su transposición.

Conductor Types of Line Circuits:

Circuit	Conductor Types TypCon	Num. of Phases	Transposition	System
Circuit 1	ACAR 750 18/19	3	<input type="checkbox"/>	AC

Types of Earth Conductors:

Earth Conductor	Conductor Types TypCon
Earth Conductor 1	OPGW 69kV

Coordinate of Line Circuits [m]:

	X1	X2	X3	Y1	Y2	Y3
Circuit 1	1.5	-1.5	1.5	11.8	12.9	14.

Coordinate of Earth Conductors [m]:

	X	Y
Earth Conductor 1	0,	16.3

Figura 2.3. Parametrización de líneas de subtransmisión.

Adicionalmente, se presenta la Tabla 2.1 con los parámetros más importantes de la línea de estudio Sinincay – Cañar, la cual transfiere un flujo de potencia de 13.4 [MW] y 4 [MVAR].

Tabla 2.1. Parámetros de la línea Sinincay – Cañar a 69 kV.

Conductores de Fase						
Tipo:	ACAR 750 18/19					
Corriente nominal:	0.826 [kA]					
Resistencia a 20°C:	0.0816 [km / Ω]					
Radio Equivalente (GMR):	11.52 [mm]					
Diámetro Externo:	25.31 [mm]					
Material:	Aluminio					
Geometría:	X1 [m]	Y1 [m]	X2 [m]	Y2 [m]	X3 [m]	Y3 [m]
	1.5	11.8	-1.5	12.9	1.5	14
Conductor de Guarda						
Tipo:	OPGW 69 kV					
Corriente nominal:	1 [kA]					
Resistencia a 20°C:	0.475 [km / Ω]					
Diámetro Externo:	12.5 [mm]					
Material:	Aluminio					
Geometría:	X1[m]			Y1 [m]		
	0			16.3		

2.1.1.2. Modelación de fuentes equivalentes y TCs

Utilizando la herramienta de reducción de red que presenta PowerFactory, se obtienen las impedancias de secuencia: positiva, negativa y cero, de las fuentes equivalentes ubicadas en los extremos de la línea de interés Sinincay – Cañar (ver Figura 2.4 y Figura 2.5).

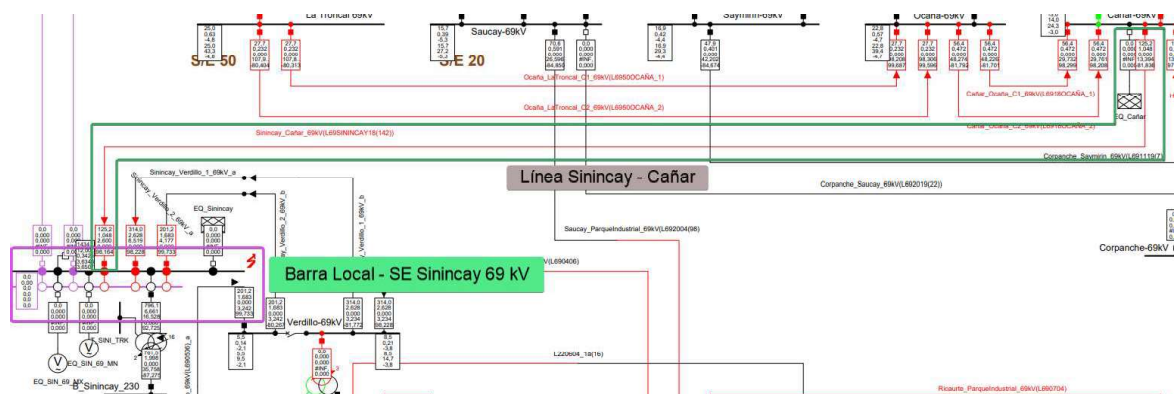


Figura 2.4. Equivalente de Red en SE Local - Sinincay 69 kV.

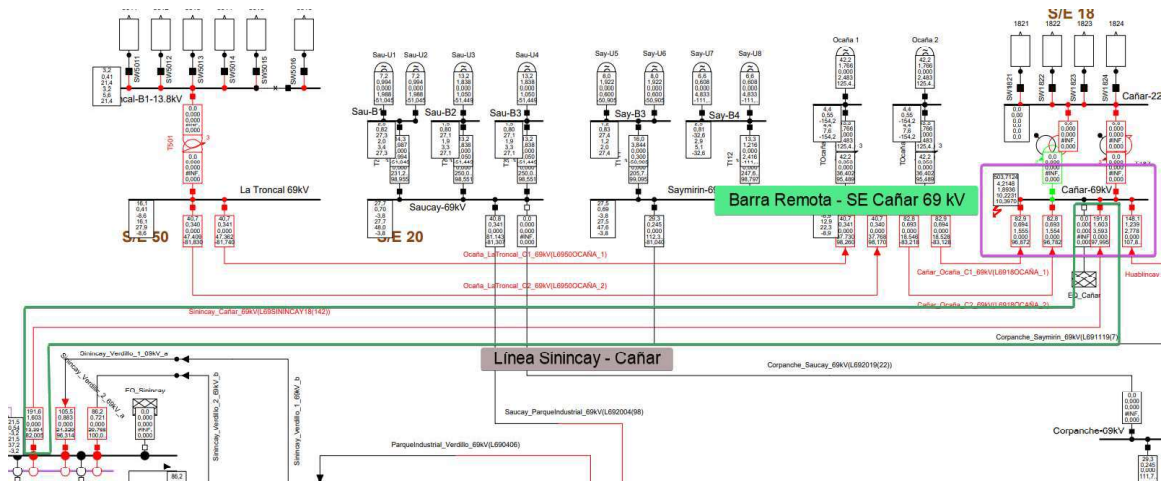


Figura 2.5. Equivalente de Red en SE Remota - Cañar 69 kV.

Posteriormente, se utiliza el software de análisis transitorio ATP en el cual se realiza el modelado de la línea de subtransmisión y de las fuentes equivalentes de sus extremos. Para la línea de interés, se ingresan los parámetros de la Tabla 2.1 en la rutina LCC de la biblioteca de ATP, mientras que las fuentes equivalentes se modelan como una fuente de voltaje en serie con una impedancia, esta impedancia toma los valores de secuencia positiva y cero obtenidos en la reducción de red de PowerFactory. Esto se muestra en la Figura 2.6.

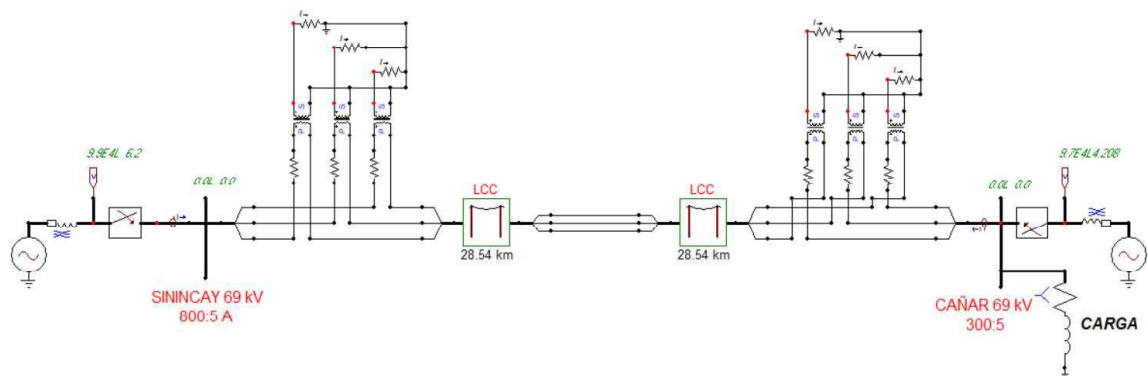


Figura 2.6. Modelación del SED reducido bajo estudio en ATP.

También se realiza la modelación de los TCs incluyendo su conexión y la curva de saturación en función de los voltajes y corrientes de excitación obtenidos de las pruebas de fabricante.

2.1.2. Etapa 2 – Simulación del conjunto de fallas preestablecido

En esta etapa se utiliza el esquema de fallas establecido en la sección 1.5.4. para esto se emplean los interruptores de tiempo controlado que están disponibles en la biblioteca de

ATP. Estos interruptores se encuentran conectados a las fases de la línea de subtransmisión y mediante una resistencia de falla producen el contacto a tierra según el tipo de falla interna a simular (ver Figura 2.7).

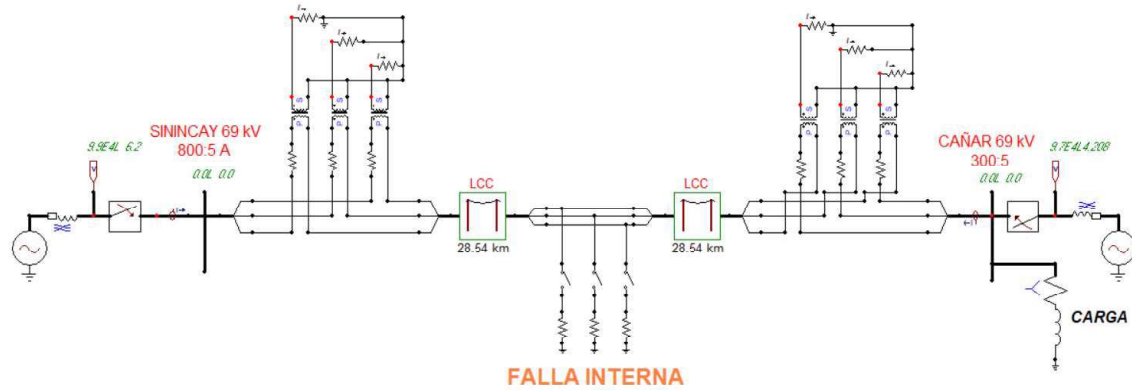


Figura 2.7. Configuración para simulación de fallas internas.

Por otra parte, para fallas externas los interruptores se conectan a las barras de Sinincay 69 kV y Cañar 69 kV, tal como muestra la Figura 2.8.

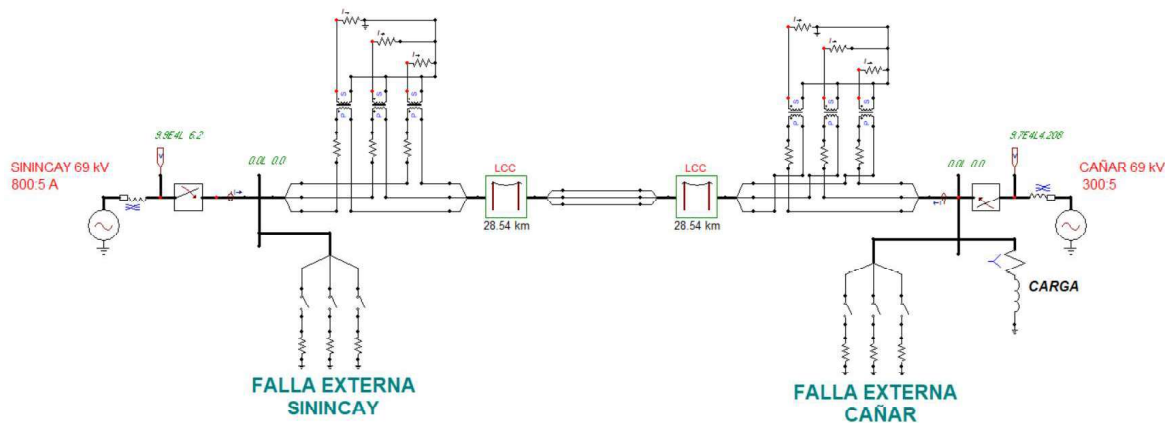


Figura 2.8. Configuración para simulación de fallas externas.

Tanto para la simulación de fallas internas como externas se establece un tiempo de prefalla de 100 ms y un tiempo de falla de 200 ms, teniendo un tiempo total de simulación de 300 ms.

La Figura 2.7 y la Figura 2.8 presentan con fines ilustrativos la configuración de los elementos de maniobra para una falla trifásica. Sin embargo, estos son modificados según el tipo de falla que se requiera simular, tomando como guía la configuración de los tipos de fallas presentadas en la Figura 2.9 [17].

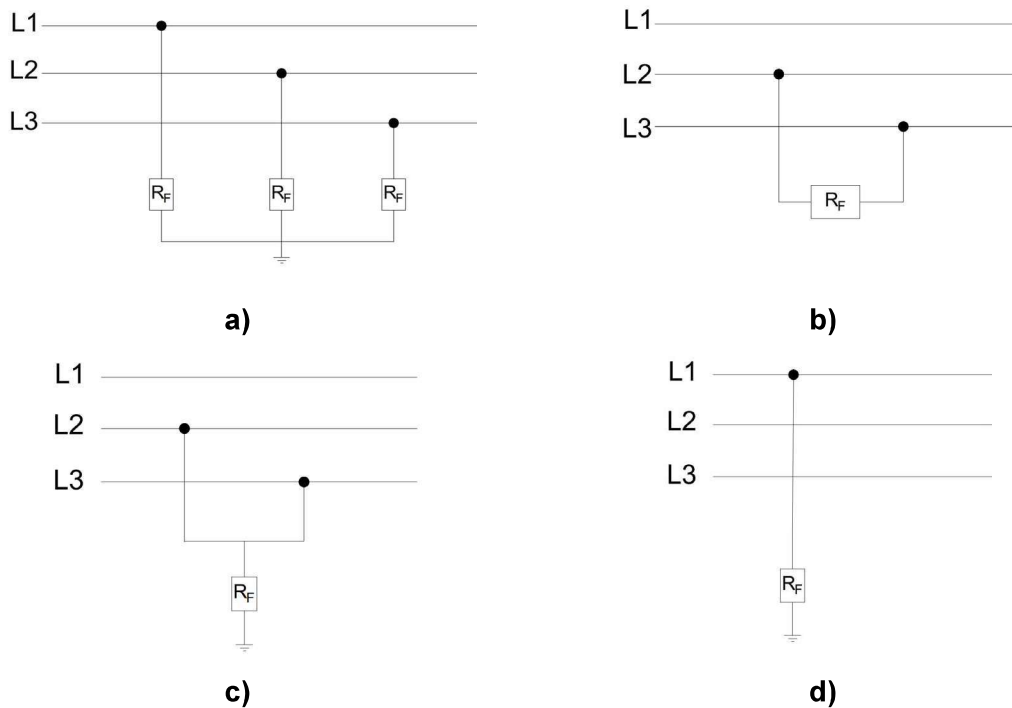


Figura 2.9. Configuración de tipos de fallas (cortocircuitos) a simular: **a)** Falla trifásica (3F), **b)** Falla bifásica (2F), **c)** Falla bifásica a tierra (2FG), **d)** Falla monofásica (1F) [17].

A partir de los resultados obtenidos en las simulaciones se extraen los archivos en formato COMTRADE de manera manual siguiendo lo establecido en el diagrama de flujo de la Figura 2.10.

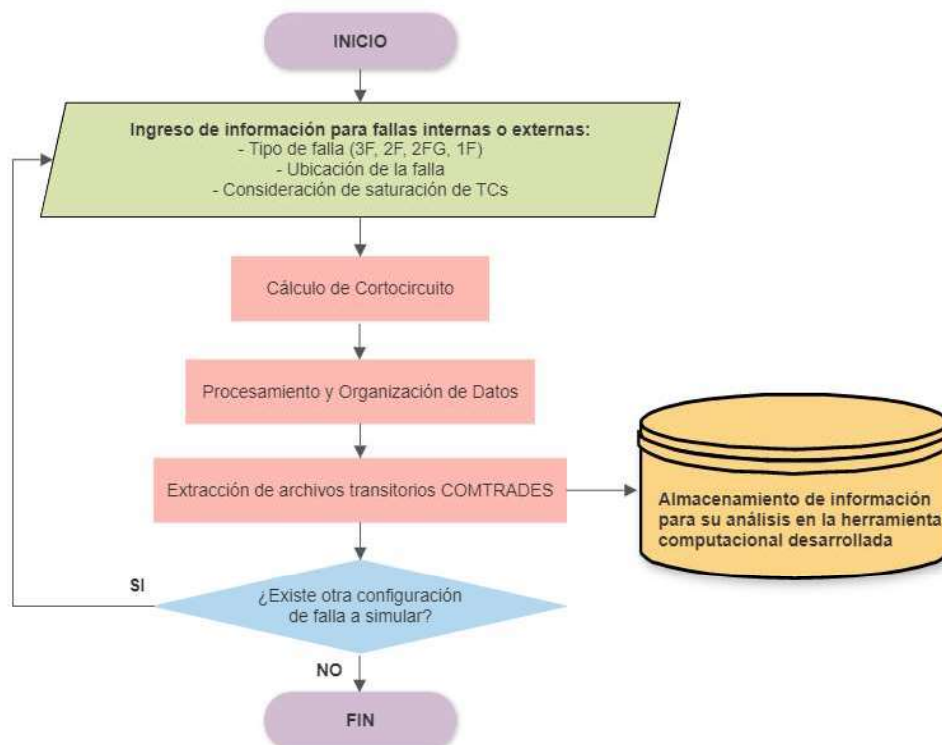


Figura 2.10. Diagrama de flujo para generación de archivos transitorios.

2.1.3. Etapa 3 – Evaluación y ajuste de la función 87L en la herramienta computacional desarrollada

Esta etapa se divide en dos secciones: la primera describe las principales características de la herramienta computacional desarrollada, mientras que la segunda presenta la descripción de la metodología propuesta para el ajuste de la función 87L.

2.1.3.1. Principales características de la herramienta computacional desarrollada

La herramienta computacional desarrollada permite un análisis y evaluación comparativa entre las distintas marcas de IEDs comerciales que presentan la característica 87L. Para ello, se tiene una interfaz que contiene: un panel inicial para el ingreso de archivos transitorios en formato COMTRADE de manera individual o conjunta, un módulo para la sincronización de señales de corriente, una pestaña dedicada al ingreso de los parámetros de ajuste de cada variante de la característica de operación, y varias pestañas donde se muestra la representación gráfica de la corriente diferencial y sus respectivas mediciones, tal como muestra la Figura 2.11. También dispone de una pestaña para la representación fasorial.

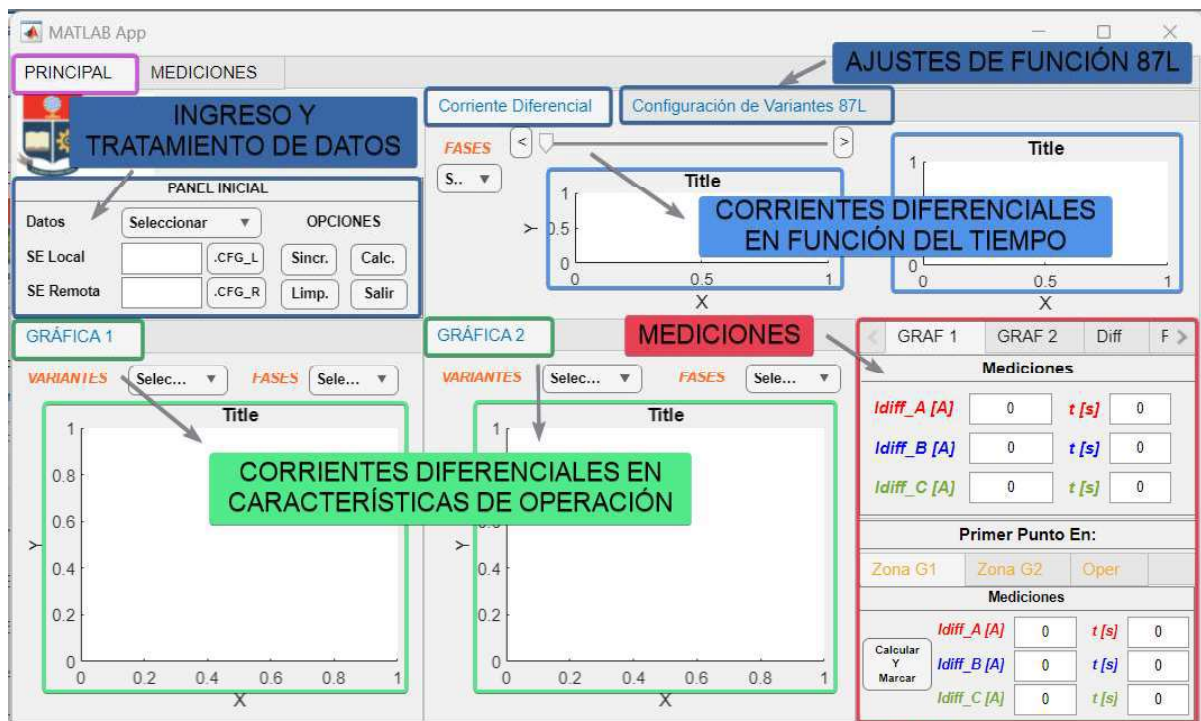


Figura 2.11. Ventana PRINCIPAL de la herramienta computacional desarrollada.

A continuación, se describen los elementos que componen cada pestaña:

- Ingreso y tratamiento de datos

Presenta el panel inicial en donde se ingresan los archivos transitorios en formato COMTRADE para cada subestación, se tienen dos opciones: *Individuales*, referente a un solo archivo en formato COMTRADE, o *Conjunto*, opción que permite la lectura de varios archivos en formato COMTRADE, tal como muestra la Figura 2.12. La subestación local (SE Local) y la subestación remota (SE Remota) se refieren a las subestaciones presentes en los extremos de la línea de análisis.



Figura 2.12. Panel inicial, ingreso de archivos COMTRADE.

Por otra parte, la opción “*Sincr.*” Permite al usuario una sincronización manual de las señales de corriente de análisis. Esto es útil cuando se tienen archivos transitorios reales con una distinta estampa de tiempo, tal como muestra la Figura 2.13.

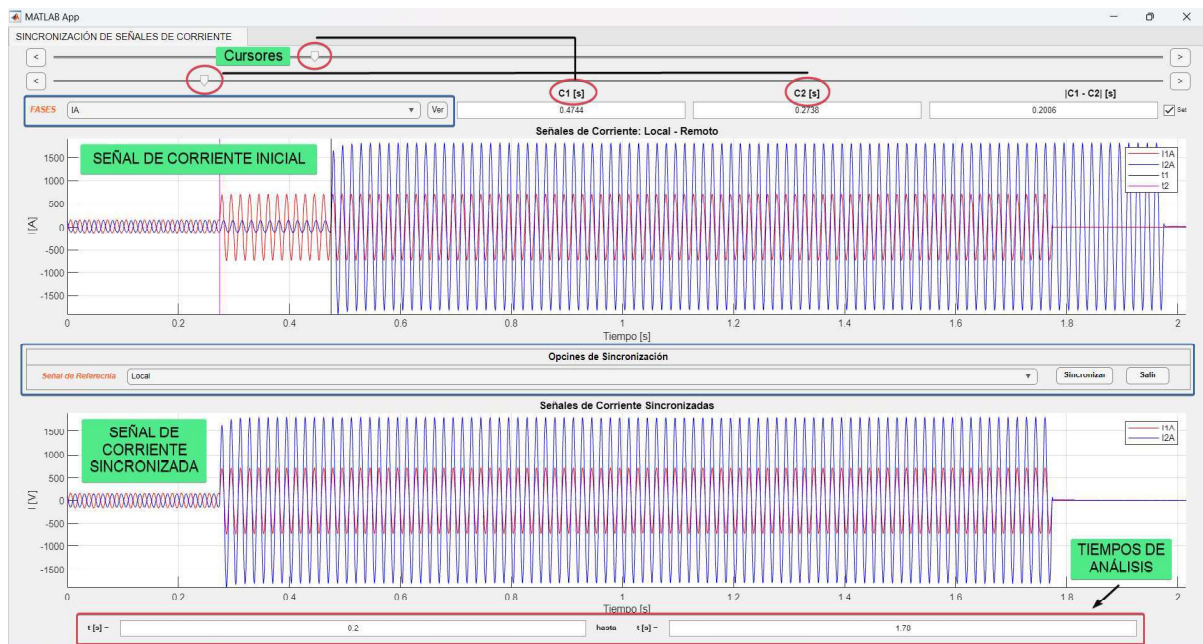


Figura 2.13. Ventana de sincronización de señales de corriente.

Esta ventana emergente contiene cursores para establecer la diferencia de tiempo entre las señales de análisis. Además, en el panel “*Opciones de Sincronización*” se fija una señal de referencia (Local o Remota) sobre la cual se realiza el desplazamiento de los datos de

corriente en función del tiempo establecido, obteniendo así una señal de corriente sincronizada.

Se debe mencionar que, esta ventana también presenta el ingreso manual de los tiempos de análisis sobre los cuales se realiza el procesamiento posterior de las señales.

- *Corrientes diferenciales en función del tiempo*

Como se presenta en la Figura 2.14, una vez realizado el procesamiento de datos se muestra en las gráficas la corriente sincronizada en función del tiempo y las corrientes diferencial y de restricción obtenidas con las expresiones (1) y (2) respectivamente.

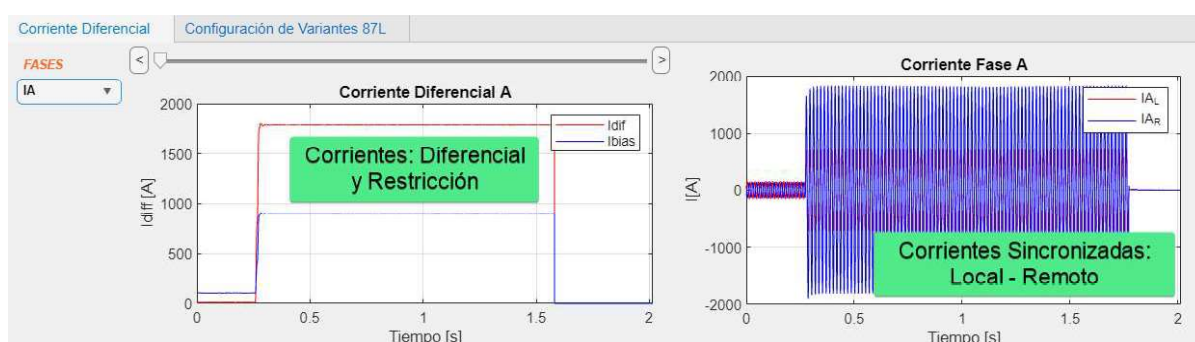


Figura 2.14. Representación de corrientes en función del tiempo.

- *Ajustes de la función 87L*

En esta pestaña se ingresan los valores de parametrización de las distintas variantes de operación de la función 87L. De acuerdo con lo establecido en el estado del arte, se presentan cuatro variantes porcentuales y una variante adicional correspondiente al plano alpha (ver Figura 2.15).



Figura 2.15. Parametrización de las variantes de las características de operación de la función 87L.

La parametrización de todas las variantes puede asignarse en función de los valores de fábrica mediante la opción "Por Defecto" del panel "Cargar Parámetros". Sin embargo,

estos ajustes pueden ser modificados según el criterio del usuario escogiendo la opción “Manual”.

- *Corrientes diferenciales en las características de operación*

Los resultados se presentan de manera gráfica en las pestañas “Gráfica 1” y “Gráfica 2”, donde se tienen los puntos de corriente diferencial con la característica de operación según la variante escogida. También presenta un panel de mediciones que muestra el valor de: las corrientes diferenciales seleccionadas en función del tiempo y en la característica de operación, y los fasores de corriente de la subestación local y remota con el tiempo asociado a estas medidas, tal como muestra la Figura 2.16.

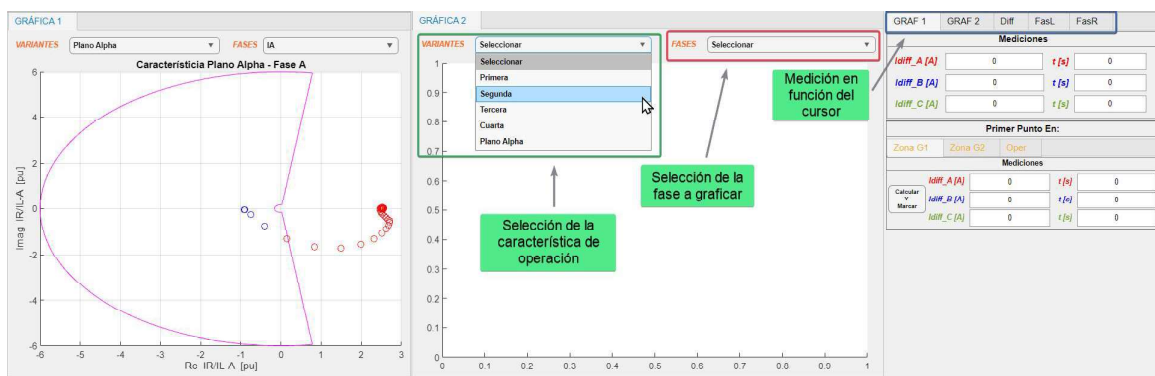


Figura 2.16. Representación gráfica de corriente diferencial y sus mediciones.

- *Mediciones*

En el panel “Primer Punto En”, mediante el botón “Calcular y Mostrar” de las pestañas “Zona G1” y “Zona G2”, se presentan los valores en corriente diferencial y el tiempo asociado al primer punto que entra en zona de operación según la variante seleccionada y se incluye de manera visual en la representación gráfica de los resultados obtenidos en las pestañas “Gráfica 1” y “Gráfica 2”, tal como muestra la Figura 2.17.

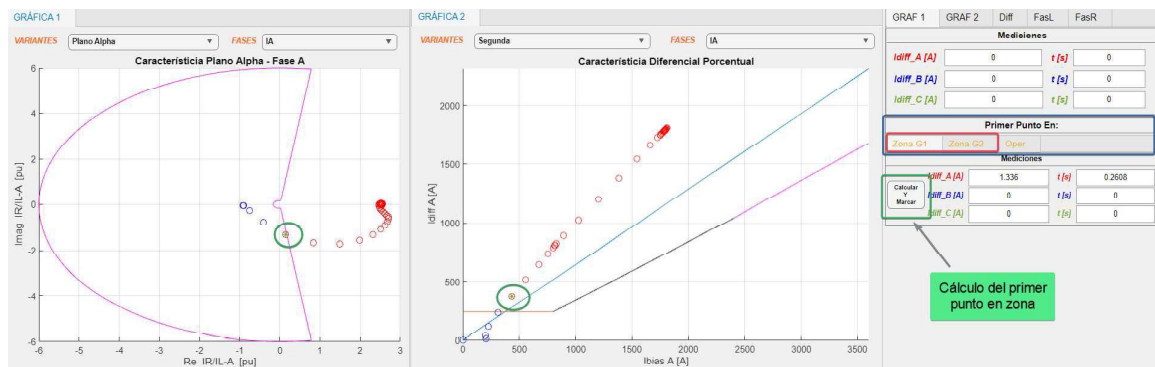


Figura 2.17. Cálculo y representación gráfica del primer punto en zona de operación.

En la Figura 2.18, se muestra el caso de una oscilografía real en la cual también es factible mostrar el primer punto de operación de la función 87L y representarlo gráficamente en los resultados obtenidos.

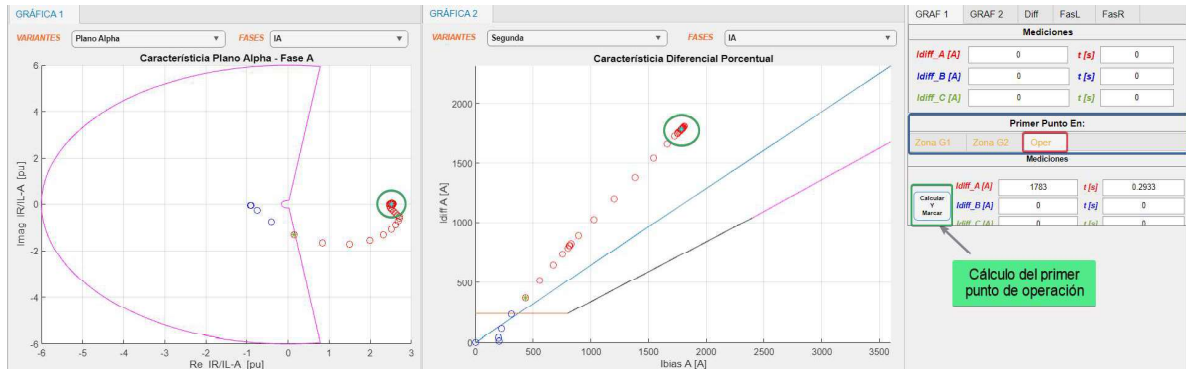


Figura 2.18. Cálculo y representación gráfica del primer punto de operación – caso real.

Por otra parte, para la representación fasorial de las corrientes presentes en la barra local y en la barra remota se utiliza la pestaña “MEDICIONES”.

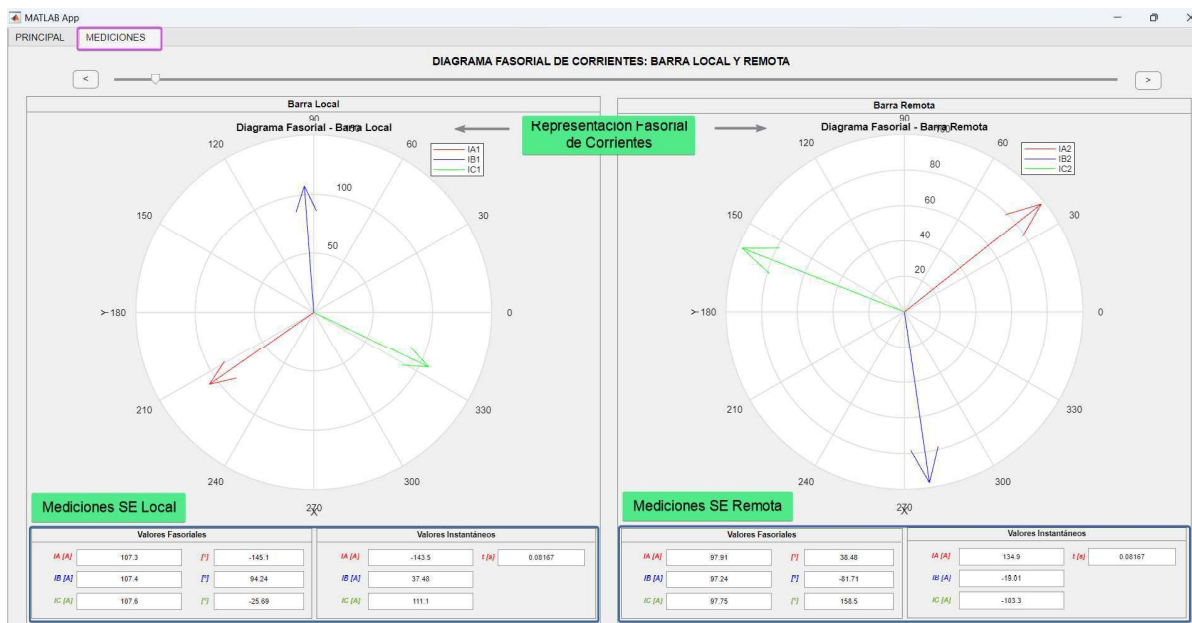


Figura 2.19. Diagrama fasorial para corrientes locales y remotas.

En la Figura 2.19 se muestra el diagrama fasorial de corrientes el cual va cambiando conforme se desplace el control deslizante ubicado en la parte superior. Además, se muestran los valores de magnitud, ángulo, valores instantáneos y el tiempo asociado en los paneles de mediciones: “Valores Fasoriales” y “Valores Instantáneos”.

Finalmente, una de las principales ventajas que presenta esta herramienta computacional es la facilidad de ubicación simultánea de corrientes diferenciales, tanto en la característica de operación de la variante seleccionada como en las gráficas en función del tiempo. La Figura 2.20 muestra la relación de un mismo punto de corriente diferencial para las distintas representaciones gráficas.

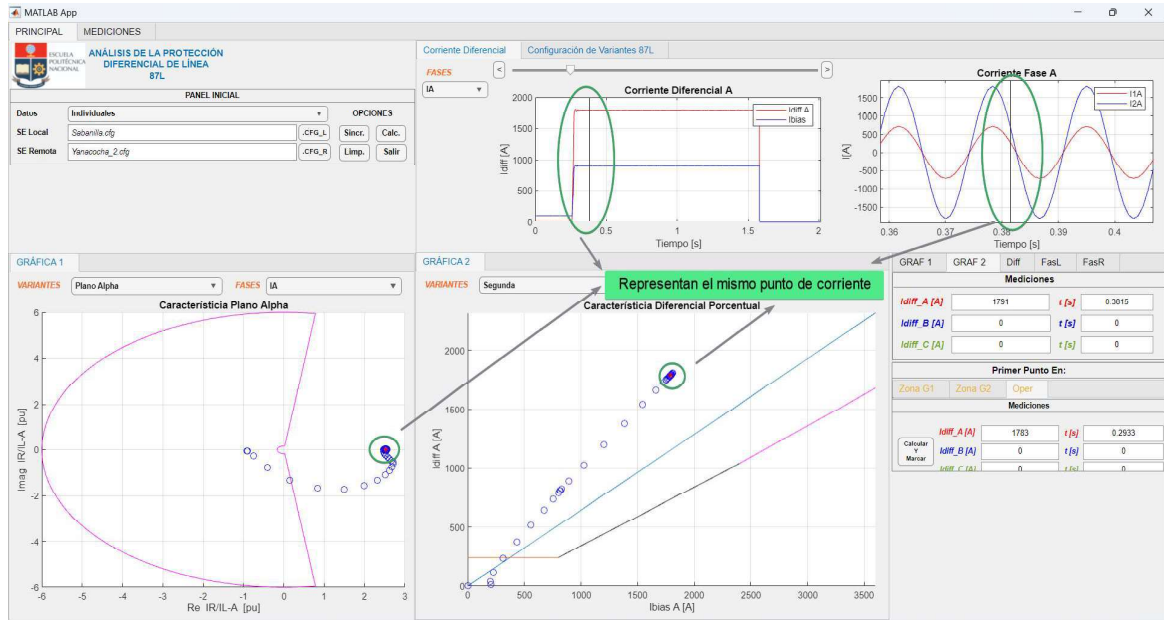


Figura 2.20. Ubicación de un valor de corriente en todas las gráficas.

En el Anexo A.1 se presenta el manual de usuario para el manejo de la herramienta computacional desarrollada en el presente trabajo, donde se muestra como procesar, ingresar y mostrar los datos partiendo de archivos en formato COMTRADE para un posterior análisis.

2.1.3.2. Metodología propuesta para el ajuste de la función 87L

La metodología de ajuste de la función 87L se ilustra en la Figura 2.21.

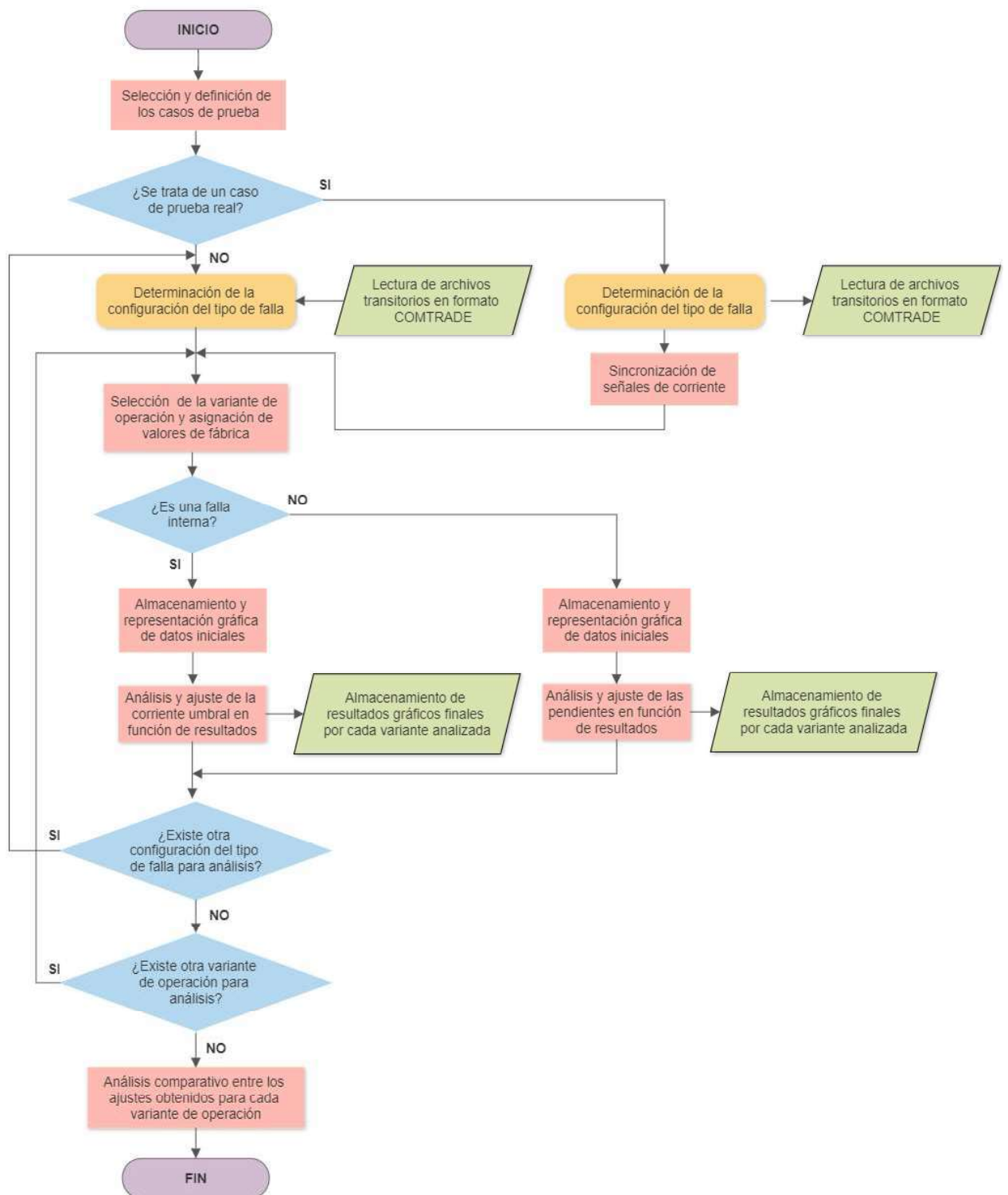


Figura 2.21. Metodología propuesta para el ajuste de las variantes de operación de la función 87L usando la herramienta computacional desarrollada.

- *Selección y definición de los casos de prueba:* en este proceso se selecciona y clasifica los archivos transitorios según: el tipo de falla, la configuración del tipo de falla y el origen o pertenencia del archivo (SE Local o SE Remota). Se debe mencionar que, este proceso inicia una vez que se han obtenido los archivos transitorios en formato COMTRADE según el esquema de fallas propuesto en la Tabla 1.4.
- *Determinación de la configuración del tipo de falla:* en este proceso se identifican los archivos en formato COMTRADE que van a ser ingresados en la herramienta computacional en función del origen que tengan, es decir, se diferencia la configuración del tipo de falla (trifásica, bifásica, bifásica a tierra y monofásica) entre un evento de prueba real o simulado. En el caso de un evento de prueba (falla) real, se incluye el proceso de sincronización de las señales de corriente.
- *Selección de las variantes de operación:* en esta sección del diagrama presentado, se escogen las variantes de operación que serán representadas de manera gráfica y se asignan sus valores por defecto.
- *Almacenamiento y representación gráfica de datos iniciales:* este proceso corresponde a la representación gráfica de las corrientes diferenciales en las variantes de operación seleccionadas en el proceso anterior, las cuales serán almacenadas para ser contrastadas con los ajustes finales.
- *Análisis y ajuste de la corriente umbral:* este proceso es exclusivo para el análisis de fallas internas, en donde se realiza el reajuste manual del valor de corriente diferencial umbral de las características de operación seleccionadas. Los resultados obtenidos son almacenados para su contraste con los ajustes iniciales o de fábrica.
- *Análisis y ajuste de las pendientes:* este proceso se realiza únicamente con fallas externas, en el cual se reajusta el valor de la o las pendientes según la variante de operación seleccionada. Los resultados obtenidos son almacenados para su contraste con los ajustes iniciales o de fábrica.

Estos procesos se vuelven iterativos hasta culminar con el ingreso y análisis de todas las fallas sugeridas.

- *Análisis comparativo entre los ajustes de cada variante de operación:* este proceso corresponde a la parte final de la metodología propuesta, en la que se establece

mediante la herramienta computacional desarrollada cual es la variante que presenta un mejor desempeño para la protección de la línea en análisis.

3. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

En este capítulo se presentan los resultados obtenidos en base a la metodología establecida en el capítulo anterior para tres casos de análisis que se indican a continuación:

Caso 1.- Análisis de fallas simuladas en la línea de subtransmisión Sinincay – Cañar de 69 kV.

Caso 2.- Análisis de una falla real en la línea de subtransmisión Arenal – Cerezos de 69 kV.

Caso 3.- Análisis de una falla real en la línea de subtransmisión Turi – Lentag de 69 kV.

El Caso 1, presenta el reajuste obtenido de la función 87L ante el conjunto de oscilografías simuladas según el esquema de fallas presentado en la Tabla 1.4 de la sección 1.5.4.

Por otra parte, los casos: Caso 2 y Caso 3, presentan el reajuste de la función 87L según la metodología presentada ante el ingreso de una oscilografía real por cada caso.

Cabe mencionar que para los casos señalados los ajustes iniciales de cada variante de operación parten de los valores de fábrica presentados en la Tabla 3.1.

Tabla 3.1. Ajuste de los parámetros de cada variante de operación según el fabricante.

Variante	Valor de fábrica	
Primera	k1 [pu]	0.3
	k2 [pu]	1.5
	l _{pk} [A]	160
	l _{s2} [A]	1600
Variante	Valor de fábrica	
Segunda	k1 [pu]	0.5
	k2 [pu]	0.7
	l _{pk} [A]	240
	knee1 [A]	800
	knee2 [A]	2400
Variante	Valor de fábrica	
Tercera	SS2 [pu]	0.5
	SS3 [pu]	1.0
	ES1 [xIB]	1.0
	ES2 [xIB]	3.0
	IB [A]	800
	l _{dmin} [xIB]	0.3

Variante	Valor de fábrica	
Cuarta	IDiff [A]	240
	IDiff_fast [A]	800
	CT_ch pu]	1.0
	CT_A [pu]	0.15
	CT_B [pu]	0.25
Variante	Valor de fábrica	
Plano Alpha	Radio [pu]	6
	Ángulo [deg]	195

3.1. Resultados

Para la validación de la metodología planteada y de la herramienta desarrollada se exponen los tres casos de estudio mencionados, cuyos resultados obtenidos se detallan a continuación.

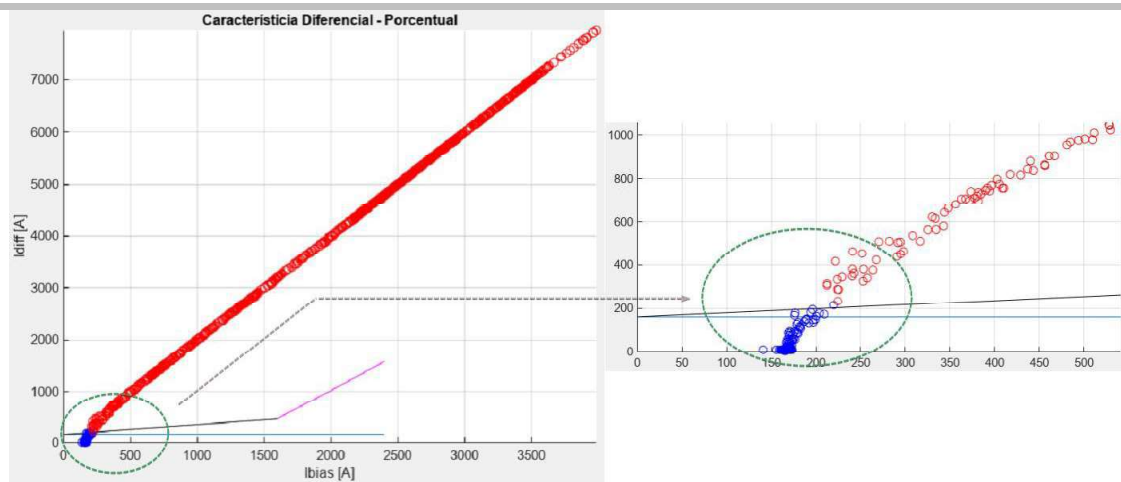
3.1.1. Caso 1.- Análisis de fallas simuladas en la línea de subtransmisión Sinincay – Cañar

Se presentan las siguientes definiciones para el análisis de este caso:

- SE Local, corresponde a la SE Sinincay a 69 kV.
- SE Remota, corresponde a la SE Cañar a 69 kV.
- Línea de interés: corresponde a la línea Sinincay – Cañar.
- Relación de TCs en SE Local, 800:5.
- Relación de TCs en SE Remota, 300:5.

Para obtener la comparación de los ajustes entre los valores iniciales (ajustes de fábrica) y los valores finales (reajustes propuestos) las siguientes figuras muestran los resultados más relevantes respecto a las representaciones gráficas iniciales obtenidas con la herramienta desarrollada. En tal aspecto, se presentan resultados para fallas internas trifásicas y monofásicas.

Tipo De Falla	Interna
Variante de Operación	Primera
Configuración del Tipo de Falla	Trifásica
Tipo de Ajuste	De Fábrica



Configuración del Tipo de Falla	Monofásica
---------------------------------	------------

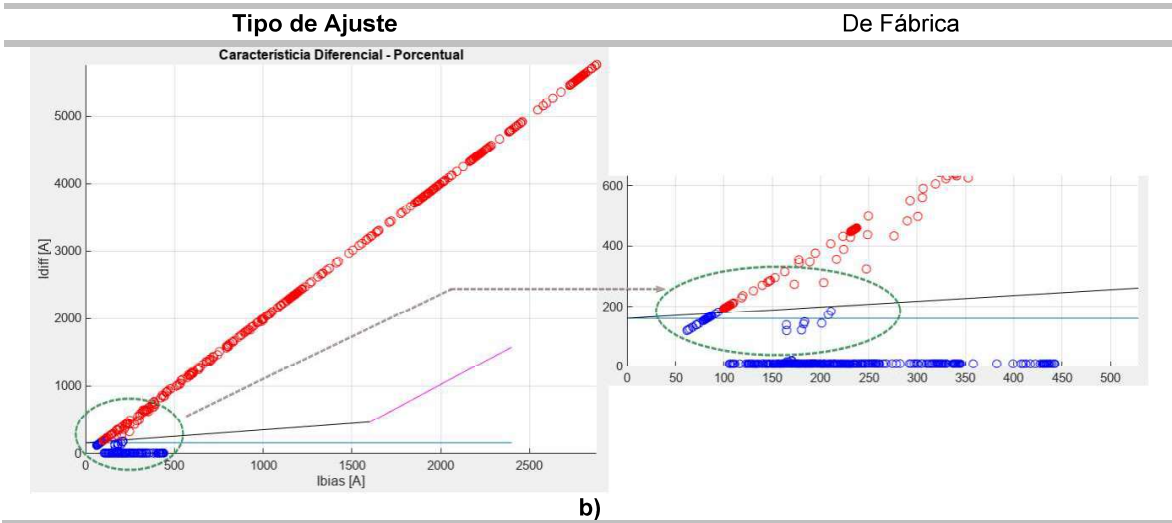
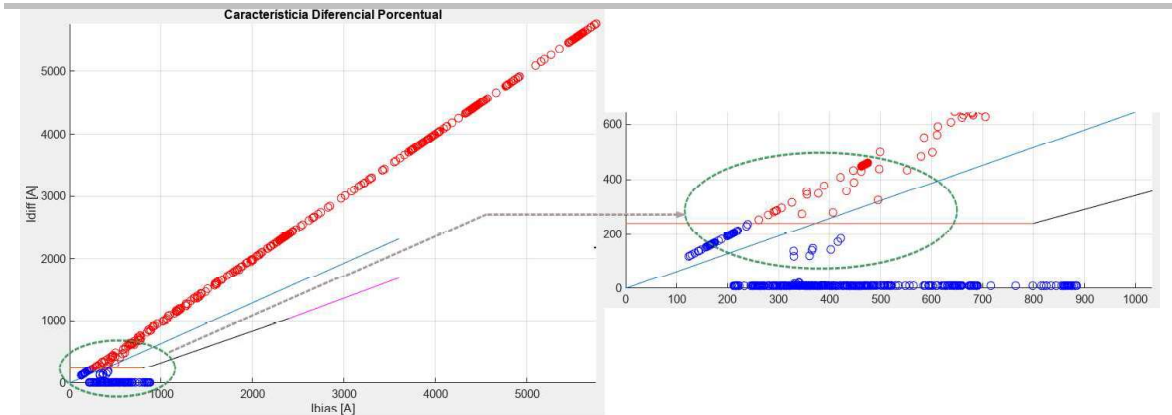
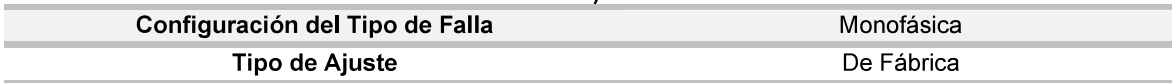
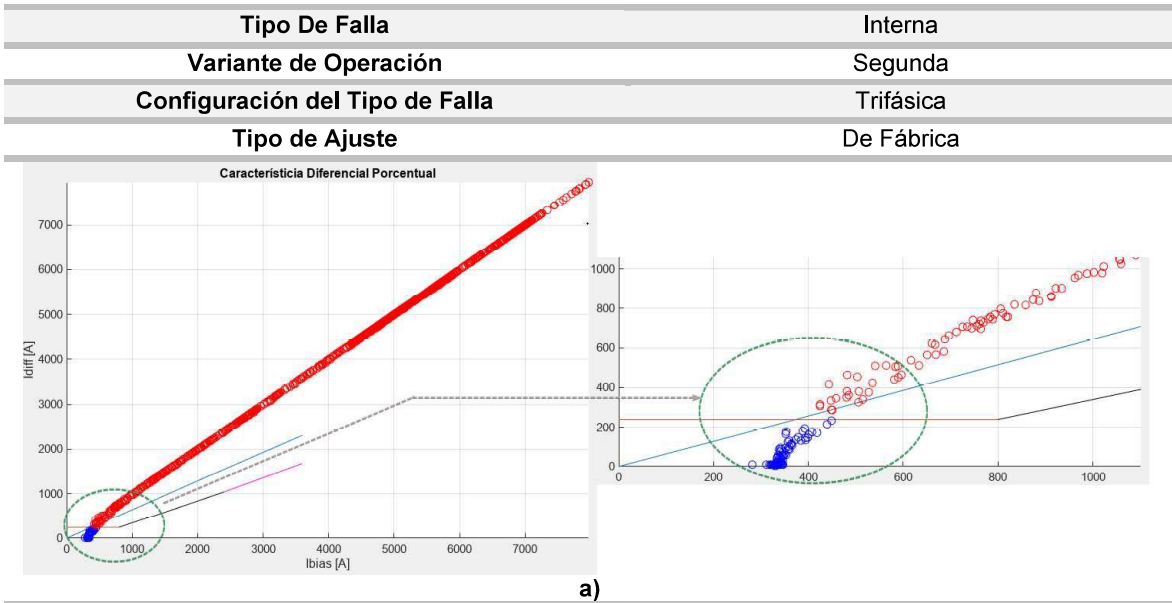


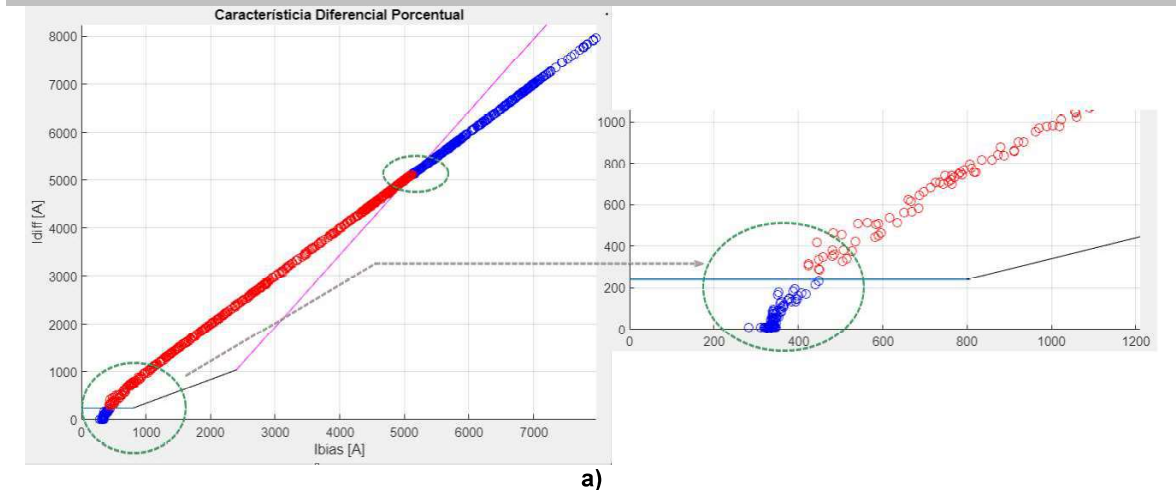
Figura 3.1. Primera variante de operación 87L ante una falla interna: **a)** 3F, **b)** 1F.



b)

Figura 3.2. Segunda variante de operación 87L ante una falla interna: a) 3F, b) 1F.

Tipo De Falla	Interna
Variante de Operación	Tercera
Configuración del Tipo de Falla	Trifásica
Tipo de Ajuste	De Fábrica



Configuración del Tipo de Falla	Monofásica
Tipo de Ajuste	De Fábrica

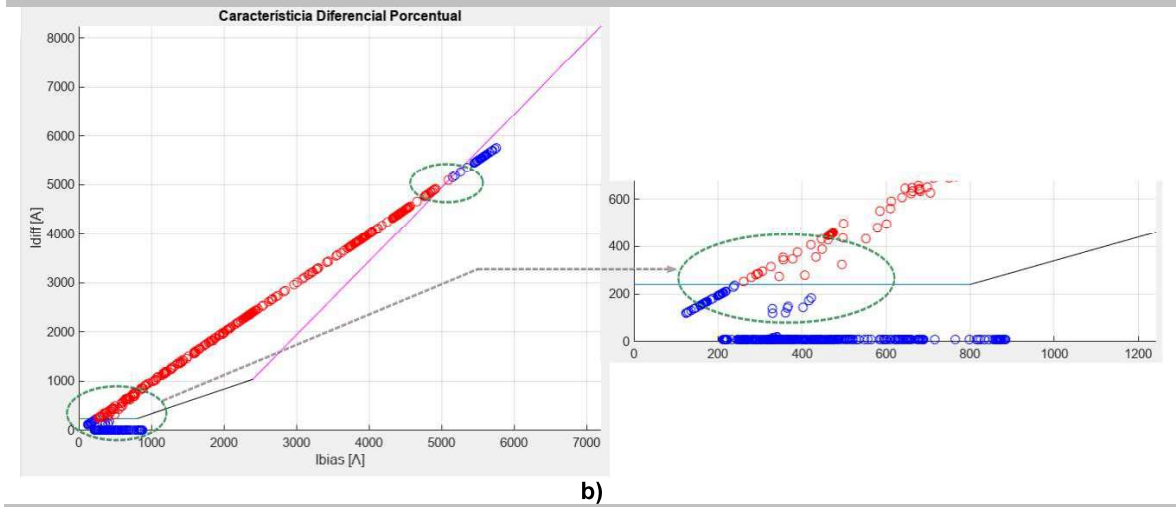
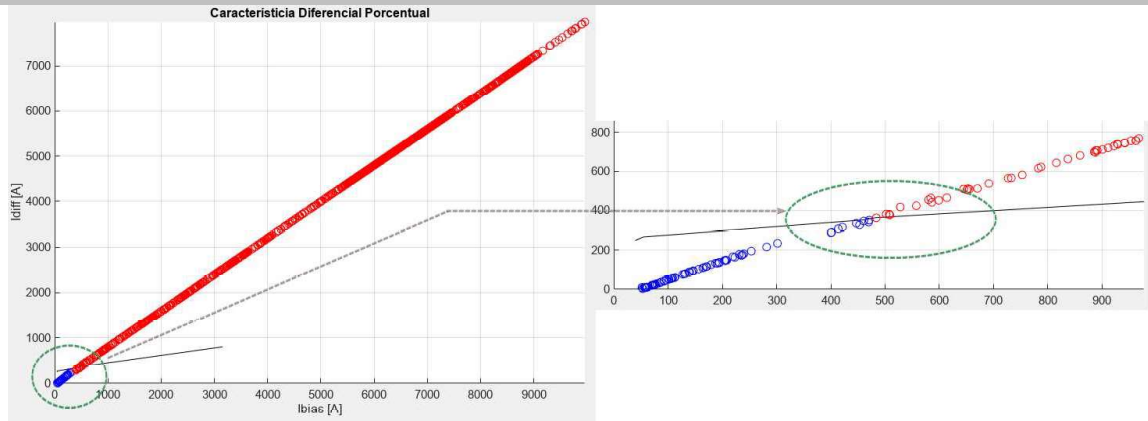


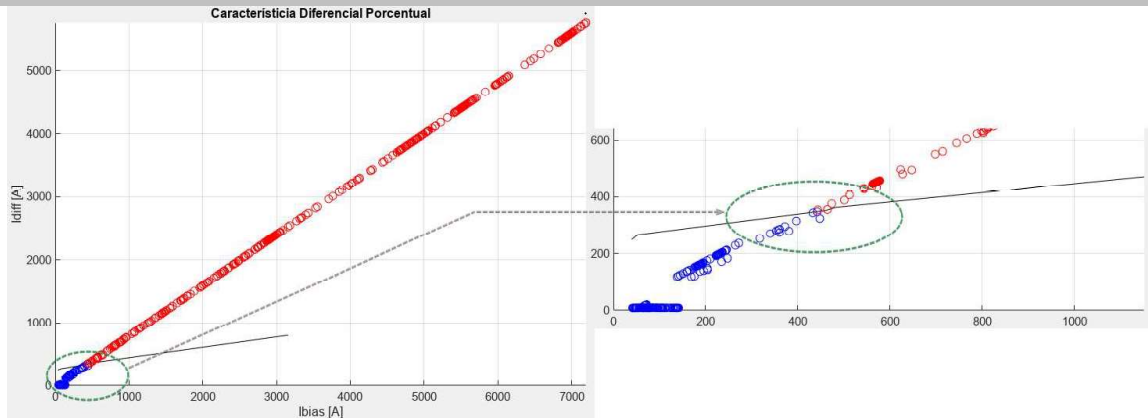
Figura 3.3. Tercera variante de operación 87L ante una falla interna: a) 3F, b) 1F.

Tipo De Falla	Interna
Variante de Operación	Cuarta
Configuración del Tipo de Falla	Trifásica
Tipo de Ajuste	De Fábrica



a)

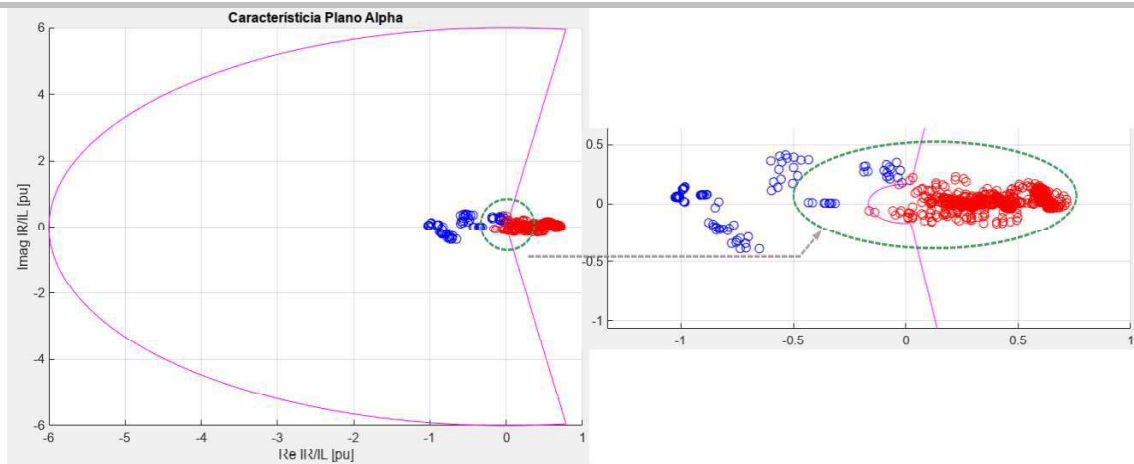
Configuración del Tipo de Falla	Monofásica
Tipo de Ajuste	De Fábrica



b)

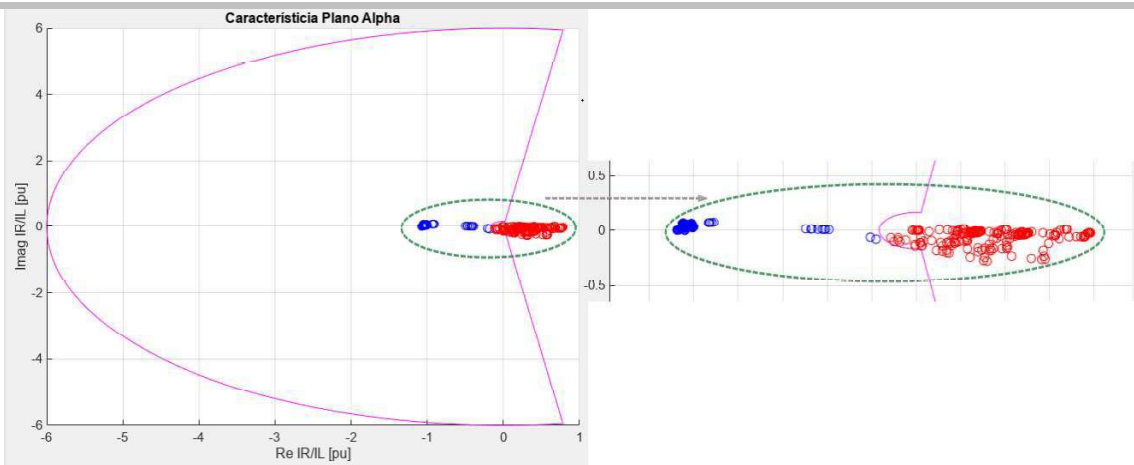
Figura 3.4. Cuarta variante de operación 87L ante una falla interna: a) 3F, b) 1F.

Tipo De Falla	Interna
Variante de Operación	Plano Alpha
Configuración del Tipo de Falla	Trifásica
Tipo de Ajuste	De Fábrica



a)

Configuración del Tipo de Falla	Monofásica
Tipo de Ajuste	De Fábrica



b)

Figura 3.5. Variante plano alpha ante una falla interna: **a) 3F, b) 1F.**

Por otra parte, con la finalidad de mostrar con claridad el efecto de la resistencia de falla en el análisis presentado, la Figura 3.6 muestra el resultado obtenido de una simulación de un cortocircuito 3F interno ubicado al 10% de la LT con la presencia de alta y baja impedancia de falla. Se muestra la forma de onda de las corrientes analizadas y se consideran los ajustes por defecto de las variantes de operación.

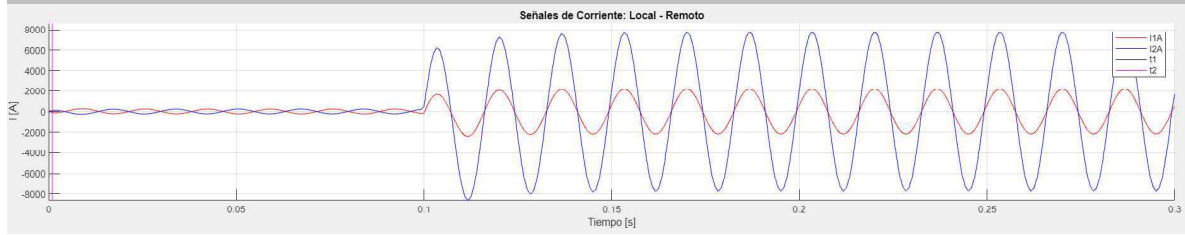
Tipo De Falla

Interna

Configuración del Tipo de Falla

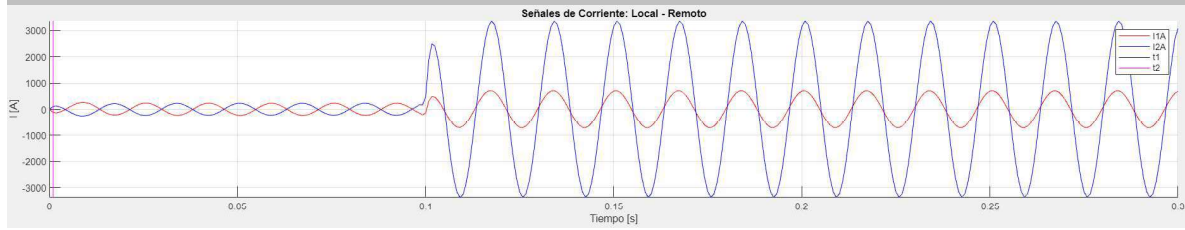
Trifásica al 10 %

Forma de Onda de Corrientes, ZF = 0 Ω



a)

Forma de Onda de Corrientes, ZF = 20 Ω



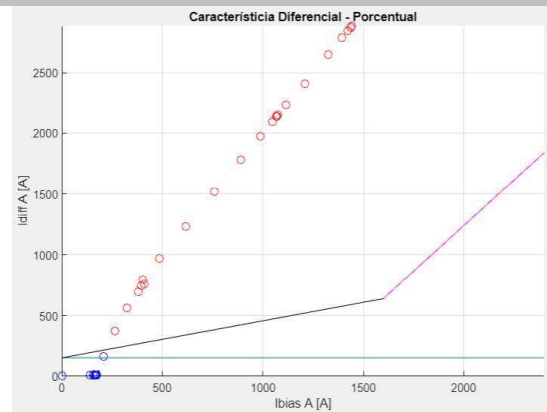
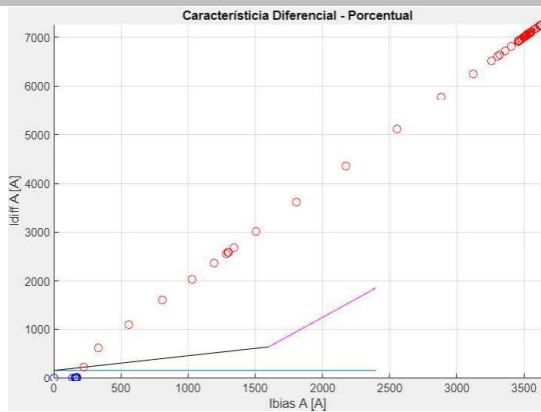
b)

Variante de Operación

Primera

ZF = 0 Ω

ZF = 20 Ω



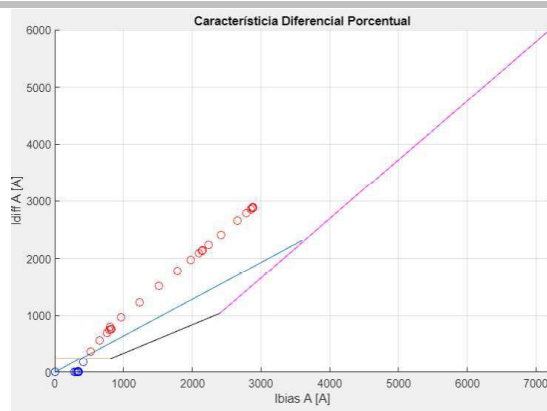
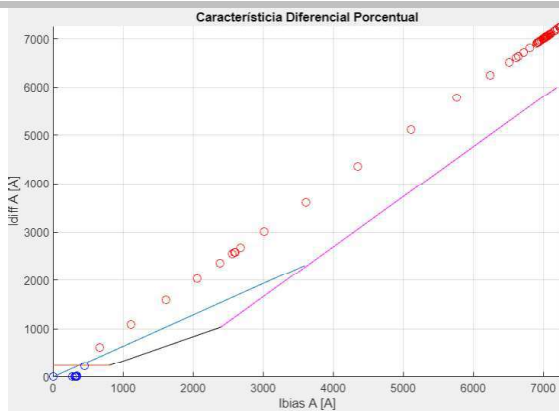
c)

Variante de Operación

Segunda

ZF = 0 Ω

ZF = 20 Ω



d)

Variante de Operación

Tercera

ZF = 0 Ω

ZF = 20 Ω

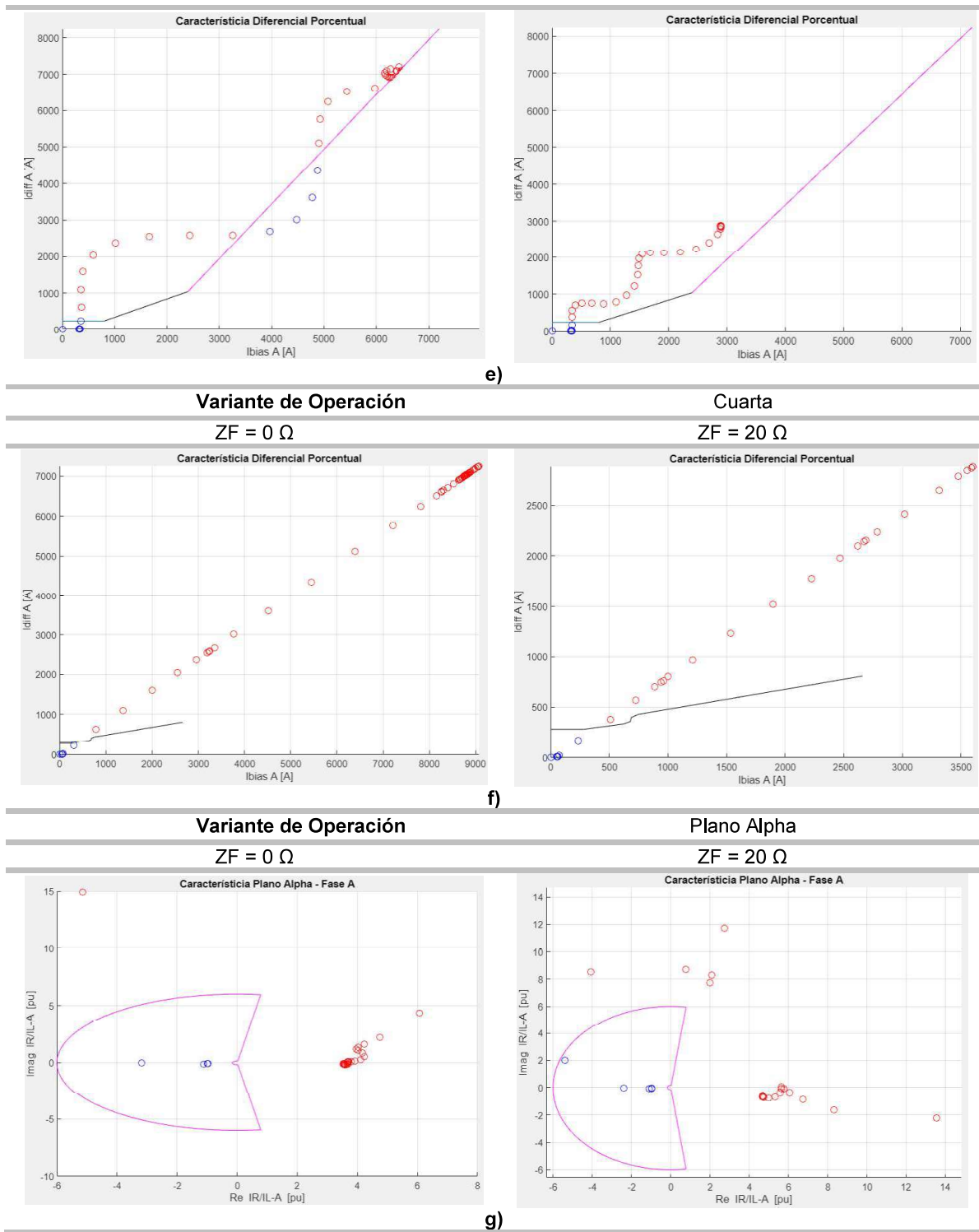


Figura 3.6. Efecto de la resistencia de falla en una falla interna 3F. Forma de Onda de Corriente: **a)** ZF = 0 ohmios, **b)** ZF = 20 ohmios. Variantes de Operación: **c)** Primera, **d)** Segunda, **e)** Tercera, **f)** Cuarta, **g)** Plano Alpha.

- **Resultados y discusión. -**

En la Figura 3.1.-a y -b, se evidencia que el ajuste del valor de la corriente diferencial umbral para la primera variante debe ser reajustada con la finalidad de obtener mayor sensibilidad ante fallas monofásicas, lo cual conlleva también a una mayor sensibilidad ante fallas trifásicas.

De igual manera, en la Figura 3.2.-a y -b se muestra la necesidad de un reajuste de la corriente diferencial umbral para la segunda variante, debido a que ante fallas monofásicas el ingreso en zona de operación no se realiza de manera adecuada.

Por su parte, en la Figura 3.3.-a y -b se presenta el mismo inconveniente para la tercera variante ante fallas monofásicas por parte de los ajustes iniciales de la corriente diferencial umbral. Además, se evidencia la necesidad de un reajuste del valor de la tercera pendiente, pues ante valores de corriente diferencial superiores a los 5000 [A] se tiene un cruce que limitaría la zona de protección de esta variante.

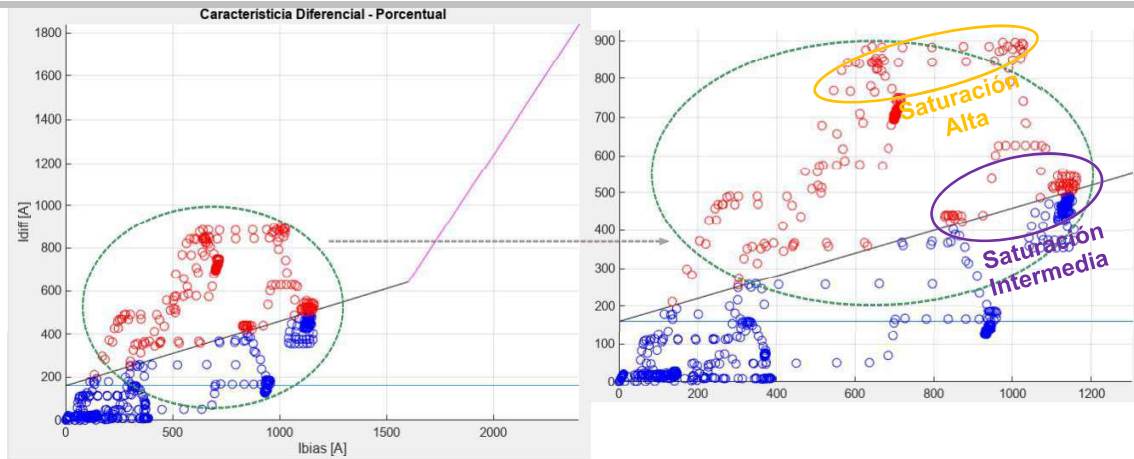
En tanto a la Figura 3.4.-a y -b se identifica la necesidad de un reajuste del valor de corriente diferencial umbral para mejorar la sensibilidad de la cuarta variante ante fallas monofásicas.

Respecto a la Figura 3.5.-a y -b se evidencia que ante fallas monofásicas la variante plano alpha no presenta inconvenientes en cuanto a su sensibilidad, ya que debido a la cobertura del radio menor, los puntos de corriente diferencial que no ingresan en las demás variantes analizadas, en esta característica si se localizan en zona de operación.

En referencia a la Figura 3.6 se observa el efecto de la resistencia de falla, lo que produce que la protección diferencial en cualquiera de sus variantes de operación muestre menores aportes de corriente disminuyendo así su sensibilidad. En la metodología propuesta este aspecto se encuentra considerado, sin embargo, al tratarse de un análisis de un conjunto de simulaciones que comprenden fallas 3F, 2F, 2FG y 1F tanto para altas como bajas impedancias de falla, estos puntos de corriente resultan difíciles de observar a primera vista al igual que la forma de onda de las señales de corriente.

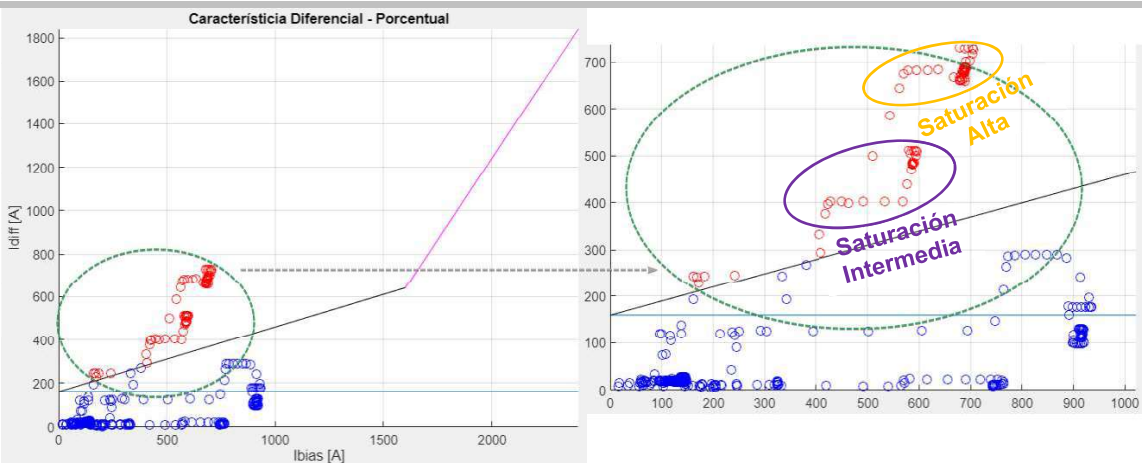
A continuación, se presenta la evaluación de los ajustes iniciales ante fallas externas ubicadas en la SE Local incluyendo niveles bajos y altos de saturación en los TCs de esta subestación.

Tipo De Falla	Externa
Variante de Operación	Primera
Configuración del Tipo de Falla	Trifásica
Tipo de Ajuste	De Fábrica



a)

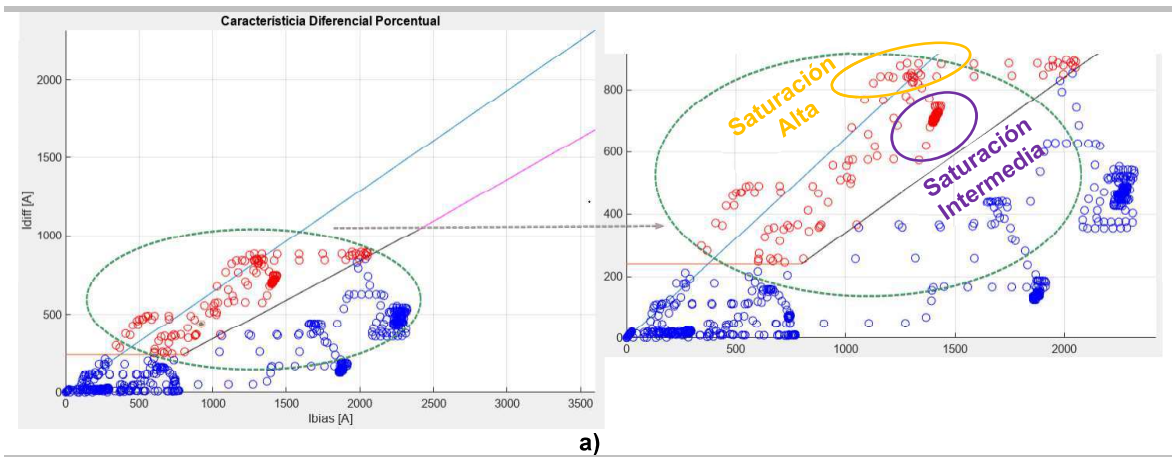
Configuración del Tipo de Falla	Monofásica
Tipo de Ajuste	De Fábrica



b)

Figura 3.7. Primera variante de operación 87L ante una falla externa: a) 3F, b) 1F.

Tipo De Falla	Externa
Variante de Operación	Segunda
Configuración del Tipo de Falla	Trifásica
Tipo de Ajuste	De Fábrica



Configuración del Tipo de Falla

Monofásica

Tipo de Ajuste

De Fábrica

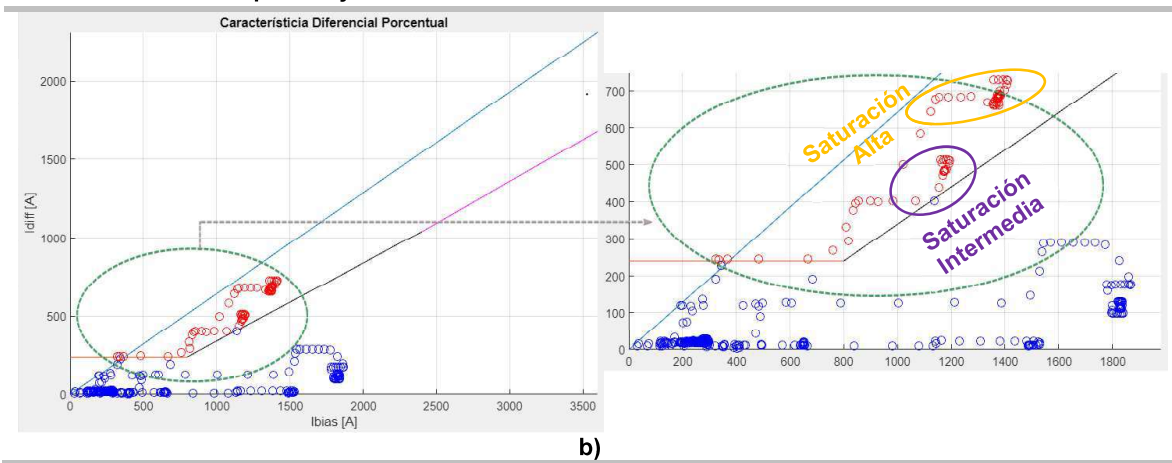


Figura 3.8. Segunda variante de operación 87L ante una falla externa: a) 3F, b) 1F.

Tipo De Falla

Externa

Variante de Operación

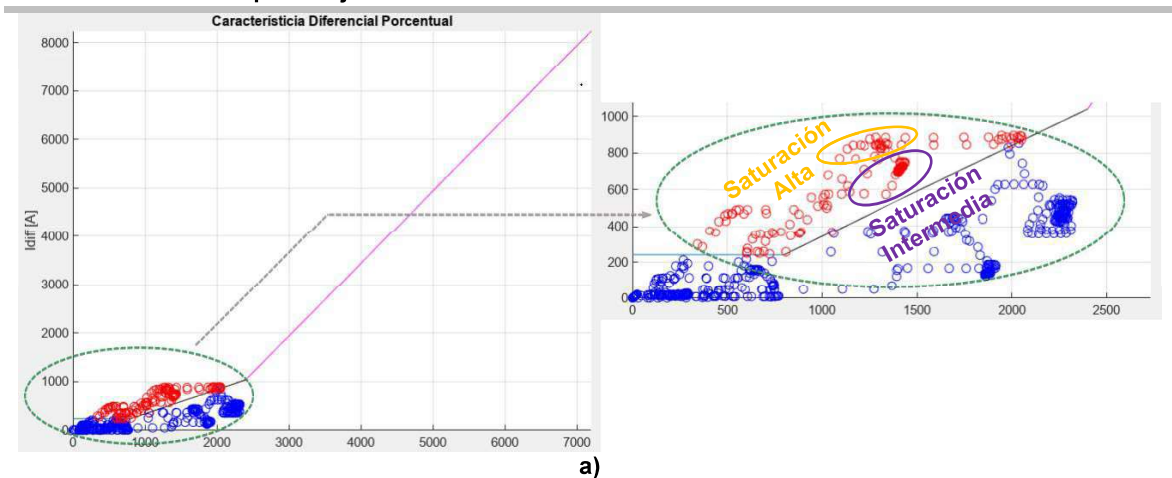
Tercera

Configuración del Tipo de Falla

Trifásica

Tipo de Ajuste

De Fábrica



Configuración del Tipo de Falla

Monofásica

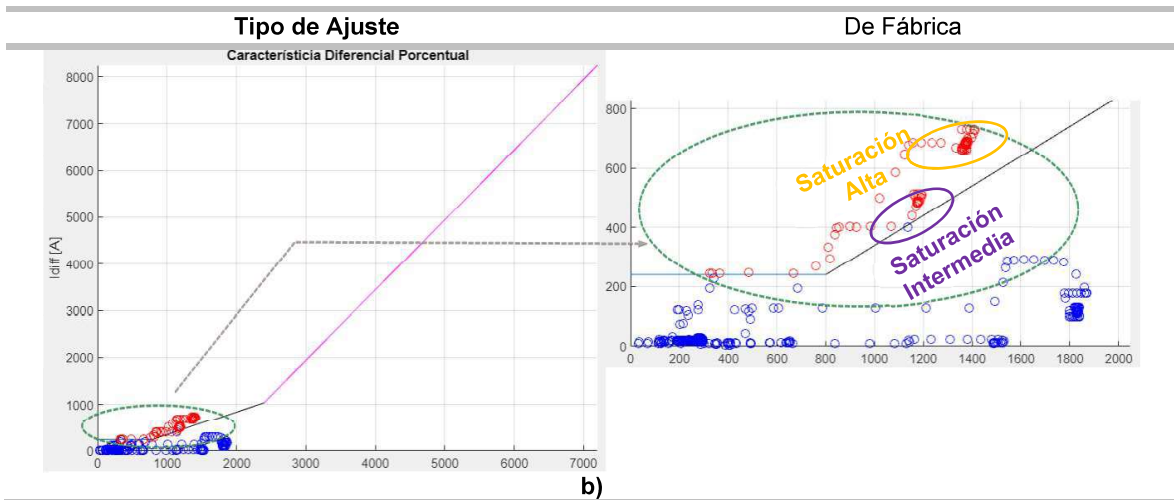


Figura 3.9. Tercera variante de operación 87L ante una falla externa: **a) 3F, b) 1F.**

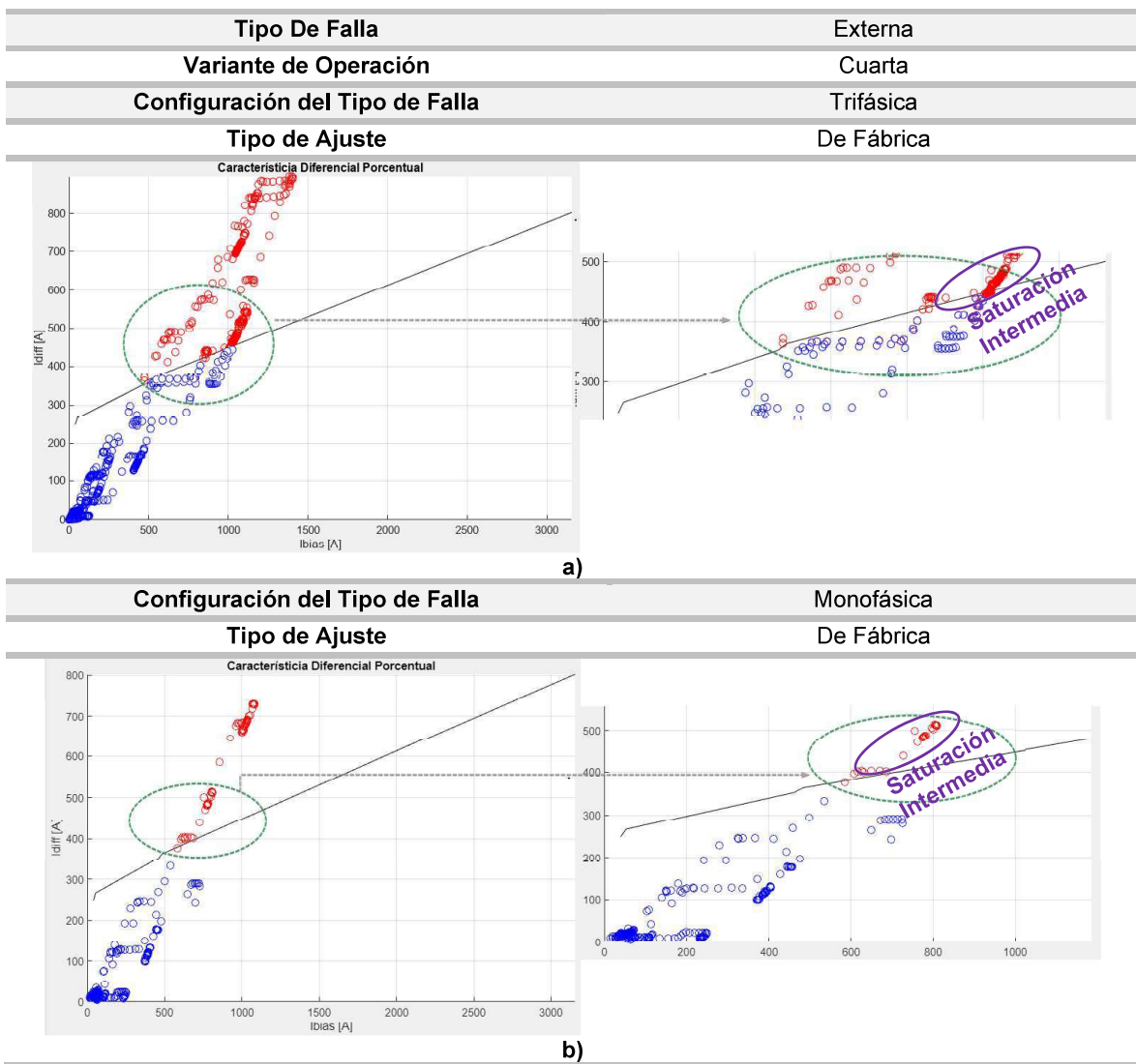


Figura 3.10. Cuarta variante de operación 87L ante una falla externa: **a) 3F, b) 1F.**

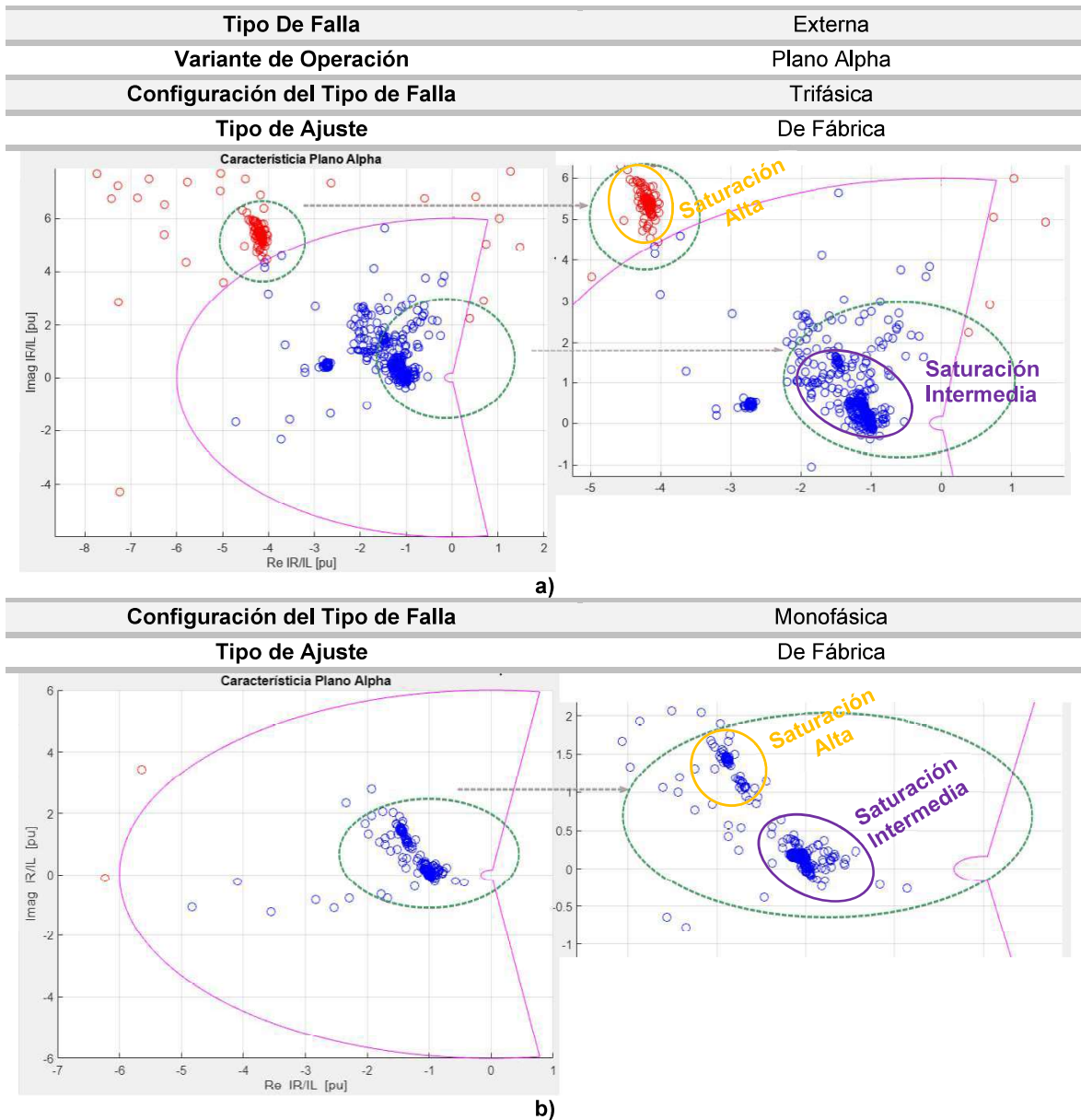


Figura 3.11. Variante plano alpha ante una falla externa: **a)** 3F, **b)** 1F.

- **Resultados y discusión.** -

En la Figura 3.7.-a y -b se evidencia que los ajustes iniciales de la primera variante necesitan ser modificados para evitar la mala operación ante la presencia de saturación en los TCs de la subestación local. En tal aspecto, se considera el reajuste de la primera pendiente para dejar en zona de restricción a los puntos de corriente diferencial relacionados a un nivel de saturación intermedia. Este reajuste también se constituye en una mejora de esta variante de operación ante fallas externas monofásicas.

Respecto a la segunda variante, la Figura 3.8.-a y -b muestra los valores de corriente diferencial para niveles altos e intermedios de saturación, los cuales ingresan en su mayoría en zona de operación, por la sección correspondiente a la segunda pendiente. Se recomienda un reajuste de la segunda pendiente a fin de que las corrientes correspondientes a la saturación intermedia se localicen en zona de restricción.

En tanto a la Figura 3.9.-a y -b, la tercera variante evidencia la necesidad de un reajuste de la segunda pendiente con la finalidad de localizar los puntos de corriente diferencial del nivel de saturación intermedia en la región de restricción. Además, se recomienda el incremento en la corriente diferencial umbral.

En cuanto a la cuarta variante, la Figura 3.10.-a y -b no se evidencia la necesidad de un reajuste ya que la mayor parte de los puntos de corriente diferencial correspondiente al nivel de saturación intermedia quedan en zona de restricción.

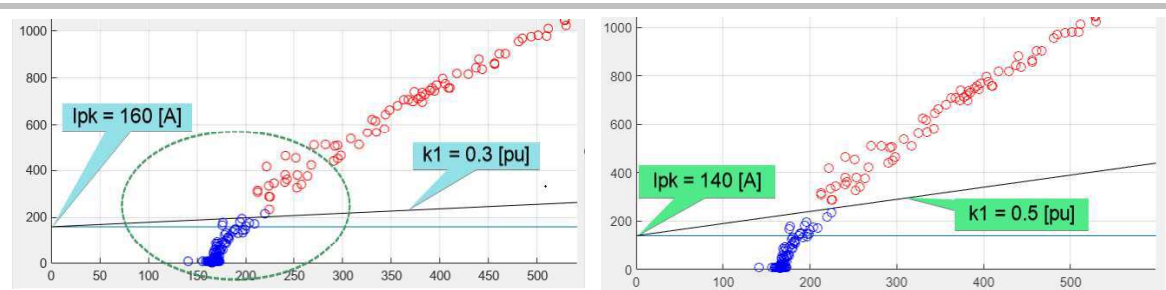
Finalmente, la Figura 3.11.-a y -b atañe al desempeño de la variante plano alpha la cual evidencia una cobertura para corrientes diferenciales correspondientes al nivel de saturación intermedia, sin embargo, el nivel de saturación alta ingresa equívocamente en zona de operación. Por tales motivos, se tiene la necesidad de un reajuste del radio de cobertura que presenta esta variante.

El Anexo B contiene los resultados gráficos iniciales obtenidos con la herramienta computacional ante el ingreso de los archivos transitorios en formato COMTRADE correspondientes a las demás configuraciones de los tipos de falla presentados en la Tabla 1.4.

 **Análisis de los ajustes finales propuestos para todas las variantes de operación sugeridas**

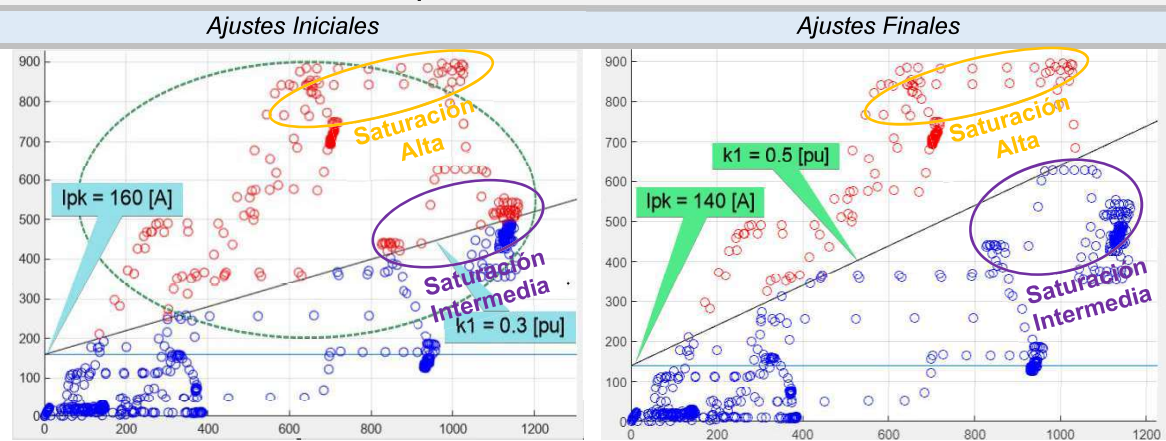
En las figuras que se muestran a continuación, se presentan los ajustes propuestos con esta metodología considerando criterios de sensibilidad para fallas internas y seguridad para fallas externas para cada variante de operación analizada. Las representaciones gráficas hacen referencia a la configuración del tipo de falla 3F.

Variante de Operación: Primera	
Comportamiento ante: Fallas Internas	
<i>Ajustes Iniciales</i>	<i>Ajustes Finales</i>



a)

Comportamiento ante: Fallas Externas

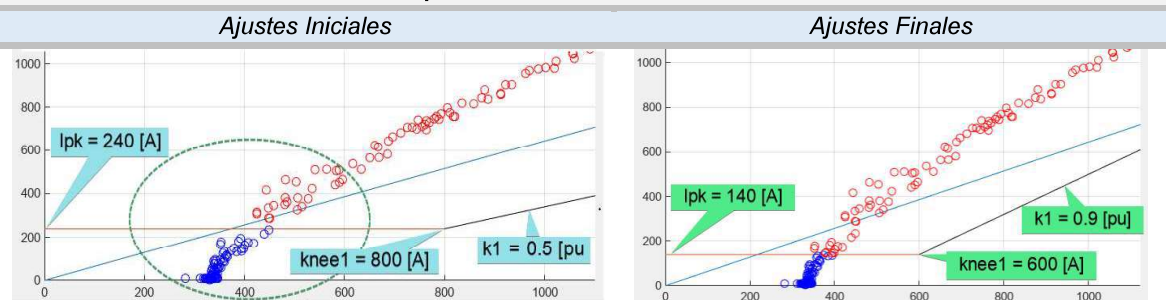


b)

Figura 3.12. Ajustes finales de la primera variante de operación de la función 87L.

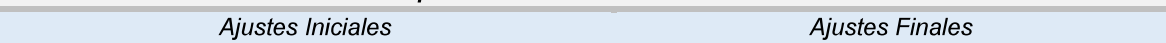
Variante de Operación: Segunda

Comportamiento ante: Fallas Internas



a)

Comportamiento ante: Fallas Externas



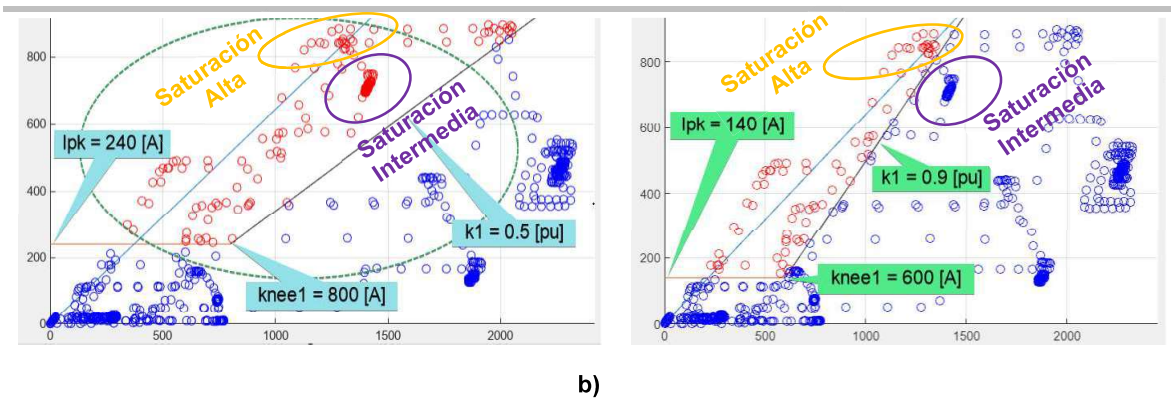


Figura 3.13. Ajustes finales de la segunda variante de operación de la función 87L.

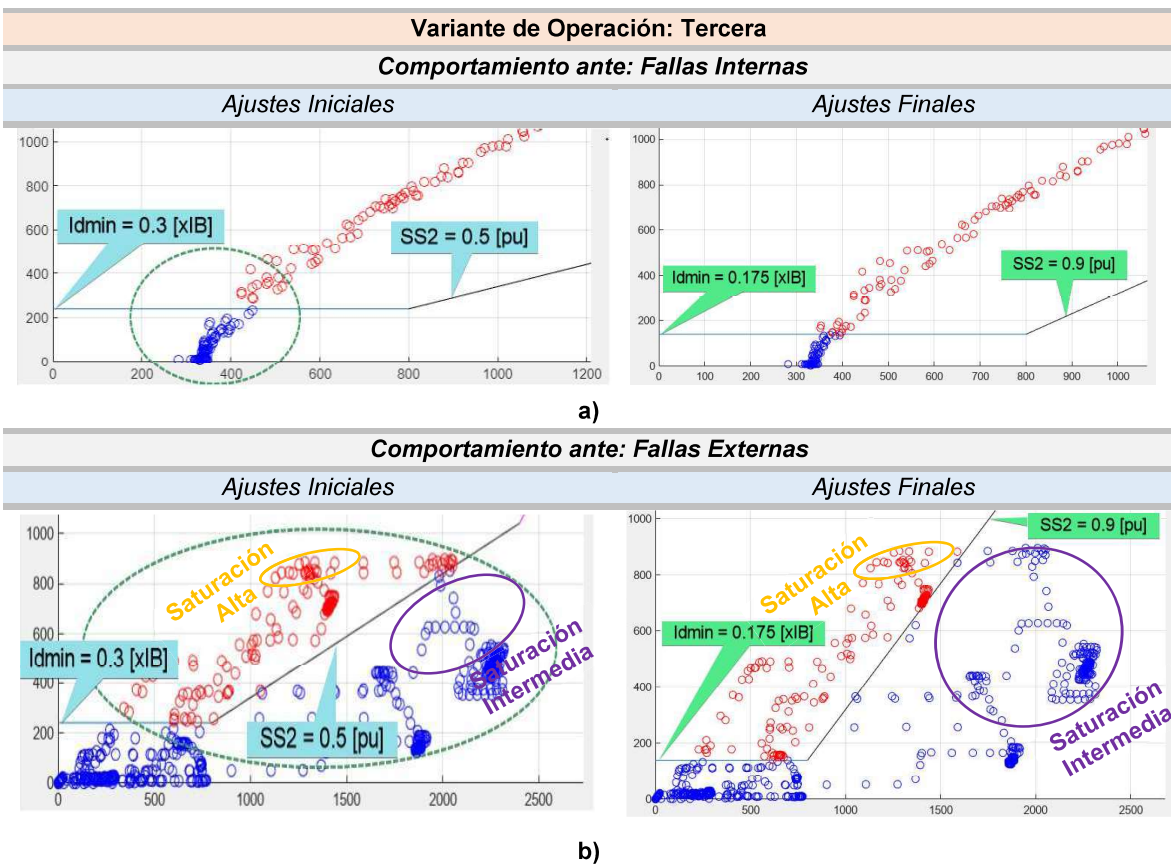
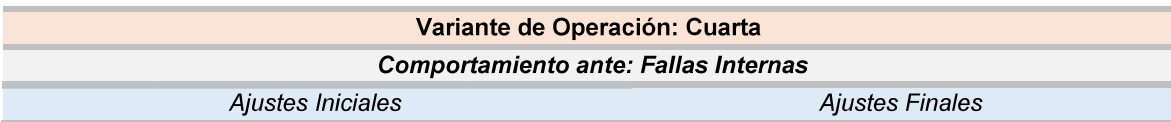


Figura 3.14. Ajustes finales de la tercera variante de operación de la función 87L.



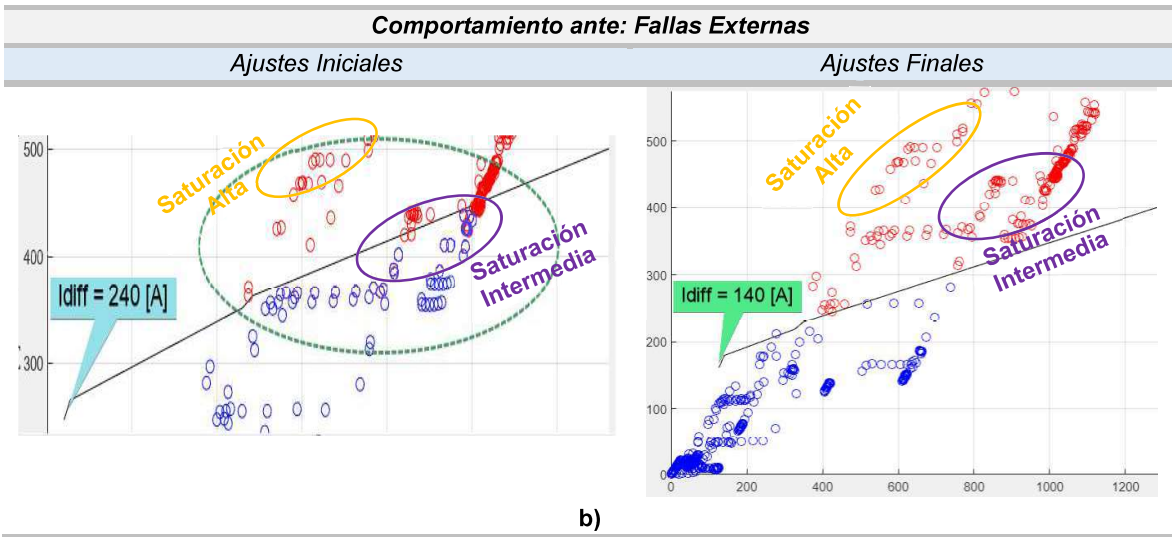
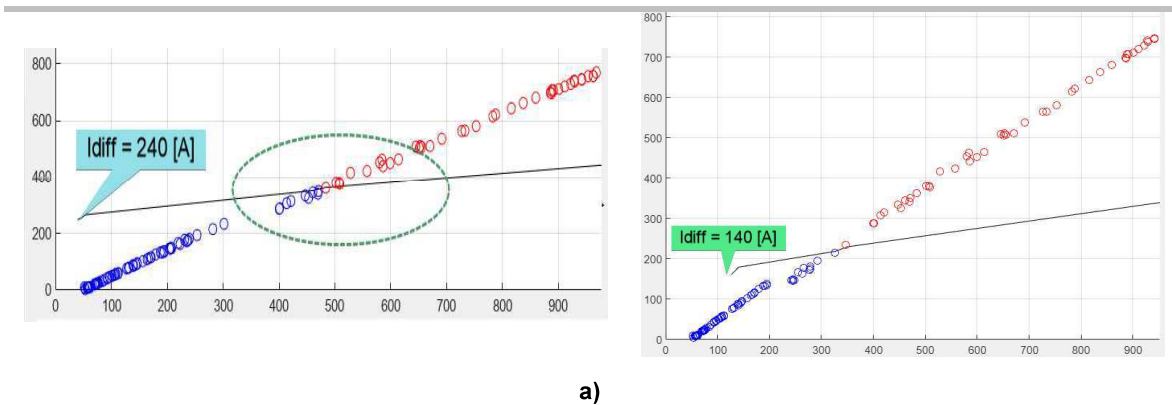
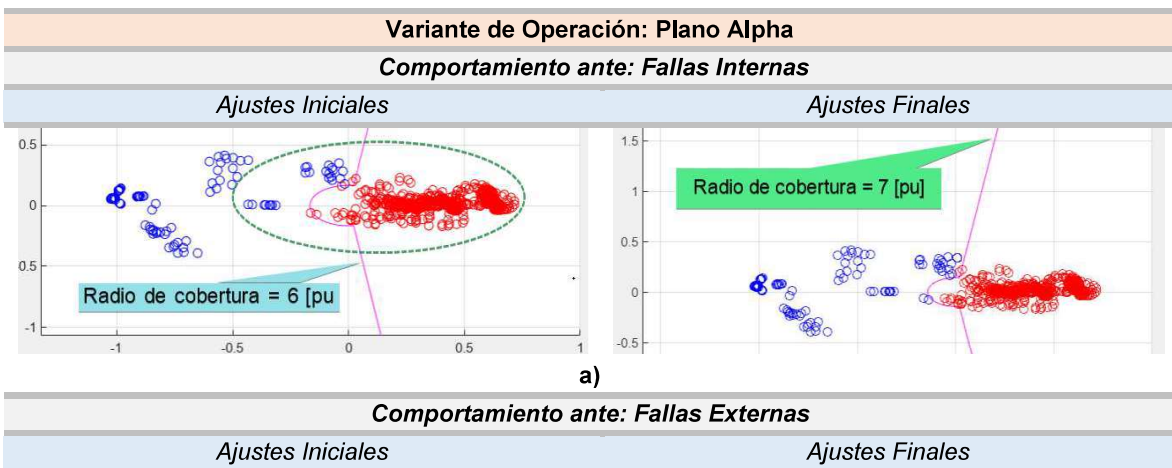


Figura 3.15. Ajustes finales de la cuarta variante de operación de la función 87L.



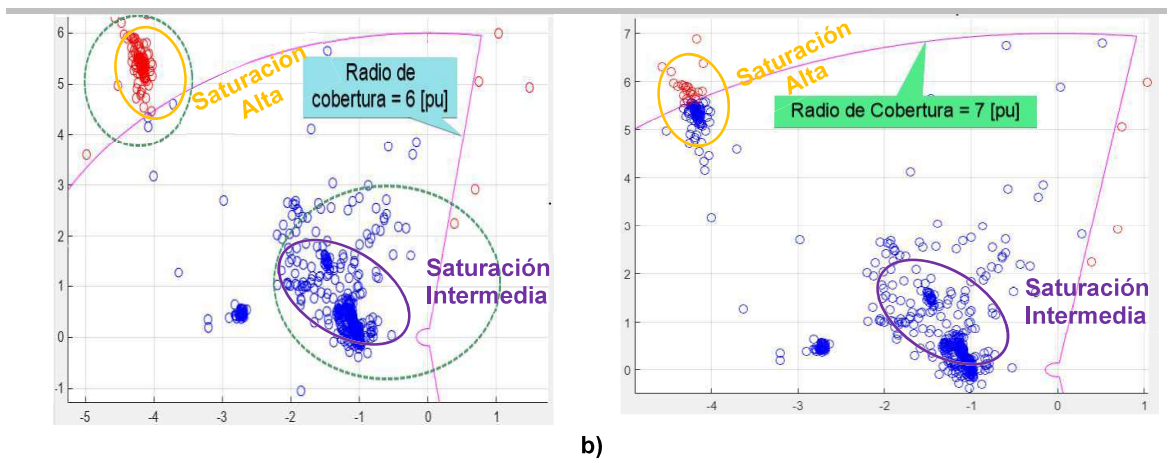


Figura 3.16. Ajustes finales de la variante de operación plano alpha de la función 87L.

A manera de resumen, se presenta la Tabla 3.2 con los ajustes finales establecidos en cada variante de la característica de operación analizada.

Tabla 3.2. Reajuste de los parámetros de cada variante de operación – Caso 1.

Variante	Ajustes	Iniciales	Propuestos
Primera	k1 [pu]	0.3	0.5
	k2 [pu]	1.5	1.5
	l _{pk} [A]	160	140
	l _{s2} [A]	1600	1600
Variante	Ajustes	Iniciales	Propuestos
Segunda	k1 [pu]	0.5	0.9
	k2 [pu]	0.7	0.7
	l _{pk} [A]	240	140
	k _{nee1} [A]	800	600
	k _{nee2} [A]	2400	2400
Variante	Ajustes	Iniciales	Propuestos
Tercera	SS2 [pu]	0.5	0.9
	SS3 [pu]	1.0	1.0
	ES1 [xIB]	1.0	1.0
	ES2 [xIB]	3.0	3.0
	IB [A]	800	800
	l _{dmin} [xIB]	0.3	0.175

Variante	Ajustes	Iniciales	Propuestos
Cuarta	IDiff [A]	240	140
	IDiff_fast [A]	800	800
	CT_ch pu]	1.0	1.0
	CT_A [pu]	0.15	0.15
	CT_B [pu]	0.25	0.25
Variante	Ajustes	Iniciales	Propuestos
Plano	Radio [pu]	6	7
Alpha	Ángulo [deg]	195	195

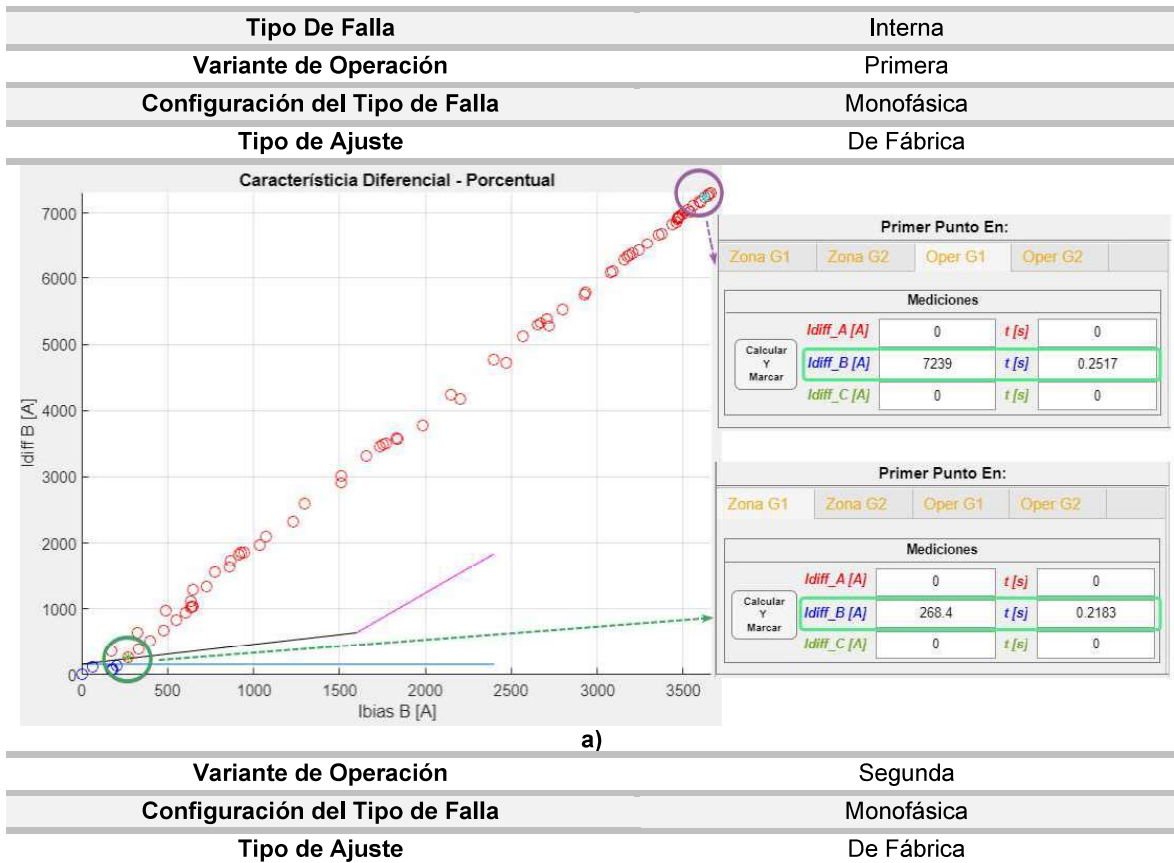
En esta tabla se resaltan en amarillo los parámetros reajustados con respecto a la sugerencia de fábrica.

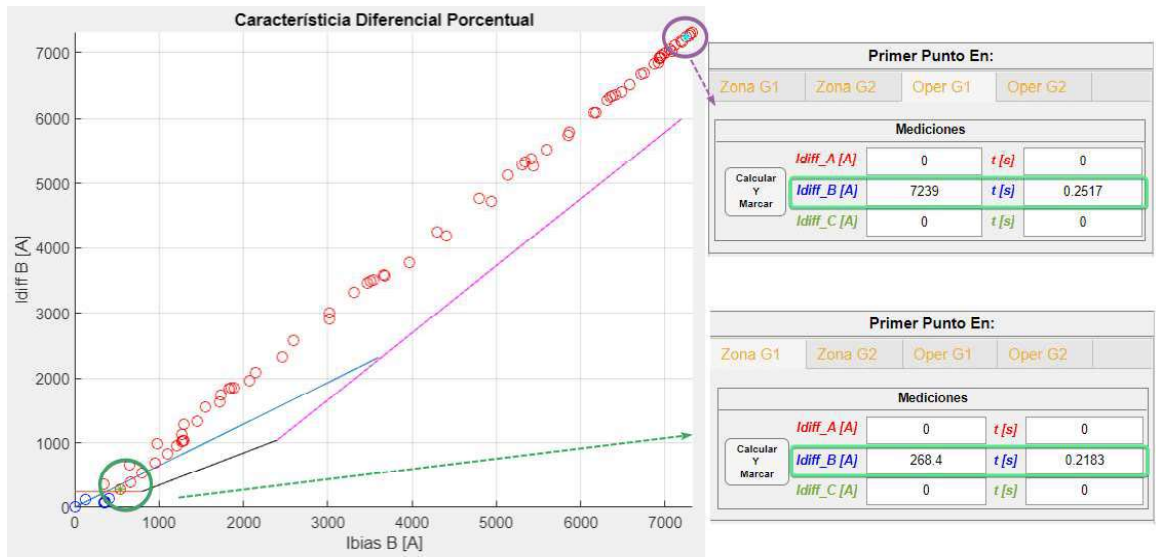
3.1.2. Caso 2.- Análisis de una falla real en la línea de subtransmisión Arenal – Cerezos

Se presentan las siguientes definiciones para el análisis de este caso:

- SE Local, corresponde a la SE Arenal a 69 kV.
- SE Remota, corresponde a la SE Cerezos a 69 kV.
- Línea de interés: corresponde a la línea Arenal – Cerezos.
- Relación de TCs en SE Local, 800:5.
- Relación de TCs en SE Remota, 800:5.

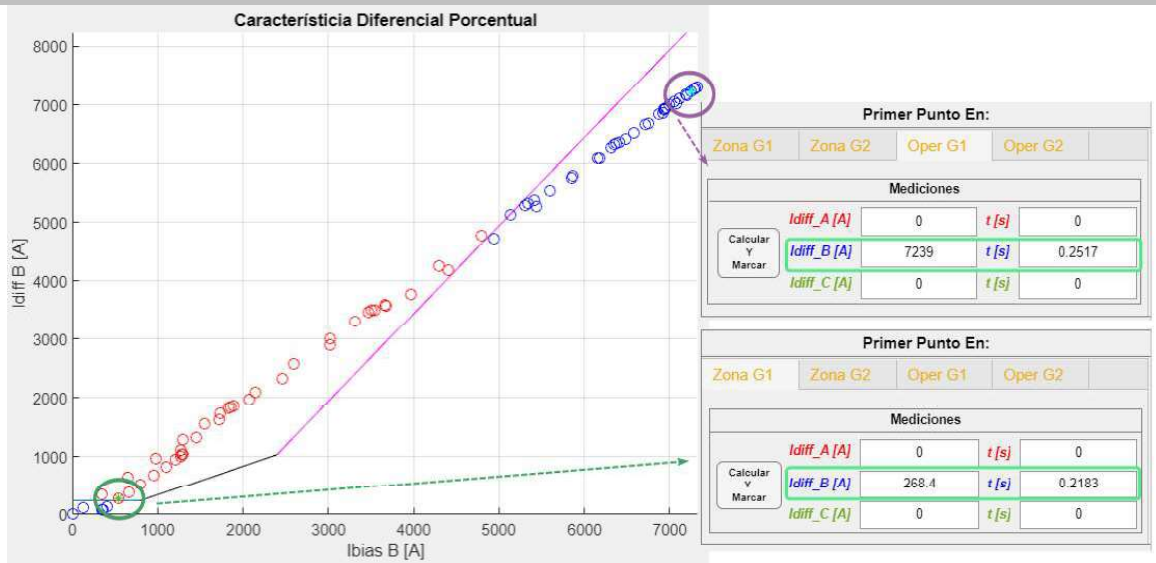
Para obtener la comparación de los ajustes entre los valores iniciales (ajustes de fábrica) y los valores finales (reajustes propuestos) la siguiente figura muestra los resultados de las representaciones gráficas iniciales obtenidas con la herramienta desarrollada.





b)

Variante de Operación	Tercera
Configuración del Tipo de Falla	Monofásica
Tipo de Ajuste	De Fábrica



c)

Variante de Operación	Cuarta
Configuración del Tipo de Falla	Monofásica
Tipo de Ajuste	De Fábrica

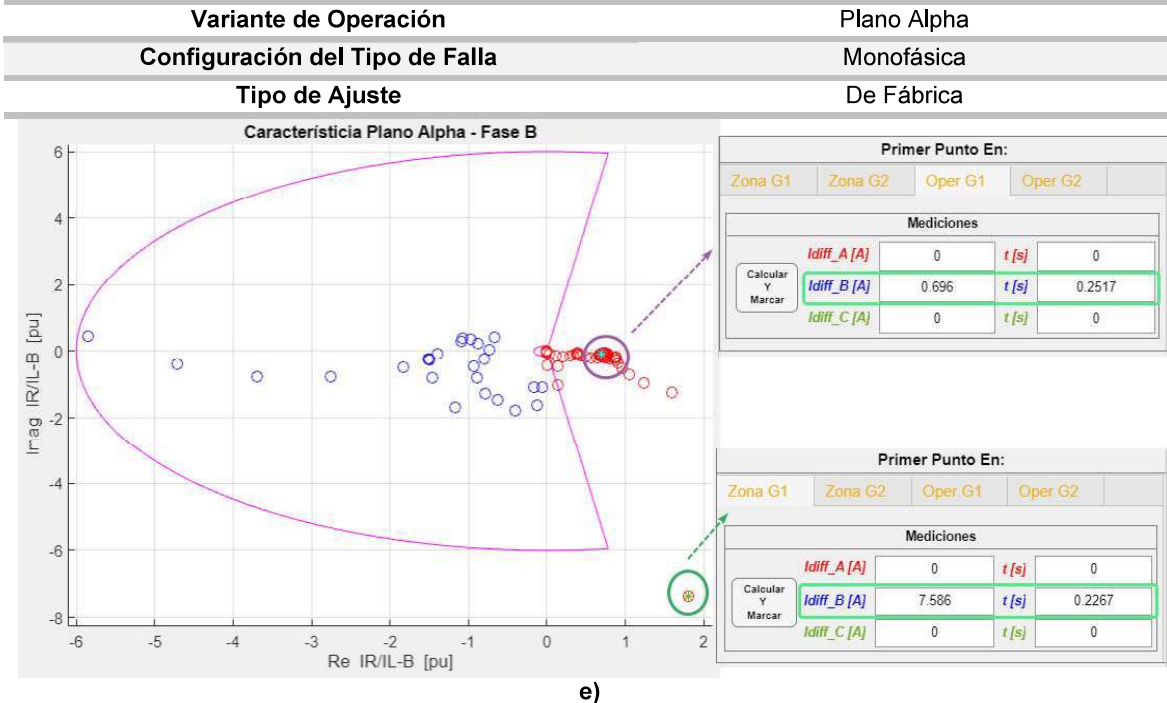
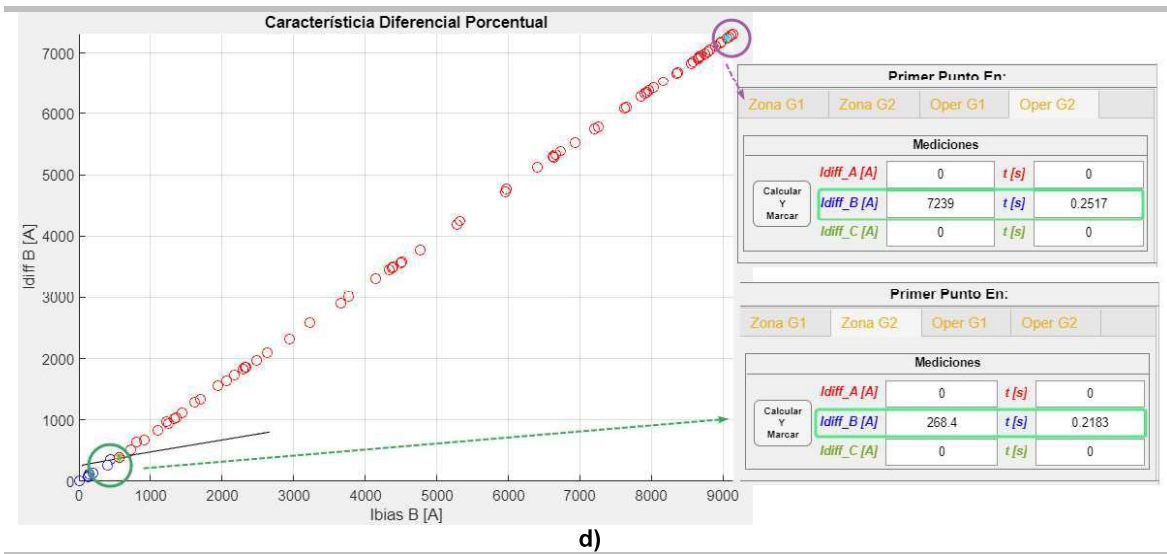


Figura 3.17. Representación de la corriente diferencial de una falla 1F en la línea Arenal – Cerezos en todas las variantes de operación.

- **Resultados y discusión.** –

En este caso, al tratarse de una oscilografía real es factible determinar mediante el uso de la herramienta computacional desarrollada, el valor de corriente diferencial y el tiempo con el cual ingresa en la zona de operación de cada variante, así como también la corriente y el tiempo con el cual se ha registrado el disparo de la protección.

En este contexto, para todas las variantes porcentuales de las características de operación de la función 87L se evidencia el ingreso en zona de operación en un tiempo de 0.2183 s, mientras que para la variante de operación plano alpha se tiene un tiempo de 0.2267 s, lo cual demuestra que el tiempo de actuación de las variantes porcentuales es 8.4 ms más rápida que la variante plano alpha.

Por otra parte, desde el inicio del registro oscilográfico el tiempo de operación de la función 87L es de 0.2517 s para todas las características debido a que este valor se encuentra dado por los datos de la oscilografía ingresada a la herramienta computacional.

Además, en la Figura 3.16-c se muestra que con el ajuste de los valores de fábrica en la tercera variante de operación no se tiene el ingreso del punto de corriente diferencial para la operación de la función 87L según lo establecido en el registro oscilográfico, por lo tanto, esta variante debe ser reajustada en la tercera pendiente.

Finalmente, se debe mencionar que la corriente del flujo de potencia por la línea Arenal – Cerezos en el escenario de demanda máxima tiene un valor de 187 A, por lo tanto, se recomienda un factor de seguridad de 1.2, teniendo así un valor umbral de corriente diferencial de 230 A para evitar una mala operación de la protección.

🔧 Análisis de los ajustes finales propuestos para todas las variantes de operación sugeridas

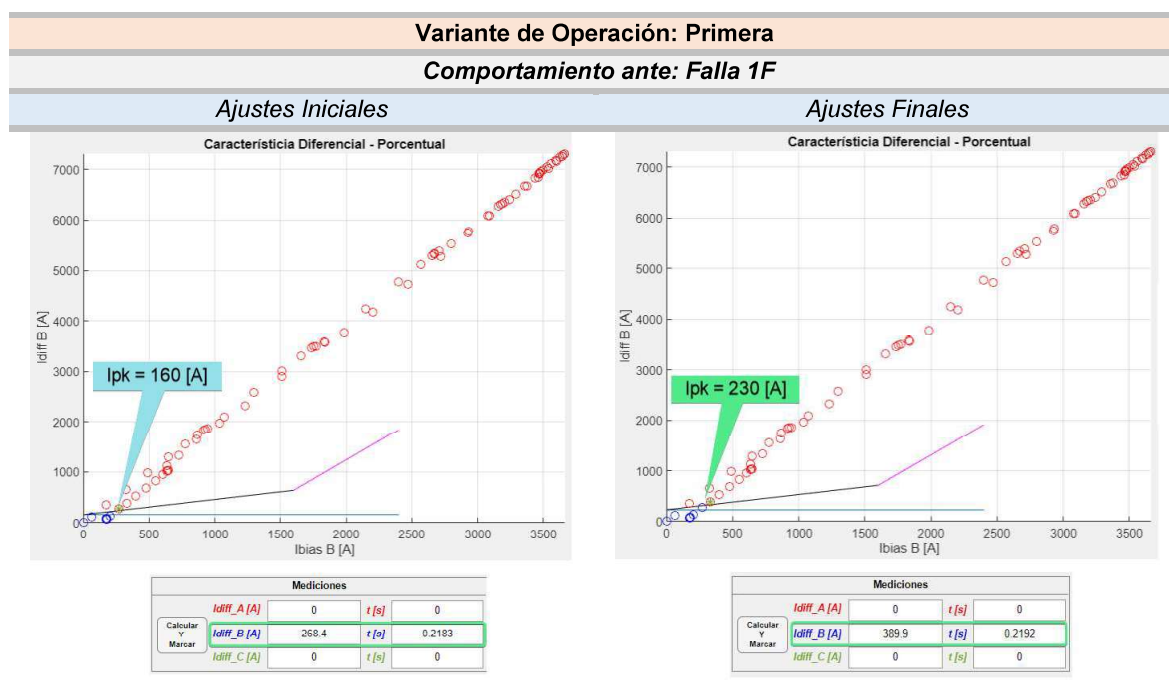


Figura 3.18. Ajustes finales de la primera variante de operación de la función 87L.

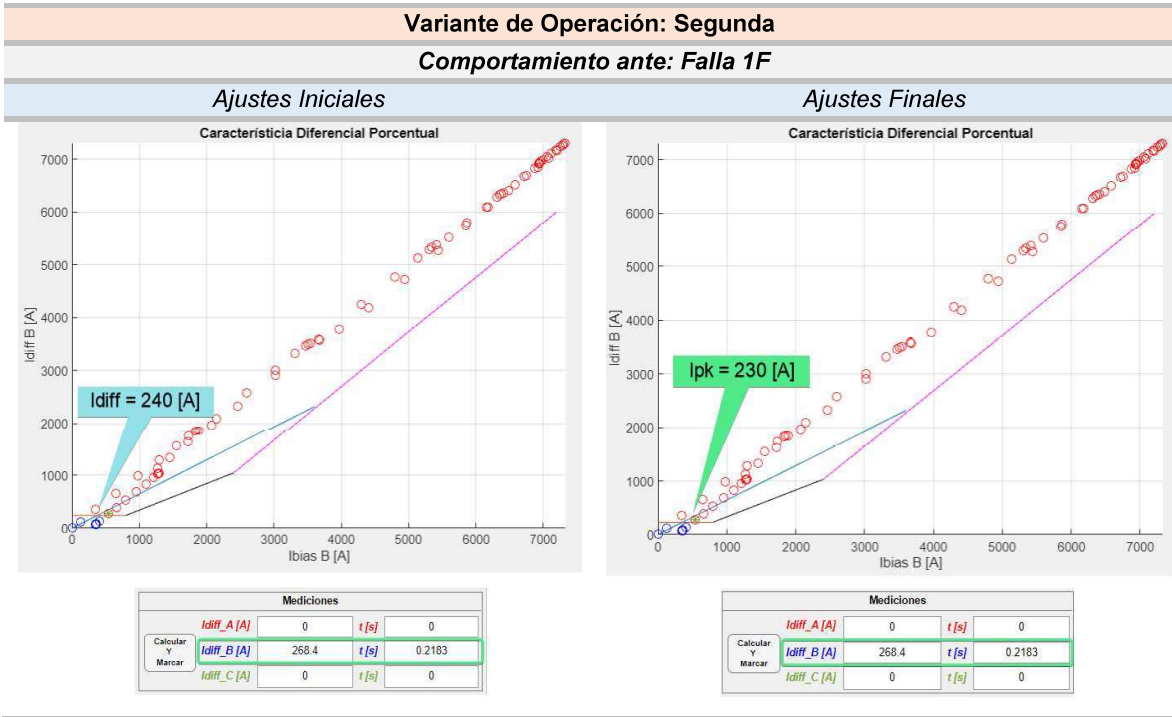


Figura 3.19. Ajustes finales de la segunda variante de operación de la función 87L.

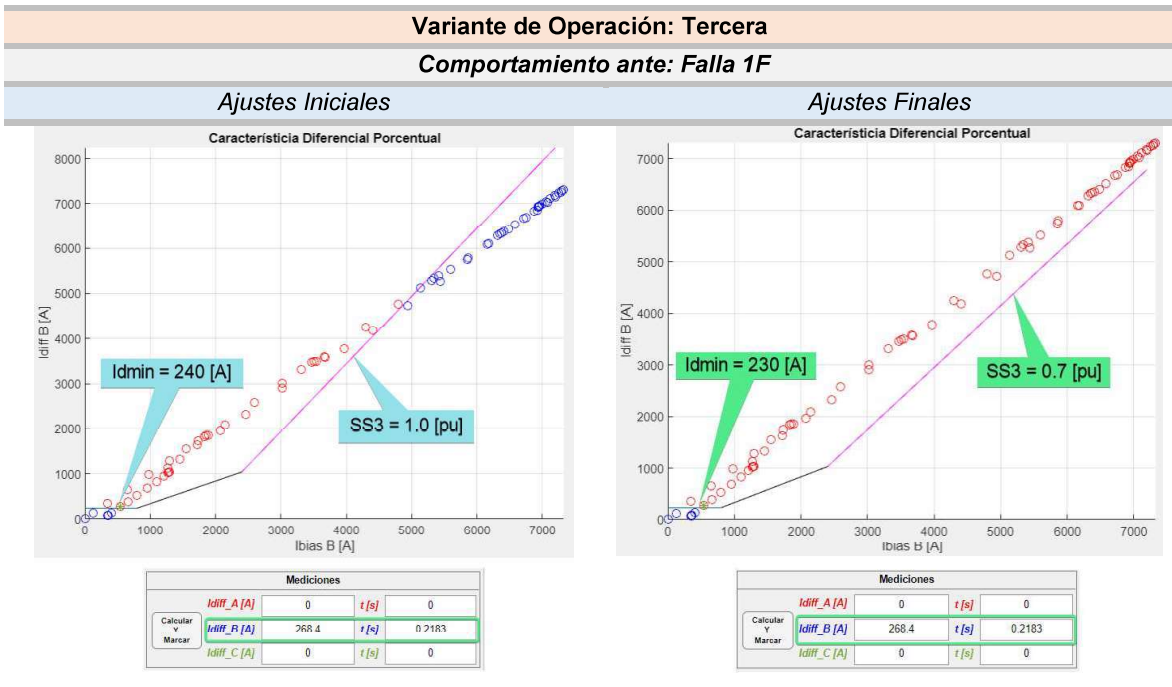


Figura 3.20. Ajustes finales de la tercera variante de operación de la función 87L.

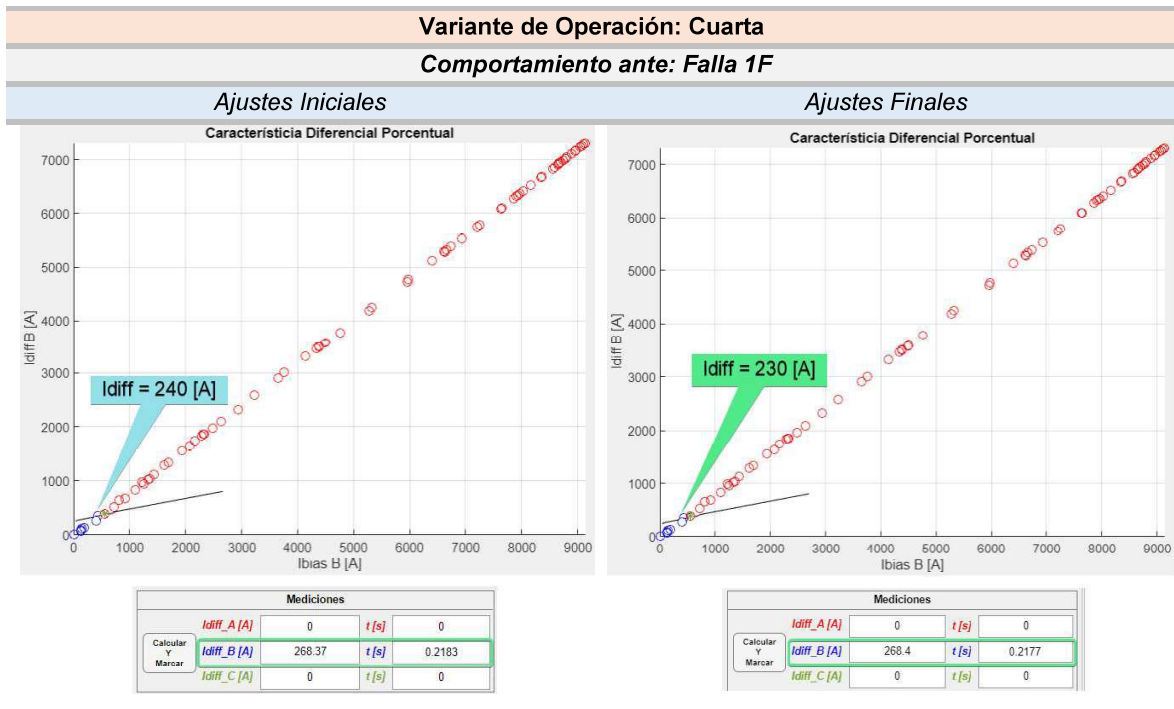


Figura 3.21. Ajustes finales de la cuarta variante de operación de la función 87L.

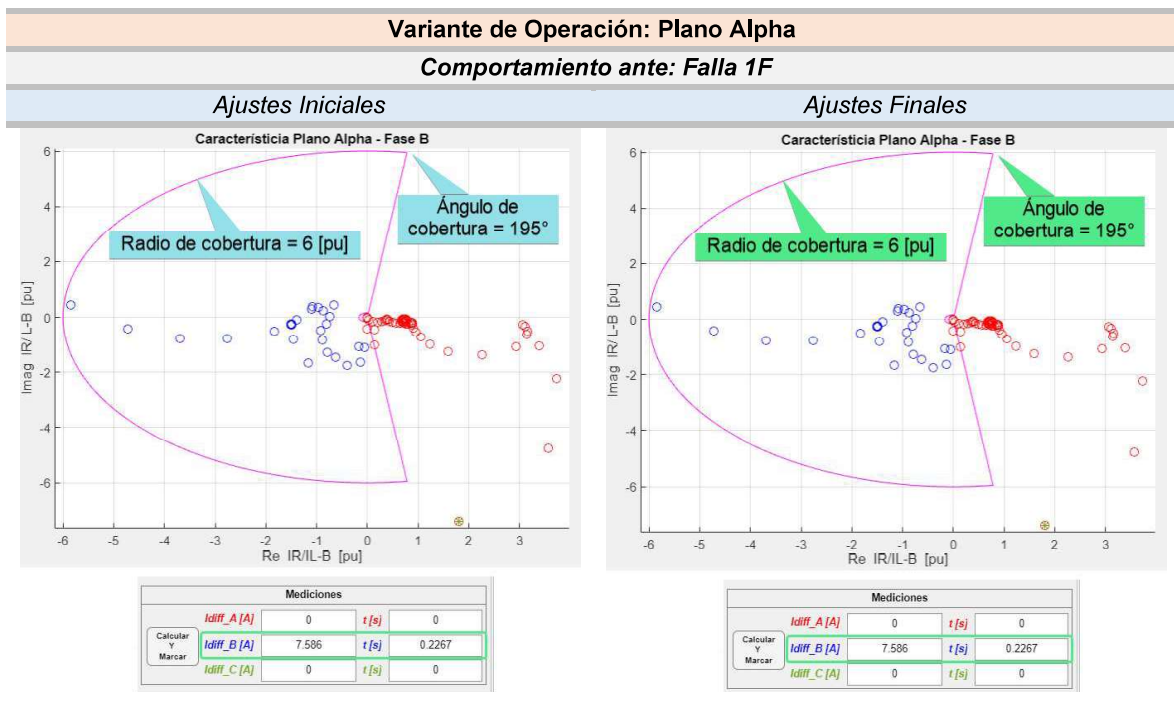


Figura 3.22. Ajustes finales de la variante de operación plano alpha de la función 87L.

A manera de resumen, se presenta la Tabla 3.3 con los ajustes finales establecidos en cada variante de la característica de operación analizada.

Tabla 3.3. Reajuste de los parámetros de cada variante de operación – Caso 2.

Variante	Ajustes	Iniciales	Propuestos
Primera	k1 [pu]	0.3	0.3
	k2 [pu]	1.5	1.5
	Ip _k [A]	160	230
	Is ₂ [A]	1600	1600
Variante	Ajustes	Iniciales	Propuestos
Segunda	k1 [pu]	0.5	0.5
	k2 [pu]	0.7	0.7
	Ip _k [A]	240	230
	knee1 [A]	800	800
knee2 [A]	2400	2400	
Variante	Ajustes	Iniciales	Propuestos
Tercera	SS2 [pu]	0.5	0.7
	SS3 [pu]	1.0	1.0
	ES1 [xIB]	1.0	1.0
	ES2 [xIB]	3.0	3.0
	IB [A]	800	800
	I _{dmin} [xIB]	0.3	0.2875

Variante	Ajustes	Iniciales	Propuestos
Cuarta	IDiff [A]	240	230
	IDiff_fast [A]	800	800
	CT_ch pu]	1.0	1.0
	CT_A [pu]	0.15	0.15
CT_B [pu]	0.25	0.25	
Variante	Ajustes	Iniciales	Propuestos
Plano	Radio [pu]	6	6
Alpha	Ángulo [deg]	195	195

De manera similar a lo realizado en el caso 1, para culminar el análisis del caso 2 se han resaltado en amarillo en la Tabla 3.3 los parámetros reajustados en este trabajo con respecto a los ajustes iniciales.

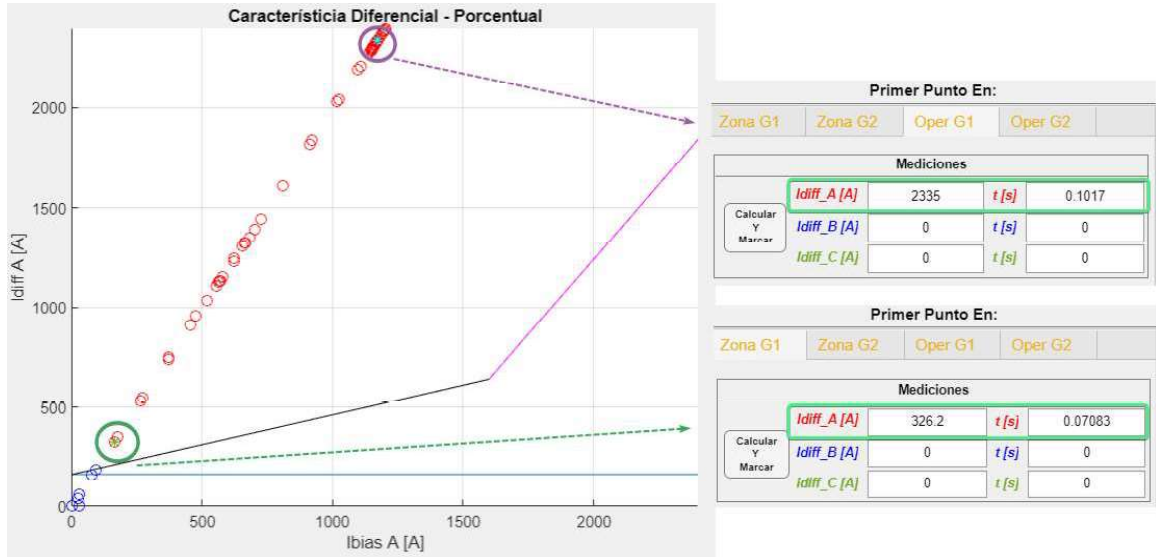
3.1.3. Caso 3.- Análisis de una falla real en la línea de subtransmisión Turi – Lentag

Se presentan las siguientes definiciones para el análisis de este caso:

- SE Local, corresponde a la SE Turi a 69 kV.
- SE Remota, corresponde a la SE Lentag a 69 kV.
- Línea de interés: corresponde a la línea Turi – Lentag.
- Relación de TCs en SE Local, 300:5.
- Relación de TCs en SE Remota, 300:5.

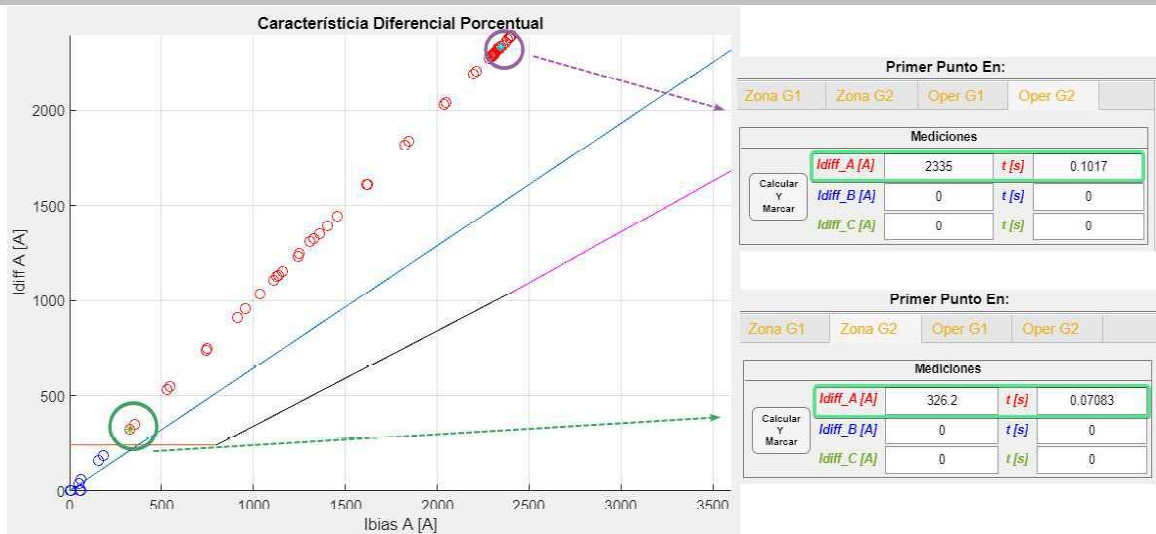
Para obtener la comparación de los ajustes entre los valores iniciales (ajustes de fábrica) y los valores finales (reajustes propuestos) la siguiente figura muestra los resultados de las representaciones gráficas iniciales obtenidas con la herramienta desarrollada.

Tipo De Falla	Interna
Variante de Operación	Primera
Configuración del Tipo de Falla	Monofásica
Tipo de Ajuste	De Fábrica



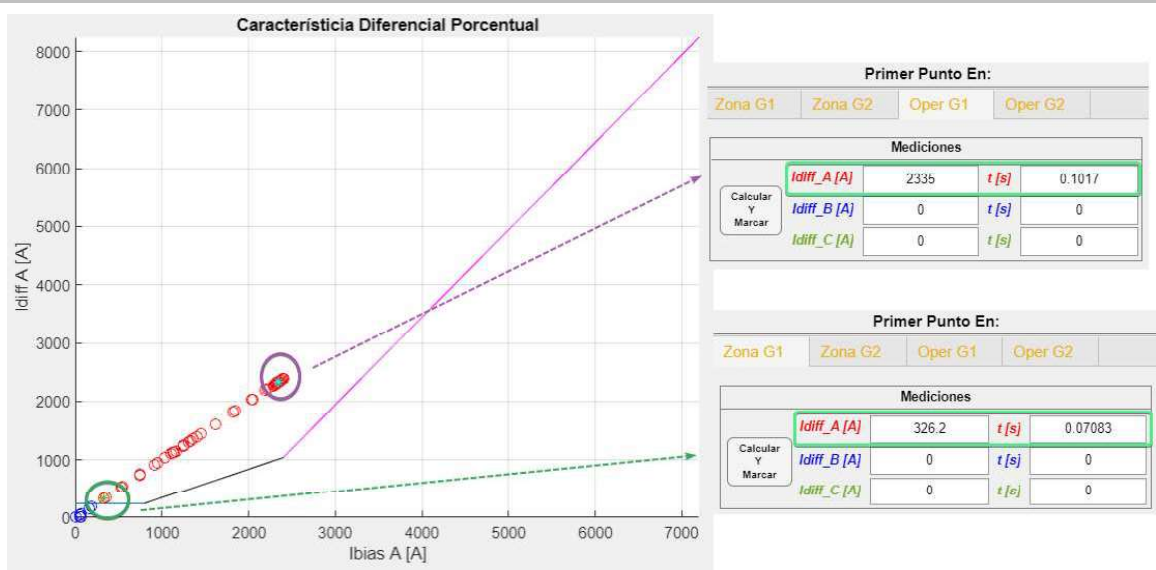
a)

Variante de Operación	Segunda
Configuración del Tipo de Falla	Monofásica
Tipo de Ajuste	De Fábrica



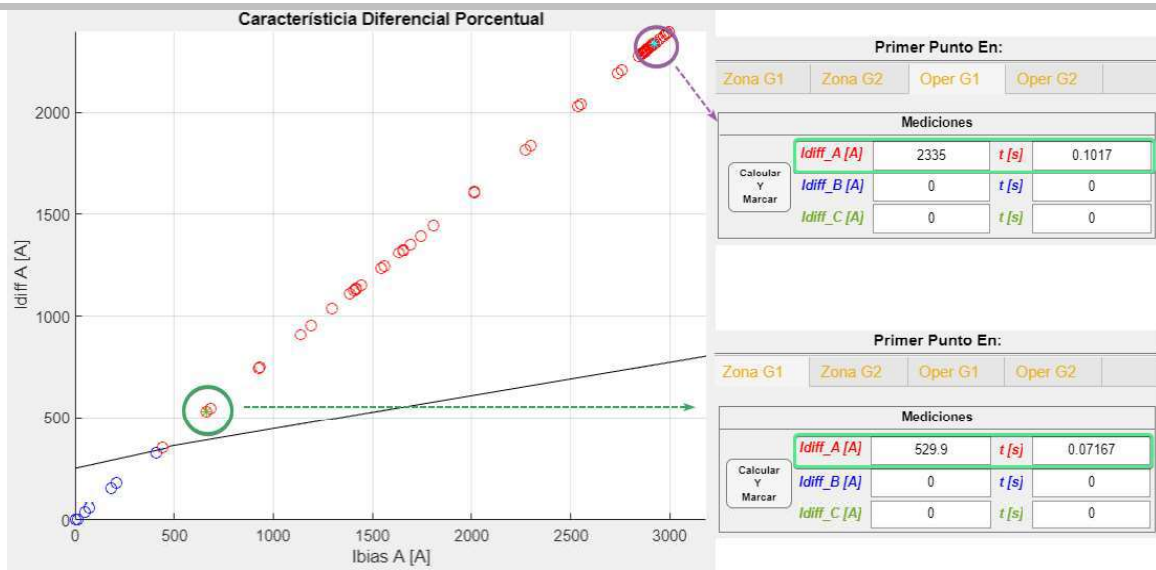
b)

Variante de Operación	Tercera
Configuración del Tipo de Falla	Monofásica
Tipo de Ajuste	De Fábrica



c)

Variante de Operación	Cuarta
Configuración del Tipo de Falla	Monofásica
Tipo de Ajuste	De Fábrica



d)

Variante de Operación	Plano Alpha
Configuración del Tipo de Falla	Monofásica
Tipo de Ajuste	De Fábrica

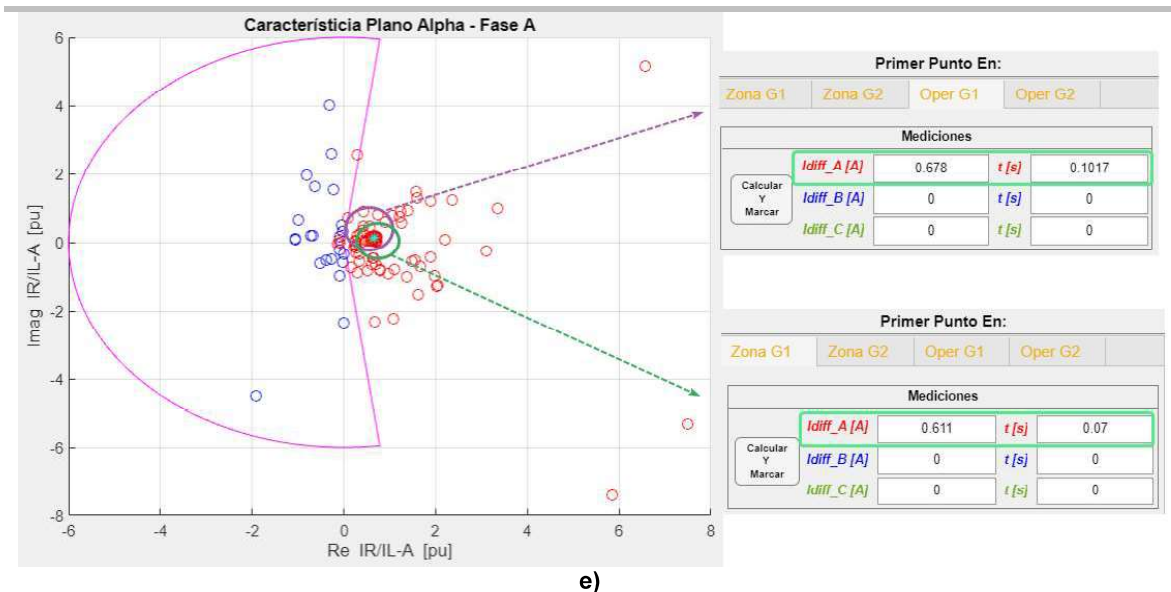


Figura 3.23. Representación de la corriente diferencial de una falla 1F en la línea Turi-Lentag en todas las variantes de operación.

- **Resultados y discusión.** –

De igual manera que en el caso anterior, es factible determinar el primer punto de corriente diferencial que ingresa en zona de operación de las distintas variantes analizadas, el primer punto de disparo de la función 87L y el valor de tiempo asociados a estas mediciones.

En este contexto, para las variantes de operación: primera, segunda y tercera, se evidencia el ingreso en zona de operación en un tiempo de 0.07083 s, mientras que para la cuarta variante de operación se tiene un tiempo de 0.07167 s, lo cual demuestra que el tiempo de ingreso en zona de actuación de la cuarta variante tiene un retardo de 0.84 ms respecto a las demás características porcentuales. En cuanto a la variante de operación plano alpha, se evidencia un tiempo de ingreso en zona de 0.070 s.

Por otra parte, el tiempo de operación de la función 87L es de 0.1017 s para todas las características debido a que este valor se encuentra dado por los datos de la oscilografía ingresada a la herramienta computacional.

Finalmente, se debe mencionar que la corriente del flujo de potencia de la línea Turi – Lentag en el escenario de demanda máxima tiene un valor de 59 A, por lo tanto, se recomienda un factor de seguridad de 1.3 teniendo un valor umbral de corriente diferencial de 80 A ante cambios eventuales en la transferencia de potencia por la línea Turi – Lentag.

➤ Análisis de los ajustes finales propuestos para todas las variantes de operación sugeridas

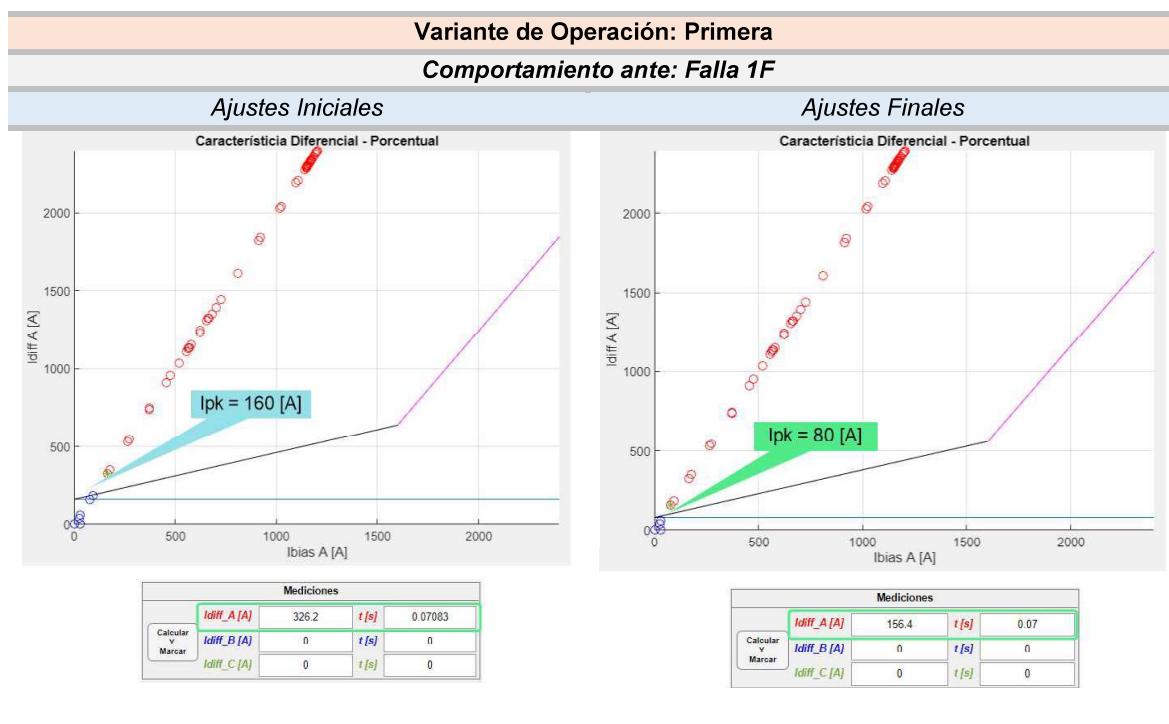


Figura 3.24. Ajustes finales de la primera variante de operación de la función 87L.

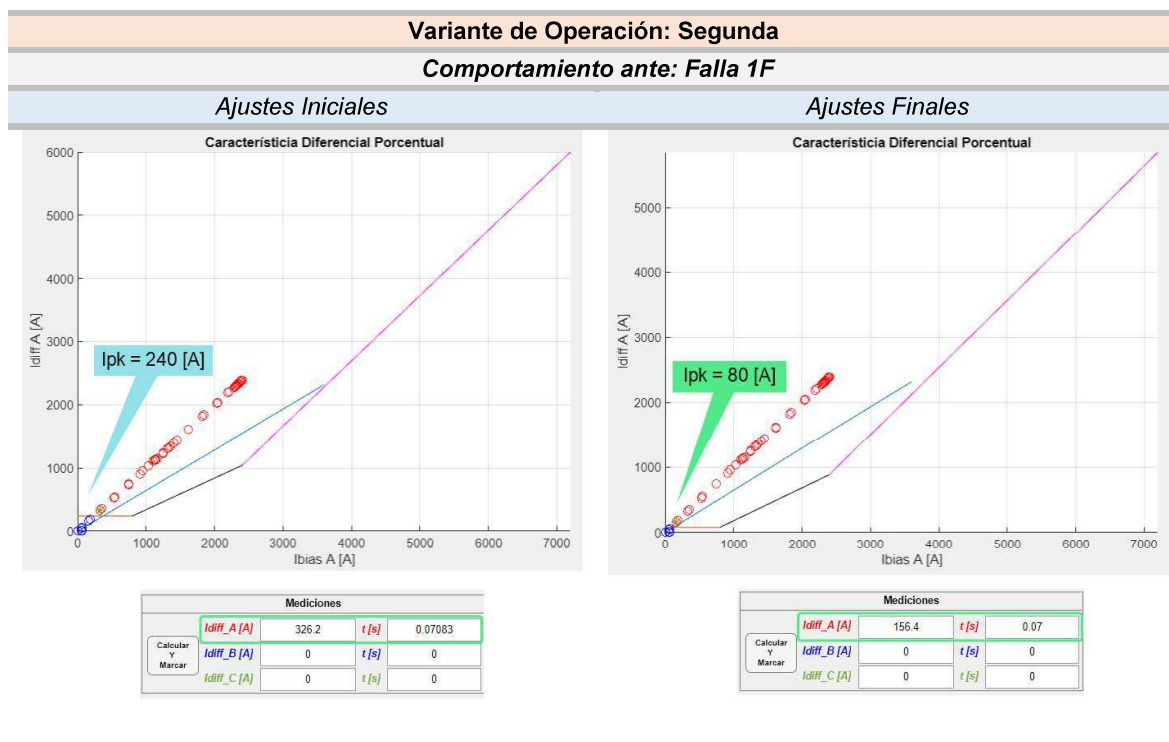


Figura 3.25. Ajustes finales de la segunda variante de operación de la función 87L.

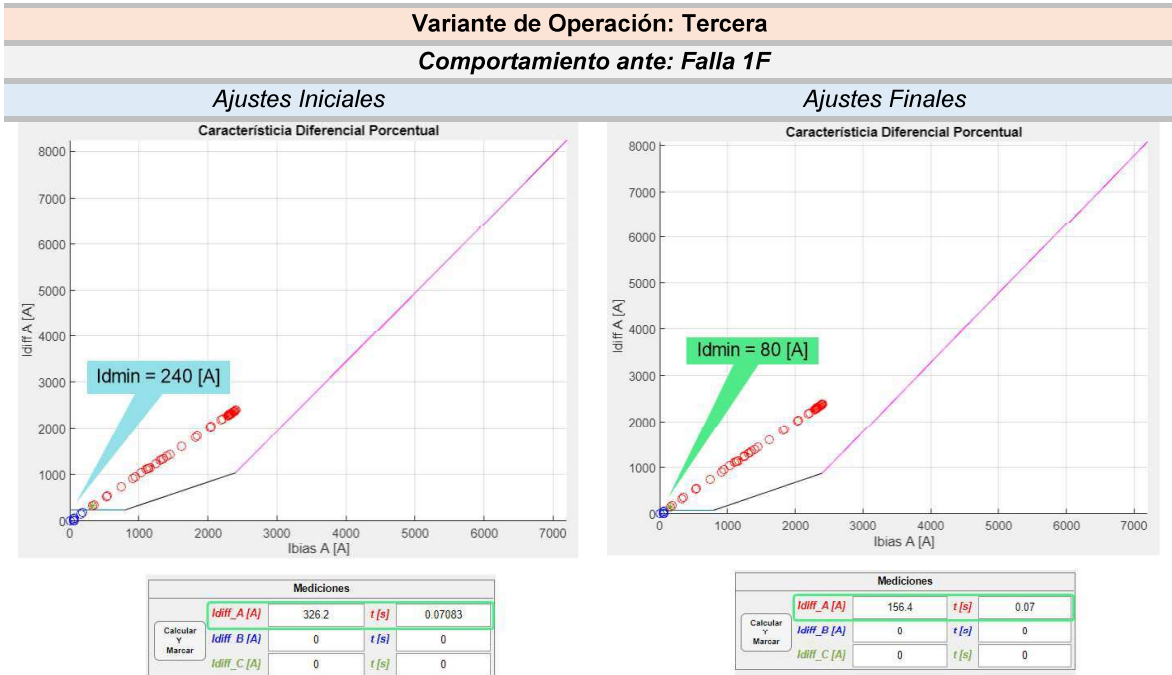


Figura 3.26. Ajustes finales de la tercera variante de operación de la función 87L.

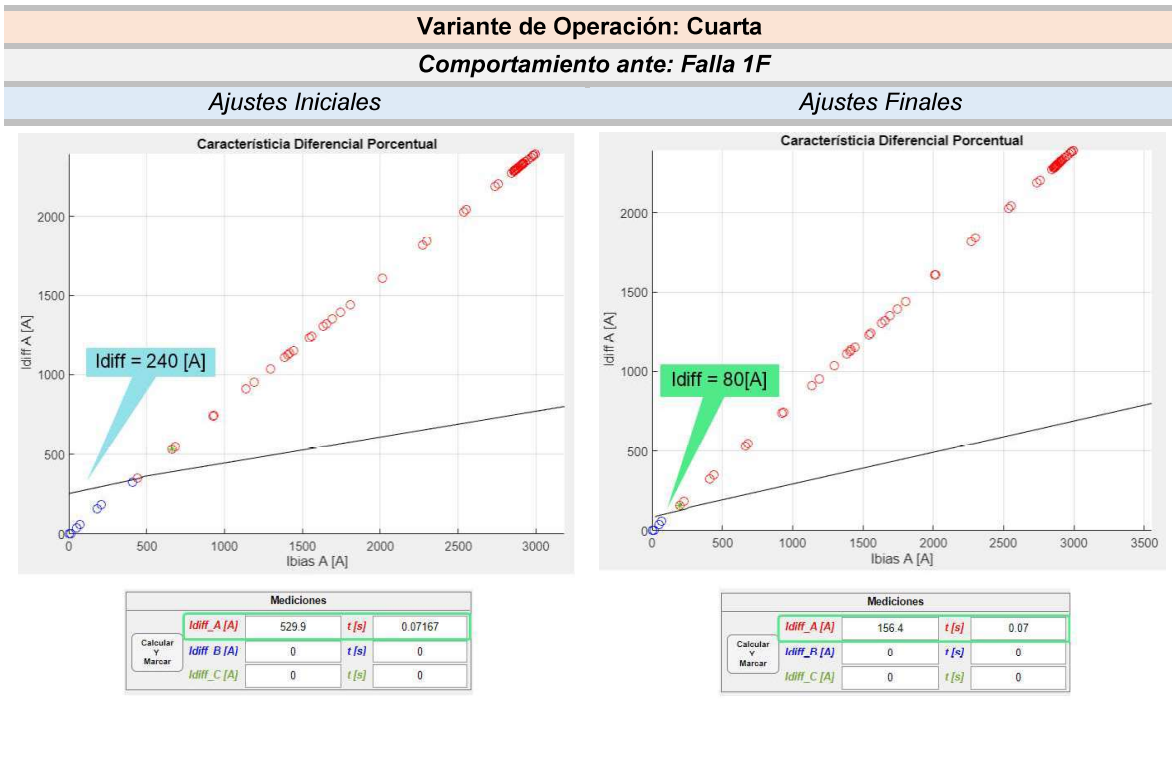


Figura 3.27. Ajustes finales de la cuarta variante de operación de la función 87L.

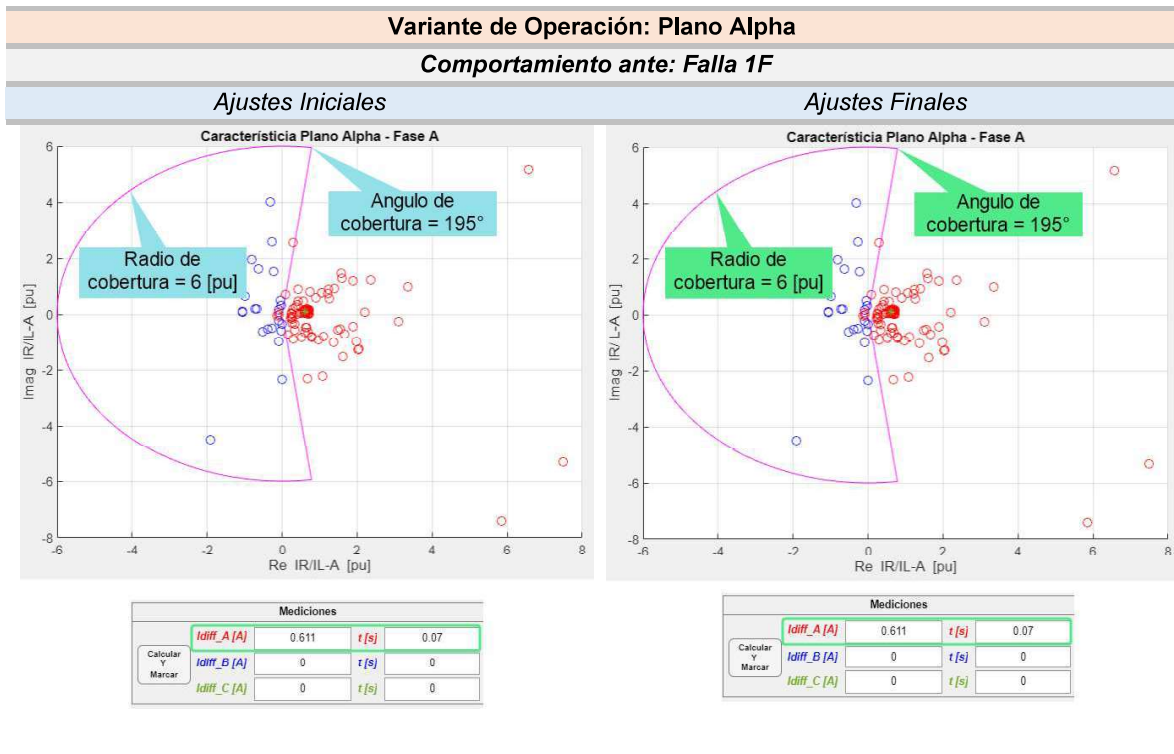


Figura 3.28. Ajustes finales de la variante de operación plano alpha de la función 87L.

A manera de resumen, se presenta la Tabla 3.4 con los ajustes finales establecidos en cada variante de la característica de operación analizada, donde se han resaltado en amarillo los cambios realizados con respecto a los ajustes iniciales.

Tabla 3.4. Reajuste de los parámetros de cada variante de operación – Caso 3.

Variante	Ajustes	Iniciales	Propuestos
Primera	k1 [pu]	0.3	0.3
	k2 [pu]	1.5	1.5
	l _{pk} [A]	160	80
	Is2 [A]	1600	1600
Variante	Ajustes	Iniciales	Propuestos
Segunda	k1 [pu]	0.5	0.5
	k2 [pu]	0.7	0.7
	l _{pk} [A]	240	80
	knee1 [A]	800	800
	knee2 [A]	2400	2400
Variante	Ajustes	Iniciales	Propuestos
Tercera	SS2 [pu]	0.5	0.5
	SS3 [pu]	1.0	1.0
	ES1 [xIB]	1.0	1.0
	ES2 [xIB]	3.0	3.0
	IB [A]	800	800
	Idmin [xIB]	0.3	0.1

Variante	Ajustes	Iniciales	Propuestos
Cuarta	IDiff [A]	240	80
	IDiff_fast [A]	800	800
	CT_ch pu]	1.0	1.0
	CT_A [pu]	0.15	0.15
	CT_B [pu]	0.25	0.25
Variante	Ajustes	Iniciales	Propuestos
Plano	Radio [pu]	6	6
Alpha	Ángulo [deg]	195	195

4. CONCLUSIONES

4.1. Conclusiones

El análisis comparativo conforme la metodología propuesta para cada una de las variantes consideradas en este trabajo, permite establecer nuevos ajustes de la función de protección 87L para una línea de interés considerando la mayor cantidad de eventos de falla que pueden suscitarse.

A partir del esquema de simulación de fallas propuesto y conforme a los resultados obtenidos, se establece que los tipos de falla y las configuraciones propuestas permiten obtener ajustes adecuados de la función 87L.

La variante de operación plano alpha de la función 87L presenta mayor sensibilidad para fallas internas y seguridad para fallas externas respecto al resto de variantes, especialmente cuando se trata de mejorar la seguridad ante la presencia de niveles de saturación intermedios y altos en los TCs, además que la variante plano alpha brinda mayor facilidad para su reajuste.

Los resultados obtenidos una vez realizadas las pruebas con la herramienta desarrollada, muestran la necesidad de analizar los ajustes de las variantes de operación de la función 87L para una línea de subtransmisión en específico usando el esquema de pruebas propuesto. Esto permite gestionar mejoras en el desempeño de la función de protección respecto al funcionamiento inicial establecido con los ajustes de fábrica.

En las pruebas obtenidas para el análisis de la variante plano alpha, se observa que para la línea Sinincay-Cañar se debe incrementar el radio de cobertura con la finalidad de abarcar e ingresar la mayor cantidad de puntos de corriente diferencial de los escenarios de alta saturación de los TCs en la zona de restricción, y así evitar una mala operación de la función 87L.

La sincronización de las señales de corriente de los extremos de una línea de subtransmisión ante el análisis pos-falla de un evento real es imprescindible, ya que para definir correctamente los ajustes de la función 87L en cualquiera de las variantes presentadas se necesita calcular e interpretar adecuadamente la corriente diferencial y la corriente de restricción.

Los valores de los ajustes de fábrica brindan un margen de seguridad que en algunas ocasiones es demasiado amplio, como se evidenció en el Caso 3, puesto que las líneas de subtransmisión contemplan varias topologías y diversos flujos de potencia. Por lo tanto, mediante la metodología propuesta y con la ayuda de la herramienta computacional desarrollada, se presentan mejoras tanto en los ajustes finales de las variantes de operación analizadas ya que éstas son específicas para la línea en análisis, como en el desempeño de la función 87L y consecuentemente en el IED de protección.

La variante de operación plano alpha presentó para la mayoría de los casos del esquema de fallas propuesto una mayor sensibilidad y tolerancia de su característica de operación. Sin embargo, en ciertos casos la característica de operación de la cuarta variante fue la que presentó un mejor desempeño, justificando así el análisis de la función 87L de manera específica para una línea y para cada fabricante, evidenciando la importancia y los beneficios que brindan la metodología propuesta y la herramienta computacional desarrollada.

La aplicación de la herramienta computacional desarrollada permite agilizar el análisis de los eventos de fallas considerando registros oscilográficos reales, reduciendo el tiempo de análisis.

4.2. Recomendaciones

Para utilizar la metodología propuesta para el ajuste de la función 87L, se recomienda revisar los ajustes existentes de cada variante de operación de la función 87L e inicializarlos en los valores por defecto de cada fabricante, con la finalidad de establecer y contrastar los resultados obtenidos una vez aplicada la metodología.

Las oscilografías reales o simuladas deben ser procesadas a fin de ubicar las variables eléctricas en el orden específico de lectura para facilidad de la herramienta desarrollada. Además, se debe asegurar una correcta sincronización de las señales de corriente para obtener e interpretar correctamente la corriente diferencial.

Utilizar el botón “Limp” de la herramienta computacional antes de realizar un nuevo cálculo o representación gráfica de las variantes de operación de la función 87L, o a su vez, el ingreso de nuevos archivos en formato COMTRADE individuales o en conjunto.

4.3. Trabajos futuros

La herramienta computacional desarrollada permite el análisis de la función de protección 87L entre dos terminales, sin embargo, se puede implementar de manera adicional los algoritmos para el cálculo de la corriente diferencial y de restricción ante la presencia de varias terminales en los extremos de la línea.

Incorporar los ajustes y los algoritmos de la protección de tierra de las principales variantes de operación de la función 87L, los cuales no son considerados en el análisis y ajuste realizado por parte de las empresas distribuidoras. Esto complementaría la funcionalidad y versatilidad de la herramienta desarrollada en cuanto a la protección diferencial de fase y tierra para distintos IEDs comerciales.

5. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] I. Ferreira, R. Prado de Medeiros, y F. Bezerra, «A Performance Analysis of Alpha-Plane and Percentual Transmission Line Differential Protections», p. 6, 2018.
- [2] G. Benmouyal, T. Lee, y W. Usa, «Securing Sequence-Current Differential Elements», *31st Annual Western Protective Relay Conference*, p. 31, 2004.
- [3] IEEE Power System Relaying Committee, «IEEE Guide for Power System Protection Testing», New York, sep. 2009.
- [4] «IEEE Guide for Application of Digital Line Current Differential Relays Using Digital Communication», IEEE, New York, 2015. doi: 10.1109/IEEESTD.2015.7181615.
- [5] Y. Xue, B. Kasztenny, D. Taylor, y Y. Xia, «Line Differential Protection Under Unusual System Conditions», p. 18, jul. 2013.
- [6] H. Altuve y E. Schweitzer, *Soluciones modernas para protección, control y supervisión de sistemas eléctricos de potencia*. Pullman, WA 99163, 2014.
- [7] L. Santos y P. Silveira, «Evaluation of Numerical Current Differential Protection Algorithms for Series Compensated Transmission Lines», en *2006 IEEE/PES Transmission & Distribution Conference and Exposition: Latin America*, Caracas, Venezuela: IEEE, 2006, pp. 1-6. doi: 10.1109/TDCLA.2006.311561.
- [8] J. Blumschein, T. Kerger, y R. Matussek, «Interoperability of Line Differential Protection», en *2021 74th Conference for Protective Relay Engineers (CPRE)*, College Station, TX, USA: IEEE, mar. 2021, pp. 1-6. doi: 10.1109/CPRE48231.2021.9429837.
- [9] Schneider Electric, *MiCOM P543/P544/545/P546 Protección Diferencial de Intensidad - Manual Técnico*. 35 rue Joseph Monier, France: Schneider Electric, 2010.
- [10] NR Electric, *PCS-931S Line Differential Relay - Technical Manual*. China, 2019.
- [11] ABB, *Line differential protection RED670 2.0 IEC - Technical Manual*, 2.0. en Relion 670 series. ABB, 2016.
- [12] Siemens, *Siemens - SIPROTEC 5 Protección de distancia, diferencial de línea y de sobreintensidad para disparo tripolar 7SA84, 7SD84, 7SA86, 7SD86, 7SL86, 7SJ86*. 2014.
- [13] Y. Zengli y X. Yin, «Study on Transformer Inrush Current and CT Saturation as well as the Impact of Their Coupling Effect on Protection», presentado en *IEEE Transportation Electrification Conference and Expo, Asia-Pacific (ITEC Asia-Pacific)*, Wuhan, China, 2017, p. 6.
- [14] B. Chere, R. Ulloa, A. Ulloa, A. Martínez, J. Escobar, y J. Mercado, «Estudio de saturación de transformadores de corriente: análisis y simulación», presentado en *Brazilian Applied Science Review*, Curitiba, abr. 2021, pp. 1222-1243. doi: 10.34115/basrv5n2-045.
- [15] S. Ward y T. Erwin, «Current Differential Line Protection Setting Consideration...», p. 28.
- [16] C. Werstiuk, «End-to-End Testing». 2010.

[17] P. M. Anderson, C. Henville, R. Rifaat, B. Johnson, y S. Meliopoulos, *Power System Protection*, 1.^a ed. Wiley, 2022. doi: 10.1002/9781119513100.



ESCUELA POLITÉCNICA NACIONAL
Campus Politécnico "J. Rubén Orellana R."

FACULTAD DE INGENIERÍA ELÉCTRICA Y ELECTRÓNICA
DEPARTAMENTO DE ENERGÍA ELÉCTRICA

ORDEN DE EMPASTADO

De conformidad al **REGLAMENTO DE RÉGIMEN ACADÉMICO DE LA ESCUELA POLITÉCNICA NACIONAL** aprobado por Consejo Politécnico en Octubre de 2017, cuyo Artículo 101 referente a la Calificación del trabajo de titulación o tesis de grado indica que *"Si la calificación promedio fuere igual o superior a siete puntos sobre diez, el Director del Trabajo de Titulación o Tesis de Grado, presentará a la máxima autoridad de la unidad académica, un informe respecto al cumplimiento de las sugerencias planteadas por los miembros del Tribunal; luego de lo cual la máxima autoridad de la unidad académica autorizará la impresión y encuadernación final del Trabajo de Titulación o Tesis de Grado."*, una vez verificado el cumplimiento del formato de presentación establecido, autorizo la impresión y encuadernación final del Trabajo de Titulación presentado por el señor:

RUBEN OMAR SEMANATE ZAPATA,

Fecha de autorización: 09 de enero de 2024.

HUGO NEPTALI Firmado digitalmente
por HUGO NEPTALI
ARCOS ARCOS MARTINEZ
MARTINEZ Fecha: 2024.01.09
10:52:55 -05'00'

Dr. Hugo Neptalí Arcos Martínez
Jefe del Departamento de Energía Eléctrica

Mónica G