



UNIVERSIDAD POLITÉCNICA SALESIANA

SEDE GUAYAQUIL

CARRERA DE ELECTRICIDAD

“EVALUACIÓN DEL IMPACTO DE LA SATURACIÓN DE TRANSFORMADORES DE CORRIENTE EN LA ACTUACIÓN DE PROTECCIONES DIFERENCIALES DE TRANSFORMADOR CONSIDERANDO CORRIENTES DE INRUSH Y FALLAS EXTERNAS”.

Trabajo de titulación previo a la obtención del

Título de Ingeniero Eléctrico

AUTORES: Jorge Joshue Pérez Moya

TUTOR: Ing. Roy Freddy Santana Jara.

Guayaquil – Ecuador

2026

CERTIFICADO DE RESPONSABILIDAD Y AUTORÍA DEL TRABAJO DE TITULACIÓN

Yo, Jorge Joshue Pérez Moya con documento de identificación N° 0926648999 manifiesto que:

Soy el autor y responsable del presente trabajo; y, autorizo a que sin fines de lucro la Universidad Politécnica Salesiana pueda usar, difundir, reproducir o publicar de manera total o parcial el presente trabajo de titulación.

Guayaquil, 20 de octubre del año 2025

Atentamente;



Jorge Joshue Perez Moya
CI: 0925231805

CESIÓN DE DERECHOS DE AUTOR

Yo, Jorge Joshue Pérez Moya, con número de identificación N° 0926648999, que por mi intención y mediante este documento cedo a la Universidad Politécnica Salesiana la titularidad de los derechos económicos debido a que soy el creador del Proyecto Técnico: “EVALUACIÓN DEL IMPACTO DE LA SATURACIÓN DE TRANSFORMADORES DE CORRIENTE EN LA ACTUACIÓN DE PROTECCIONES DIFERENCIALES DE TRANSFORMADOR CONSIDERANDO CORRIENTES DE INRUSH Y FALLAS EXTERNAS”. Este trabajo fue diseñado para conseguir el grado de Ingeniero en Electricidad en la Universidad Politécnica Salesiana. La Universidad está autorizada para ejercer completamente los derechos que se habían transferido.

Conforme a lo expresado, firmamos este documento al momento de entregar el trabajo final en formato digital a la biblioteca de la Universidad Politécnica Salesiana.

Guayaquil, 22 de Diciembre del año 2025

Atentamente;




Jorge Joshue Perez Moya
CI: 0926648999

CERTIFICADO DE DIRECCIÓN DE TRABAJO DE TITULACIÓN

Yo, Roy Freddy Santana Jara, docente de la Universidad Politécnica Salesiana y con número de identificación N° 0923481915, certifico que el trabajo de titulación "EVALUACIÓN DEL IMPACTO DE LA SATURACIÓN DE TRANSFORMADORES DE CORRIENTE EN LA ACTUACIÓN DE PROTECCIONES DIFERENCIALES DE TRANSFORMADOR CONSIDERANDO CORRIENTES DE INRUSH Y FALLAS EXTERNAS", fue realizado por Jorge Joshue Perez Moya (número de identificación N° 0926648999). Este trabajo obtuvo como resultado final el trabajo de titulación bajo la opción Proyecto Técnico, cumpliendo con todos los requerimientos establecidos por la Universidad Politécnica Salesiana.

Guayaquil, 22 de Diciembre del año 2025

Atentamente;



Ing. Roy Freddy Santana Jara, MSc
CI: 0910972637

DEDICATORIA

El presente trabajo de titulación. Se lo dedico a mis amados padres quienes con su amor, consejos, experiencia y apoyo permanente. han sido un pilar fundamental a lo largo de estos cuatro años de formación profesional. Además, un agradecimiento especial a mi abuelita materna que desde el cielo. me ha estado bendiciendo constantemente y a mi mascota Kyro que siempre ha estado a mi lado.

Todos ellos me han demostrado que confían en mi capacidad y dedicación para lograr estas metas y las que con la bendición de Dios permita que se den en un buen futuro.

Jorge Joshue Pérez Moya

AGRADECIMIENTO

Deseo agradecer principalmente a Dios por ser el inspirador y darme la fuerza para continuar con el anhelo de culminar con esta meta. tan deseada de ser Ingeniero en Electricidad. Su guía y bendiciones diarias han sido mi mayor fortaleza a lo largo de mi trayectoria como universitario.

Luego, también agradecer a mi padre y a mi madre que con esfuerzo y amor me han apoyado en cada paso de este trayecto.

De igual manera un agradecimiento a la Universidad Politécnica Salesiana del Ecuador, a toda la Facultad de Ingeniería Eléctrica, a los profesores por darme la oportunidad de ser parte de esta prestigiosa Institución.

Agradezco a mi Tutor de proyecto Ing. Roy Santana, al Ingeniero Carlos Chávez y también al Ing. Julio Silva quienes, con sus conocimientos de la carrera, su paciencia y gestos de apoyo han contribuido a mi formación académica. Y que con su dedicación y esfuerzo han compartido su experiencia lo que ha sido fundamental para alcanzar la elaboración de mi proyecto de titulación dejando en mí, valores y aprendizajes que marcarán mi futuro.

Jorge Joshue Pérez Moya

ÍNDICE DE CONTENIDO

CERTIFICADO DE RESPONSABILIDAD Y AUTORÍA DEL TRABAJO DE TITULACIÓN	ii
CESIÓN DE DERECHOS DE AUTOR	iii
CERTIFICADO DE DIRECCIÓN DE TRABAJO DE TITULACIÓN	iv
DECICATORIA	v
AGRADECIMIENTO	vi
ÍNDICE DE CONTENIDO	vii
ÍNDICE DE FIGURAS	x
RESUMEN	xi
ABSTRACT	xii
ACRONIMOS	xii
CAPITULO I	1
1 TITULO	1
1.1 ANTECEDENTES	1
1.2 INTRODUCCIÓN	2
1.3 PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA	3
1.4 JUSTIFICACIÓN	3
1.5 ALCANCE	4
1.6 BENEFICIARIOS	5
1.7 OBJETIVOS	6
1.7.1 OBJETIVO GENERAL	6
1.7.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS	6
CAPITULO II	7
2.1. FUNDAMENTO TEÓRICO	7
2.1.1. INTRODUCCIÓN A RELE DIFERENCIAL (87)	7
2.1.2. REPRESENTACIÓN MATEMÁTICA Y COMPORTAMIENTO DEL RELÉ DIFERENCIAL	8
ANÁLISIS DEL COMPORTAMIENTO DEL SISTEMA	8
ECUACION MATEMATICA DEL COMPORTAMIENTO DEL RELE	9

2.1.2.1. IMPACTO QUE TIENEN LOS TRANSFORMADORES DE CORRIENTE AL ENTRAR EN ESTADO DE SATURACIÓN MAGNÉTICA.....	10
2.1.2.2. TRANSFORMADOR DE CORRIENTE (TC).....	10
2.1.2.3. CIRCUITO EQUIVALENTE	10
2.1.2.4. CARACTERÍSTICAS PRINCIPALES DE LOS TC	11
2.1.2.6. COMPORTAMIENTO DEL NÚCLEO DEL TC.....	12
2.1.2.7. CLASE DE PRECISIÓN Y FACTOR DE SOBRECORRIENTE.	12
COMPORTAMIENTO DEL TRANSFORMADOR DE CORRIENTE CUANDO ENTRA EN SATURACION MAGNETICA.....	12
OSCILACIONES DE CORRIENTE PRIMARIA Y SECUNDARIA MEDIDAS POR LA CURVA TC VS TIEMPO.....	13
ANALISIS DEL COMPORTAMIENTO DEL SISTEMA.....	13
2.1.2.8. USO DEL CMC 356 PARA LA EVALUACIÓN DEL COMPORTAMIENTO DEL SISTEMA	14
2.1.2.9. IMPORTANCIA DE LA EVALUACIÓN DEL COMPORTAMIENTO DE LA CURVA DEL RELÉ 87T.....	15
2.1.3. TIPOS DE 3 CONDICIONES TÍPICAS QUE PERJUDICA AL RELÉ (87T). .	15
2.1.4. MAGNITUD DE LA CORRIENTE INRUSH	17
2.1.5. COMPORTAMIENTO DE LA CURVA INRUSH.....	17
2.1.6. COMPORTAMIENTO MATEMATICO DE LA CURVA INRUSH.....	18
CAPITULO III	19
3. DESCRIPCIÓN DEL CASO DE ESTUDIO	19
3.1. DIAGRAMA UNIFILAR DE LAS PROTECCIONES DIFERENCIALES DEL TRANSFORMADOR Y ECUACIONES DURANTE UNA FALLA INTERNA Y EXTERNA.	19
3.2. DATOS DE LOS COMPONENTES	20
3.3. CALCULO DE CORRIENTE DIFERENCIAL DURANTE UNA FALLA EXTERNA ASUMIENDO LA CLASE DE PRECISION Y FACTOR DE SOBRECORRIENTE 5P10.....	20
3.4. COMPORTAMIENTO DEL RÉLE DIFERENCIAL 87T CON LA MARCA DEL FABRICANTE SEL-387.....	21
CAPITULO IV.....	22
4. PRUEBA CON EL PROGRAMA OMICRON TEST UNIVERSE	22
INTERFAZ DE CONFIGURACION DEL OBJETO DE PRUEBA Y HADWARE. ..	23
CAPITULO V	31

METODOLOGÍA.....	31
5. CARACTERÍSTICA DE SATURACIÓN CON HISTÉRESIS	32
6. MODELO DEL SISTEMA CUANDO SE PRESENTA UNA FALLA INTERNA. 37	
7. COMPORTAMIENTO CARACTERÍSTICO DEL RELE DIFERENCIAL MEDIANTE UNA FALLA INTERNA.	38
8. MODELO DEL SISTEMA CUANDO SE PRESENTA UNA FALLA EXTERNA 39	
9. COMPORTAMIENTO CARACTERÍSTICO DEL RELE DIFERENCIAL MEDIANTE UNA FALLA EXTERNA	40
10. COMPORTAMIENTO CUANDO ENTRA EN SATURACIÓN MAGNÉTICA EL TC.....	41
11. MODELO DEL SISTEMA TRIFÁSICO CON EL TRANSFORMADOR DE POTENCIA, PROTECCION DIFERENCIAL EN SIMULINK.	43
12. COMO ESTA COMPUESTO EL RELE DIFERENCIAL	44
12.1. CONCLUSIONES	61
12.2. RECOMENDACIONES	61
CAPITULO VI	62
13. REFERENCIAS BIBLIOGRAFICAS	62
13.1. ANEXOS	64

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1. Comportamiento del relé diferencial en Excel	8
Figura 2. Circuito equivalente de un transformador de corriente.....	10
Figura 3. El circuito equivalente del TC.	11
Figura 4. Comportamiento de un TC durante saturación	13
Figura 5. Partes que conforma el Ómicron CMC 356.....	14
Figura 6. Comportamiento del Inrush mediante la Energización.....	17
Figura 7. Modelo de un sistema eléctrico durante una falla interna y externa.	19
Figura 8. Modelo Matemático de la Falla externa considerando la Clase de protección.	20
Figura 9. Comportamiento Característico del relé diferencial según la marca del Fabricante (SEL-387)	21
Figura 10. Programa Test Universe versión 5.00.....	22
Figura 11. Software del programa.....	23
Figura 12. Configuración del sistema en test Universe.....	24
Figura 13. Registro de datos de los Componentes.	25
Figura 14. Registro de datos de los TC	26
Figura 15. Ajuste en el relé diferencial.	27
Figura 16. Registro de datos de los Componentes.	27
Figura 17. Ajuste del Contenido Armónico.	28
Figura 18. Armónico de Sobreexcitación.....	28
Figura 19. Comprobación del cableado mediante inducción de falla externa.....	29
Figura 20. Comportamiento fasorial de una falla externa.	29
Figura 21. Evaluación de la Prueba de una Falla Externa.....	30
Figura 22. Operación del comportamiento característico del relé ante una falla interna y externa.	30
Figura 23. Características de saturación con histéresis.	32
Figura 24. Característica de saturación con histéresis.....	33
Figura 25. Comportamiento de saturación con histéresis en situación transitoria.	34
Figura 26. Sistema eléctrico de energía eléctrica altamente confiable.....	36
Figura 27. Simulación induciendo una Falla Interna en Digsilent.	37
Figura 28. Actuación del relé diferencial mediante una Falla interna.....	38
Figura 29. Simulación induciendo una Falla Externa en Digsilent.....	39
Figura 30. Actuación del relé diferencial mediante una Falla interna.....	40
Figura 31. Comportamiento del Inrush mediante la Energización.....	41
Figura 32. Comportamiento de durante la Saturación magnética del Núcleo TC.....	42
Figura 33. Sistema eléctrico incorporando los TC y el relé diferencial.	43
Figura 34. Modelo del relé diferencial en Simulink.....	44
Figura 35. Modelo del relé diferencial en simulink.	45
Figura 36. Actuación del relé diferencial durante una falla Externa.....	46
Figura 37. Energización del LH del Transformador y Secundario en corto.	48
Figura 38. Actuación del relé diferencial mediante un Inrush.	49
Figura 39. Comportamiento de la Curva magnetización según su Clase de Precisión.	50
Figura 40. Ajuste detallado del comportamiento del relé 87T	51
Figura 41. Conexión de la maleta ómicron al relé 87T.....	52
Figura 42. Partes posteriores que compone la maleta Ómicron.....	52
Figura 43. Conexión de la maleta ómicron Función medición Analógica a la Computadora.....	53
Figura 44. Modelo de saturación del transformador de corriente desarrollado en Simulink.	55
Figura 45. Corriente primaria (azul) en comparación con la corriente secundaria (amarillo), flujo del transformador de corriente en $t = 1.25 / 60s$	56
Figura 46. Curva de magnetización del núcleo TC.....	58
Figura 47. Corriente de entrada (azul) en comparación con la corriente de salida (amarillo), flujo	

del transformador de corriente en $t = 1.25 / 60s$	59
Figura 48. Corriente primaria (rojo) VS Corriente secundaria (azul) con carga de 10 ohmios.	60

RESUMEN

La protección diferencial de transformador (87T) se considera una de las funciones más esenciales y selectivas utilizadas para detectar fallas internas en transformadores de potencia. Sin embargo, el funcionamiento del relé puede estar influenciado por fenómenos transitorios, como la saturación de los transformadores de corriente (TC) durante fallas externas y la corriente de Inrush cuando se energiza el transformador. Estos eventos modifican la forma de onda secundaria de los TC, generando una corriente diferencial aparente que puede provocar operaciones erróneas y afectar la confiabilidad del sistema eléctrico.

En este trabajo se analiza el efecto de la saturación de los CT en el funcionamiento del relé diferencial 87T a través de simulaciones realizadas en un entorno digital (Simulink o Digsilent), siguiendo los criterios establecidos en las normas IEC 61869-2, IEC 61869-1, IEEE C57.13 e IEEE C37.91. El estudio del autor Guzmán considera tres tipos de condiciones que pueden afectar al relé: fallas internas, fallas externas con CT saturado y corrientes de Inrush. Para ello se modelan TC con curvas de magnetización no lineales, un transformador de potencia real, y un relé diferencial con característica de doble pendiente (slope dual) y bloqueo por armónicos, basado en el trabajo propuesto por Guzmán et al. (2004) [7].

Los resultados muestran que los relés diferenciales convencionales presentan alta probabilidad de disparo indebido ante saturación de TC y corrientes de Inrush, mientras que los relés modernos con restricción dual (Slope 1 y Slope 2) y bloqueo por armónico que mantienen una operación selectiva y estable; Además se evidencia que los TC de clase 10P20 y TPY, con punto de rodilla superior, reducen significativamente el error de transformación durante fallas externas.

Finalmente, se valida el comportamiento del sistema mediante pruebas con un relé físico SEL387 conectado a un simulador OMICRON CMC-356, comparando su respuesta frente a

un relé convencional. Los resultados confirman que la correcta selección de TC y el uso de relés diferenciales digitales avanzados son esenciales para garantizar la confiabilidad, estabilidad y seguridad de la protección diferencial del transformador.

ABSTRACT

The protection scheme for differential transformers, known as 87T, is well-regarded for being one of the most responsive and precise methods to identify internal issues in power transformers. Nonetheless, its effectiveness can be significantly affected by transient situations like current transformer saturation during outside faults and magnetizing surge currents while energizing transformers. These effects alter the secondary current from the current transformers, generating a seemingly differential current that can cause incorrect trips of the differential relay and affect the reliability of the system.

This thesis evaluates the impact of TC saturation on the operation of the 87T differential relay through detailed simulations carried out in ATPDraw or DIGSILENT, following international standards including IEC 61869-2, IEC 61869-1, IEEE C57.13, and IEEE C37.91. Three critical scenarios are studied: internal faults, external faults with TC saturation, and magnetizing inrush. The simulation models incorporate nonlinear TC magnetization curves, a realistic power transformer model, and a differential relay equipped with dual-slope restraint characteristics and harmonic blocking, based on the methodology proposed by Guzmán et al. (2004).

The results show that conventional differential relays are highly vulnerable to mis-operations under TC saturation and inrush conditions, whereas modern numerical relays employ dual-slope restraint and second-harmonic blocking maintain stable and selective operation. Additionally, TC with higher accuracy classes such as 10P20 and TPY, characterized by a higher knee point voltage, significantly reduce transformation errors during external fault conditions.

En última instancia, se confirma el funcionamiento del sistema mediante pruebas realizadas con un relé diferencial SEL387 conectado a un dispositivo de prueba OMICRON CMC-356, evaluando sus respuestas en comparación con las de un relé convencional. Los hallazgos

indican que elegir los transformadores de corriente adecuados y utilizar algoritmos avanzados para los relés diferenciales es fundamental para asegurar la fiabilidad, estabilidad y seguridad en la protección de los diferenciales de transformadores.

ACRONIMOS

CIGRE: Consejo Internacional de Grandes Redes Eléctricas.

COES: Centro de Operaciones de Emergencia.

10P20: Limite compuesto máximo con 10% de error, Protección, Limite de precisión (ALF) dura 20 veces por la corriente nominal antes que entre en saturación magnética.

S/E: Subestación Eléctrica.

5P10: Limite compuesto máximo con 5% de error, Protección, Limite de precisión (ALF) dura 10 veces por la corriente nominal antes que entre en saturación magnética.

IED: Dispositivos Eléctricos Inteligentes.

MVA: mega Voltio-amperio.

CMC 356: Equipo universal de prueba de relés de protección de la marca OMICRON.

RMS: Root Mean Square.

(87T): Rele diferencial de Protección a Transformadores.

EMTP: Electromagnetic transients program.

IEC: Comisión Electrotécnica Internacional.

IEEE: Instituto de Ingenieros Eléctricos y Electrónicos.

AT: Alta tensión.

BT: Baja tensión.

CC: Corriente Continua.

VAR: Vol-amperio-reactivo.

kV: Kilovoltio.

pu: Valores Por Unidad.

TC: Transformador de Corriente.

CAPITULO I

1 TITULO

“Evaluación del impacto de la Saturación de Transformadores de corriente en la actuación de Protecciones Diferenciales de Transformador considerando corrientes de Inrush y fallas externas”.

1.1 ANTECEDENTES

La protección diferencial de los transformadores (87T) es comúnmente utilizada gracias a su gran sensibilidad y rapidez para identificar fallas internas. Sin embargo, en momentos transitorios, como durante el encendido y la saturación de transformadores de corriente (TC), pueden generarse corrientes diferenciales elevadas, lo que complica la diferenciación entre fallas internas y externas. [1], [2].

El trabajo es evaluar el desempeño de los relés convencionales frente a las anomalías de los transformadores de potencia y compararlos con los modelos mejorados que ellos están integrados con restricción dual y bloqueo de armónicos.

El relé diferencial compara la corriente de entrada y salida del transformador para detectar fallas internas.

Sin embargo, en los últimos 50 años, se han documentado fallas en la operación de relés diferenciales debido a fenómenos transitorios como:

- Corrientes de Inrush (energización).
- Saturación de transformadores de corriente (TC) durante fallas externas.

Estos fenómenos pueden inducir corrientes diferenciales falsas que provocan una operación indebida del relé, dejando innecesariamente fuera de servicio al sistema eléctrico de energía.

1.2 INTRODUCCIÓN

Los transformadores de potencia constituyen uno de los elementos más críticos dentro de los sistemas eléctricos de energía, ya que permiten la transmisión y distribución eficiente de la energía eléctrica a diferentes niveles tensión.

Debido a su elevado costo, importancia operativa y al impacto que su indisponibilidad genera en la continuidad del servicio, estos equipos requieren esquemas de protección altamente confiables, siendo la protección diferencial del transformador (función 87T) uno de los métodos más utilizados para detección rápida y selectiva de fallas internas.

El principio de funcionamiento de la protección diferencial se basa en la comparación de las corrientes que ingresan y salen del transformador, bajo supuesto de que, en condiciones normales de operación o ante fallas externas, dichas corrientes deben ser prácticamente iguales. Sin embargo, en la práctica este principio se ve afectado por fenómenos transitorios propios del sistema eléctrico, como la saturación de los transformadores de corriente (TC) y la corriente de energización o inrush, los cuales distorsionan la señal secundaria de los TC y pueden generar una corriente diferencial aparente, aun cuando no exista una falla interna real.

La saturación de los TC ocurre principalmente durante fallas externa de alta magnitud o debido a un burden elevado en el circuito secundario, provocando errores significativos en la reproducción de la corriente primaria. Por su parte, la corriente de inrush magnético, que se representa durante la energización del transformador, puede alcanzar valores del orden de 5 a 10 veces de la corriente nominal, y se caracteriza por un alto contenido armónico, especialmente de segundo orden. Ambos fenómenos representan una de las principales causas de operaciones erróneas de la protección diferencial, afectando la confiabilidad y selectividad del sistema de protección. [3], [14]

1.3 PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

La protección diferencial del transformador (87T) puede no operar adecuadamente cuando los transformadores de corriente (TC) conectados entran en saturación o cuando hay corrientes de irrupción durante la operación del transformador. Estos eventos alteran la señal que mide el TC, generando una corriente diferencial aparente que el relé interpreta erróneamente como una falla interna, lo que causa desconexiones incorrectas y afecta la selectividad, la confiabilidad y la continuidad del servicio eléctrico. El reto es que los relés diferenciales tradicionales no siempre son capaces de diferenciar de manera precisa entre fallas genuinas y situaciones pasajeras; por lo tanto, es necesario examinar los efectos de la saturación del TC y la reacción del relé diferencial a través de simulaciones y modelado, aplicando criterios establecidos en normas internacionales como IEEE C37. 91, IEC 61869-2 y ANSIC37. 13. [11], [12].

1.4 JUSTIFICACIÓN

La Protección Diferencial de Transformadores (87T), es una de las estrategias más sensibles y selectivas para detectar fallas internas en transformadores de corriente. Sin embargo, su rendimiento puede verse comprometido por fenómenos transitorios como la corriente de entrada durante la energización y la saturación de los transformadores de corriente (TC) durante fallas externas.

Estos fenómenos producen corrientes diferenciales muy altas que pueden causar mal funcionamiento de los relés, afectando la confiabilidad del sistema eléctrico y la continuidad del servicio.

Dado que la integración de transformadores en las redes de distribución y transmisión es cada vez más fuerte, con requerimientos crecientes en lo que respecta a confiabilidad y estabilidad, el análisis de este problema es muy pertinente; Así, mismo las interrupciones no programadas que surgen a raíz de actividades fraudulentas pueden generar graves riesgos para la infraestructura crítica y pérdidas financieras significativas.

El método propuesto, basado en modelización matemática y simulación digital, permite un análisis detallado del impacto de estos fenómenos en la protección diferencial, este enfoque es necesario porque la realización de pruebas físicas de equipos eléctricos generará altos costos y riesgos operativos. Utilizando software especializado como Digsilent o Simulink- Matlab y aplicando las recomendaciones de estándares internacionales como IEEE C37.91, IEC 61869-2 y ANSI C57.13, se garantiza un análisis técnico riguroso y adaptado a las mejores prácticas de cableado.

La realización de este estudio posibilitará proporcionar sugerencias concretas para la configuración y el dimensionamiento de TC de relés diferenciales, los cuales contribuirán a disminuir la posibilidad de operaciones erróneas y a incrementar la seguridad y confiabilidad de los sistemas Eléctricos.

Esto brindará un marco de referencia valioso para las compañías de Generación, Transmisión y Distribución que afrontan los retos de una infraestructura Eléctrica Moderna y Compleja.

1.5 ALCANCE

El presente proyecto técnico tiene como análisis evaluar el impacto de la saturación de los transformadores de corriente (TCs) en la actuación de la protección diferencial de transformador (87T), considerando condiciones transitorias típicas del sistema eléctrico como fallas internas, fallas externas y corrientes de energización (Inrush magnético).

El estudio se desarrolla mediante modelado matemático y simulación digital en herramienta especializadas como Digsilent y Matlab/Simulink, incorporando modelos no lineales del núcleo del TC basados en su curva de magnetización B-H, así como la lógica de operación del relé diferencial con característica de slope dual y contenido de armónicos, conforme a las normas IEC 61869-2, IEC 61869-2, IEEEc57.13 e IEEEc37.91.

El alcance de la investigación se limita a:

- Transformador de corriente de protección de clases 5P10 Y 10P20 (y referencia a TPY).
- Relés diferenciales numéricos, con énfasis en el SEL387.
- Análisis en estado transitorio y cuasi-transitorio, sin considerar estudios técnicos de largo plazo del transformador.
- Evaluación del desempeño del esquema de protección desde el punto de vista funcional y de confiabilidad, sin concluir análisis económicos detallados de costos de equipos.

Los resultados obtenidos permiten establecer criterios técnicos de selección de TCs y ajustes del relé diferencial, pero no reemplazan los estudios de coordinación y protección requeridos para proyectos específicos de sistemas eléctricos reales.

1.6 BENEFICIARIOS

Los beneficiarios del proyecto técnico establecido se dividen en tres importantes Grupos:

- Estudiantes y docentes de ingeniería eléctrica, especialmente en las áreas de sistema de potencia y protecciones eléctricas, quienes podrán utilizar esta investigación como material de referencia académica y práctica.
- Ingenieros de protección y control, que diseñan, ajustan y mantienen esquemas de protección diferencial de transformadores, al contar con una metodología clara para analizar la saturación de TCs y evitar disparos indebidos.
- Empresas Eléctricas de Generación, transmisión y distribución, al disponer de criterios técnicos que contribuyen a mejorar la confiabilidad que sea realmente fiable, seguro y altamente flexible con el fin de proteger la integridad de los equipos eléctricos que están dentro del área de protección.

1.7 OBJETIVOS

1.7.1 OBJETIVO GENERAL

Evaluar el impacto que tiene la saturación de los transformadores de corriente (TC) sobre la actuación de protecciones diferenciales de transformador, con énfasis en su respuesta frente a corrientes de Inrush y fallas externas mediante la simulación de corriente electromagnéticas transitorias.

1.7.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- Analizar el fenómeno de saturación de los TC durante condiciones transitorias como Inrush magnético y corrientes de falla externas con la función de configurar el relé mejorado que sea capaz de restringir y bloquear el incremento de la corriente diferencial.
- Simular en un entorno de prueba tanto (Digsilent o simulink) las respuestas del sistema diferencial 87T ante: fallas internas, fallas externas, corrientes de Inrush conociendo el comportamiento de operación.
- Experimentar el efecto de las clases de precisión de TC 5P10 en la discriminación de las protecciones, obteniendo el comportamiento del punto de rodilla.
- Revisar la protección diferencial 87T en un relé SEL-387, usando el equipo Ómicron CMC 356 para evaluar la respuesta de los relés diferenciales convencionales versus los relés modernos que tiene bloqueo de armónico y restricción dual.

CAPITULO II

2.1. FUNDAMENTO TEÓRICO

2.1.1. INTRODUCCIÓN A RELE DIFERENCIAL (87)

El dispositivo de diferencia mide la corriente en ambas terminales del transformador, lo que implica que es un mecanismo que actúa con agilidad para detectar fallos internos.

Estas protecciones modernas como (SEL, ABB, SIEMENS) usan bloqueo de armónicos y restricción dual.

El relé diferencial no mide la corriente Inrush, debido que no es una curva característica fija del relé. De esta manera se representa relé diferencial como esta en la figura 1, es un semiplano de coordenadas que está compuesto de la siguiente forma:

Datos

Eje x: Corriente de restricción

Eje Y: Corriente diferencial

Area operativa: si corriente diferencial está por encima de la curva ordena disparo al interruptor.

En [7], se analizó el desempeño de relés diferenciales tradicionales frente a eventos de Inrush y TC saturado. Se observó que relés con bloqueo armónico y curvas de restricción múltiple (slope 1 y slope 2) reducen significativamente las falsas operaciones.

En [10], se reportó un caso de un disparo erróneo de un transformador de 110/13.8 kV debido a la saturación de un TC clase 5P10, que no cumplía con los requisitos mínimos de desempeño definidos por ANSI C57.13 [5].

2.1.2. REPRESENTACIÓN MATEMÁTICA Y COMPORTAMIENTO DEL RELÉ DIFERENCIAL

COMPORTAMIENTO DE LA PROTECCIÓN DIFERENCIAL

Podemos observar el comportamiento característico del relé diferencial (87T) y visualizando las zonas de disparos y restricción de armónicos.

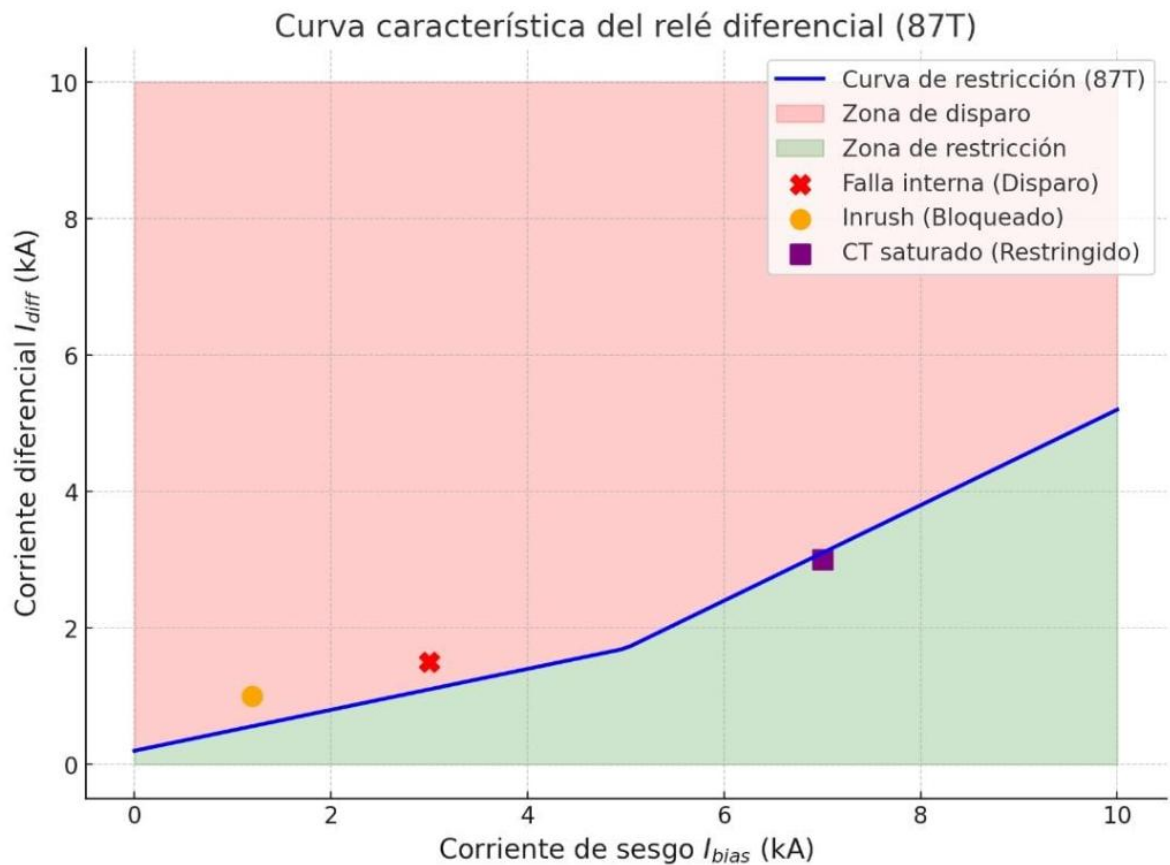


Figura 1. Comportamiento del relé diferencial en Excel

Fuente: Curva característica 87 Norma IEEE C37.91-2022

ANÁLISIS DEL COMPORTAMIENTO DEL SISTEMA

Ejes del semiplano que representa el sistema.

X: Corriente promedio medida en los TC.

Y: Corriente diferencial (diferencia entre primario y secundario).

AREA VERDE:

- Zona de restricción: el relé NO dispara si está debajo de la curva.
- Tolera errores de TC, magnetización e Inrush.

AREA ROJA:

- Zona de operación: el relé DISPARA si el punto está encima de la curva.

PUNTOS MARCADOS:

Nos muestran los disparos que realiza el relé diferencial mediante saturación magnética del Tc y durante una energización del transformador.

- Inrush (naranja): alto pero bloqueado por contenido de segundo armónico.
- CT saturado (morado): error de medición durante falla externa, pero el relé no opera gracias a la restricción.
- Falla interna (rojo): legítimo y el relé opera correctamente.

ECUACION MATEMÁTICA DEL COMPORTAMIENTO DEL RÉLE

Con la siguiente Ecuación matemática podemos representar el comportamiento característico del relé de protección diferencia. [15].

Ecuación 1. Identificación de Operación del relé Diferencial.

$$I_{\text{diferencial}} \geq \text{slope} * I_{\text{restriccion}} + \text{Pickup}.$$

Datos

$I_{\text{dif}} = I_1 - I_2 = 0$ para estar en buen estado.

I_{restr} : Corriente de restricción promedio:

$$I_{\text{restr}} = (I_{\text{Ip}} + I_{\text{Is}}) / 2$$

La corriente diferencial debe ser mayor a la I_{pickup} , típicamente la I_{pickup} es de 0.2kV.

El propósito es reducir falsas operaciones que son causados por estas fallas potenciales que se detallan a continuación:

- Corriente Inrush durante la energización.

- Saturación del TC durante fallas externas.
- Errores de medición en condiciones de alta corriente.

2.1.2.1. IMPACTO QUE TIENEN LOS TRANSFORMADORES DE CORRIENTE SI ENTRA EN ESTADO DE SATURACIÓN MAGNÉTICA.

2.1.2.2. TRANSFORMADOR DE CORRIENTE (TC)

El transformador de corriente mide la corriente primaria y la corriente secundaria para llevarlos a niveles que el relé pueda procesar.

Si el TC entra en saturación magnética:

- Deja de representar adecuadamente la corriente primaria.
- La forma de onda del secundario se distorsiona (apantallando o cortada).
- El relé percibe un falso desequilibrio de corriente y hará que actúe erróneamente.

2.1.2.3. CIRCUITO EQUIVALENTE

La entrada de un transformador de corriente se une en serie con el sistema que se quiere regular, mientras que la salida se conecta a los circuitos de corriente de uno o más dispositivos de medición o de seguridad.

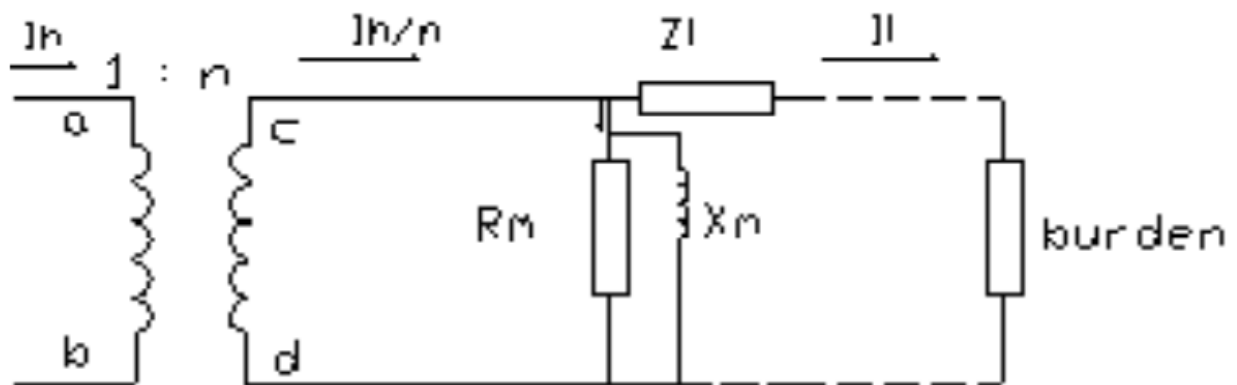


Figura 2. Circuito equivalente de un transformador de corriente.

Fuente: (Ramírez Castaño, 2003).

Se puede inferir del circuito equivalente que:

- El núcleo tiene que ser de alta calidad para operar con bajos niveles de saturación y mínimas pérdidas.
- No se puede operar con una carga superior a la nominal (reduciendo la corriente de carga y aumentando la de excitación).
- No se puede funcionar a circuito abierto, ya que podría provocar sobresaturación, elevadas pérdidas, incremento de temperatura en el hierro y voltajes elevados en los terminales del secundario.

2.1.2.4. CARACTERÍSTICAS PRINCIPALES DE LOS TC

Las características principales de los Transformadores de Corriente son:

- Dentro de un rango considerable de fluctuación de la carga secundaria, no se observan alteraciones significativas en la corriente secundaria.
- No se debe desconectar el circuito secundario de un transformador de corriente cuando el primario está energizado, ya que los voltajes generados dependerían únicamente de la impedancia de la sección de magnetización y podrían ser excesivos.
- Los errores relacionados con la relación y el ángulo de fase se pueden determinar con sencillez si se dispone de la característica de magnetización y la impedancia de la carga.

2.1.2.5. DIAGRAMA VECTORIAL Y CIRCUITO EQUIVALENTE

Tenemos la representación del núcleo del transformador de Corriente con su debido burden.

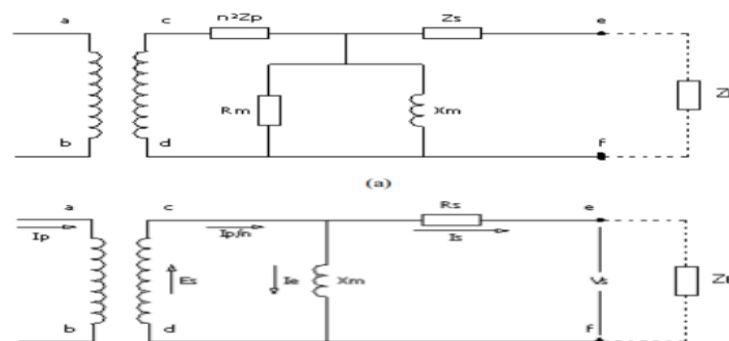


Figura 3. El circuito equivalente del TC.

Fuente: (Ramírez Castaño, 2003).

2.1.2.6. COMPORTAMIENTO DEL NÚCLEO DEL TC

El núcleo es de hierro y se comporta como una curva de magnetización no lineal (similar a la curva B-H del núcleo), y en operación normal la curva se comporta linealmente.

Cuando V_{ct} del secundario del transformador de corriente se excede del punto de rodilla causa lo siguiente:

- Saturación magnética.
- Gran parte del flujo magnético, no se transforma en corriente secundaria.

2.1.2.7. CLASE DE PRECISIÓN Y FACTOR DE SOBRECORRIENTE.

Los TC de clase 5P10 se lo selecciona con el objetivo, de reducir los errores del núcleo de la curva de operación lineal según la clase.

5: Error compuesto máximo al 5% al valor límite de precisión.

P: Protección.

10: Factor límite precisión ALF 10 x I_n , es decir el TC dura 10 veces de la corriente nominal para darle una tolerancia a la curva lineal de operación del núcleo (límite máximo antes que se sature el núcleo).

Todo dependerá de las bobinas que tenga en el lado secundario del TC si cuenta con dos núcleos eso significa que uno de ellos es de medición y el otro de protección; En el caso que haya dos o más núcleos se llamaría núcleo de protección especial es decir se colocaría un equipo de protección que tenga una alta sensibilidad.

COMPORTAMIENTO DEL TRANSFORMADOR DE CORRIENTE CUANDO ENTRA EN SATURACION MAGNETICA.

Muestra claramente la distorsión que ocurre en la corriente secundaria al superar el punto de saturación del núcleo.

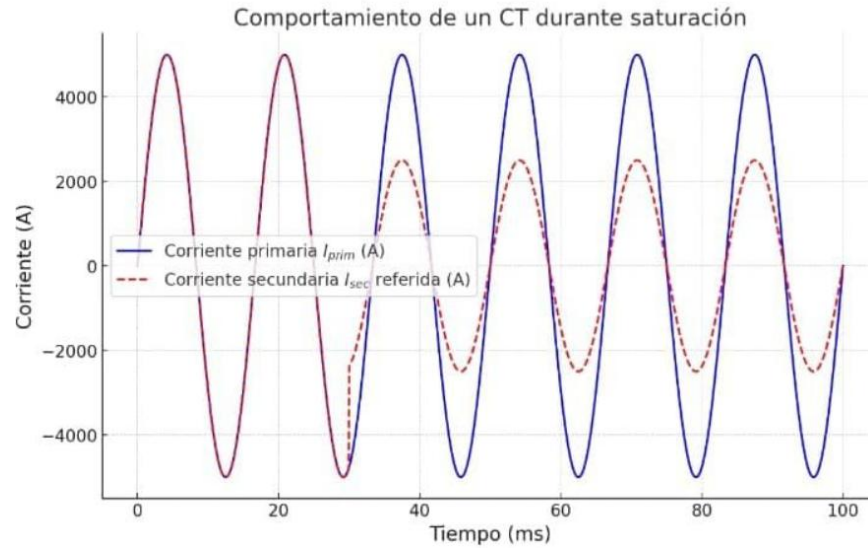


Figura 4. Comportamiento de un TC durante saturación

Fuente: Basada en IEC 61869-2 y IEEE C37.110-2007 [4]

OSCILACIONES DE CORRIENTE PRIMARIA Y SECUNDARIA MEDIDAS POR EL TC VS TIEMPO.

Tenemos las oscilaciones de la corriente primaria y cuando la secundario ya no sigue fielmente a la corriente primaria en un intervalo de tiempo.

- Respuesta Azul = corriente primaria real.
- Respuesta Roja = corriente secundaria del TC.

ANÁLISIS DEL COMPORTAMIENTO DEL SISTEMA

Nos muestra en que la gran parte del flujo magnético de la primaria no se está convirtiendo en corriente secundaria.

- Antes de la saturación (0 a 30 ms): la secundaria sigue fielmente a la primaria, a escala.
- A partir de ~30 ms: la secundaria se aplana y deja de representar adecuadamente la primaria.

Este comportamiento que visualizamos en la figura 4 representa cómo el TC está entrando en zona no lineal de su curva B-H, con esta ecuación podemos representar cuando entra en saturación magnética el núcleo del Transformador de Corriente.

Ecuación 2. Evaluación de Voltaje del TC cuando entra en saturación.

$$V_{ct} = I_{fault} * R_{burden}$$

Nota: Si Voltaje del TC es mayor igual V_{knee} entra en saturación magnética.

2.1.2.8. USO DEL CMC 356 PARA LA EVALUACIÓN DEL COMPORTAMIENTO DEL SISTEMA.

En la figura 5 nos muestra las partes y funciones que ofrece la maleta CMC 356 para hacer prueba de cada generación y tipos de relé de protección.

PARTES IMPORTANTES DEL EQUIPO CMC 356

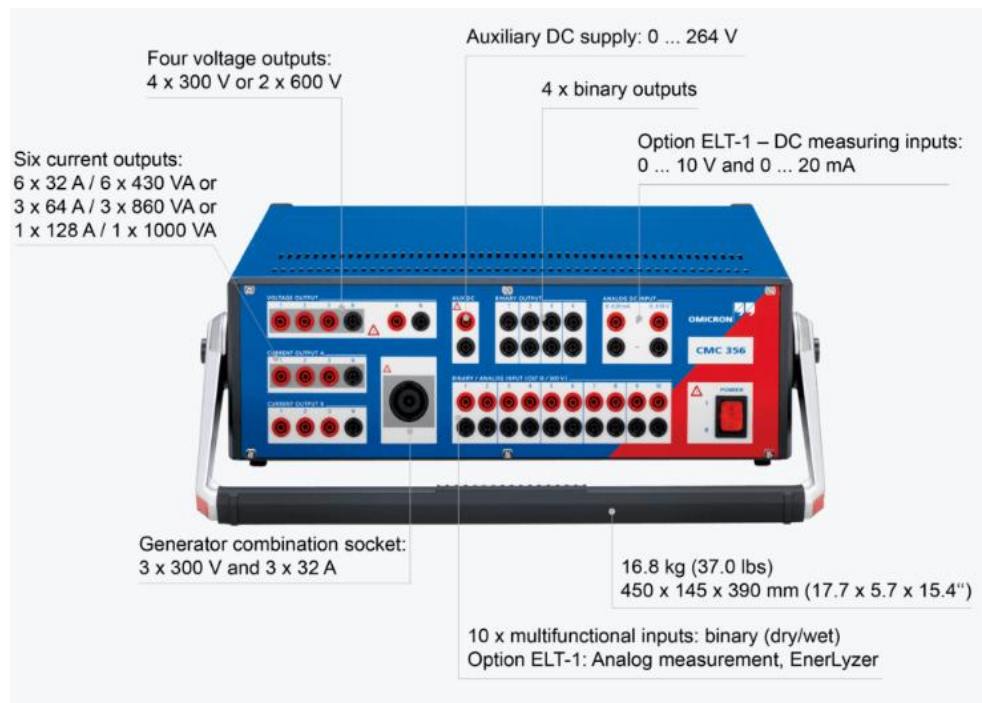


Figura 5. Partes que conforma el Ómicron CMC 356.

Fuente: Basada en IEC 61869-2 y IEEE C37.110-2007 [4]

Función del Equipo

- Potentes fuentes de corriente para pruebas, incluso de relés electromecánicos de alta carga. [14]
- Altas amplitudes de corriente para prueba de relés de 5 A.
- Alta exactitud y versatilidad para pruebas de relés estáticos y numéricos de todo tipo.
- Red integrada para prueba de dispositivos IED de tipo IEC 61850.
- Funciones de medición analógica de 10 canales y registro de transitorios (opción).

2.1.2.9. IMPORTANCIA DE LA EVALUACIÓN DEL COMPORTAMIENTO DE LA CURVA DEL RELÉ 87T

Con el equipo CMC 356 nos permitirá analizar y visualizar el comportamiento característico del relé diferencial comparando la corriente en el LH y LV para que nos confirme si es capaz de detectar fallas internas dependiendo del tipo de dispositivo que este dentro de esa área de protección, nos permitirá ajustar el slope dual o pendiente doble y el contenido de armónico para que el relé diferencial no haga disparos erróneos mediante la saturación magnética del TC y la energización conocido como Inrush magnético mientras que los relé convencionales no tiene contenido de armónico ni slope dual operando falsamente por estas inminentes choques eléctricos, por lo tanto, el relé modernos nos demuestra que dispara correctamente demostrando sensibilidad ante las condiciones típicas que pueden afectar el relé diferencial (87T) y todo este Estudio de coordinación de protecciones nos ayudará tener un sistema eléctrico de transporte de energía eléctrica mucho más seguro, fiable y altamente flexible que puede denominarse como un sistema de configuración en malla o anillo con la finalidad de darle prevención a la integridad de los equipos eléctricos como los transformadores, líneas y barras.

2.1.3. 3 CONDICIONES TÍPICAS QUE PERJUDICA AL RELÉ (87T).

Fallas internas

- Fallas entre fase – fase y fase - tierra dentro del transformador.
- Corriente diferencial muy alta, por lo tanto, el relé debe operar.

Resultado: el relé actúa correctamente, demostrando que tiene sensibilidad.

Fallas externas

- Cortocircuito fuera del área protegida.
- Simulación del Tc de clase 5P10 con un punto de rodilla bajo.
- Al saturarse Tc, el secundario se va distorsionando y ya no sigue fielmente al primario en un Intervalo de tiempo y se genera una corriente diferencial falsa.

Resultado:

- El relé tradicional sin restricción de armónico opera falsamente.
- El relé mejorado con slope dual (20 – 70%) no opera manteniendo sensibilidad.

Energización (Inrush magnético)

- Conexión del transformador en vacío a la red.
- Corriente Inrush de 8- 12 * Inominal con 20-40% del 2 armónico.

Resultado

- El relé convencional dispara por error.
- El relé mejorado con bloqueo de armónico (mayor al 15% de H2) no actúa.

Una lógica de bloqueo en el contenido de armónicos sería lo siguiente:

$I_{2f} / I_{1f} \geq 15\%$ ----- Bloqueo por Inrush.

CORRIENTE DE ENERGIZACIÓN (INRUSH MAGNÉTICO).

La corriente Inrush son fenómenos transitorios que aparecen cuando energizamos el transformador de potencia, solo fluye en el lado primario del transformador y el secundario queda abierto o sin carga; Esto ocurre cuando energizamos el transformador de potencia que puede darse por los siguientes motivos:

- Cuando el flujo magnético supera la densidad de flujo de saturación

- La corriente primaria absorbe cantidad de energía para llevarlo a operación normal.

2.1.4. MAGNITUD DE LA CORRIENTE INRUSH

Su magnitud debe ser 5 a 10 veces de la corriente nominal y puede Durar cientos de milisegundos dependiendo del tamaño del transformador o de la carga aplicada. [3]

2.1.5. COMPORTAMIENTO DE LA CURVA INRUSH.

Según en la figura 6. Podemos visualizar el comportamiento del Inrush que tiene característica asimétrica (se ve como una curva cortada), por lo tanto, el voltaje se produce en un solo semiciclo. Para la solución de este problema de energización podemos proporcionar contenido de armónico muy alto para así mitigar falsas operaciones que mide el relé y esto lo podemos lograr, ajustando con los siguientes conjuntos de orden de armónicos que son:

- Contenido de armónico 2do (20- 40%) y también con contenido armónico de 3 y 5.

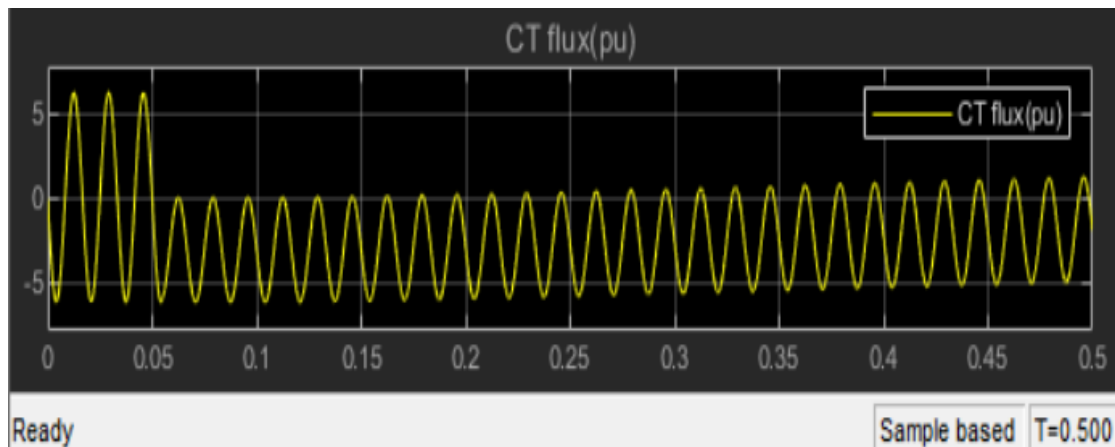


Figura 6. Comportamiento del Inrush mediante la Energización.

Fuente: MathWorks MATLAB-Simulink.

2.1.6. COMPORTAMIENTO MATEMATICO DE LA CURVA INRUSH

La corriente de Inrush se puede representar de la siguiente ecuación matemática:

Ecuación 3. Cálculo de Corriente Inrush

$$\text{Inrush} = I_{\text{peak}} * e^{-t/T}$$

Datos:

I_{peak} : 5 a 10 veces la corriente nominal.

T: constante de tiempo de magnetización.

El relé diferencial debe bloquear la operación si el contenido de 2do armónico es significativo:

Ecuación 4. Bloqueo por 2do armónico mediante un Inrush.

$$I_{\text{sf}} / I_{\text{pf}} \text{ es mayor } 15\%$$

Datos:

I_{sf} : Corriente en el lado secundario fase.

I_{pf} : Corriente en la primario fase.

- El comportamiento de los TC bajo saturación es determinante para la estabilidad de la protección diferencial.
- La adición de restricción múltiple (slope dual) y bloqueo de armónicos aumenta notablemente la inmunidad del relé antes fenómenos transitorios.
- Se recomienda que los TC de protección sean de clase mínima 10P20 o TPY, según la norma IEC 61869-2, para evitar errores de saturación.

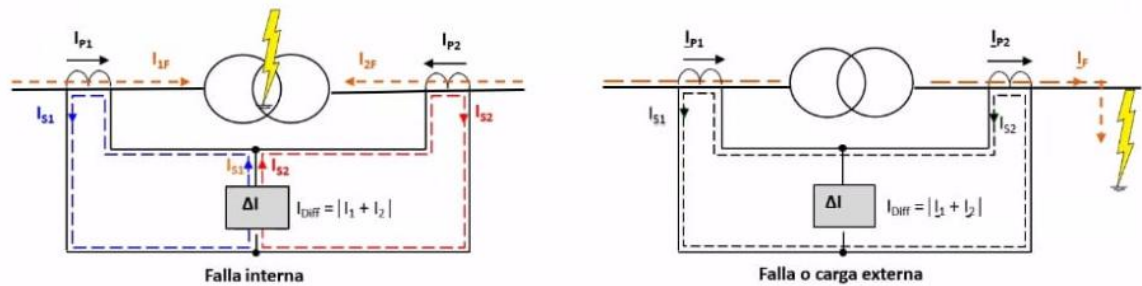
CAPITULO III

3. DESCRIPCIÓN DEL CASO DE ESTUDIO

3.1. DIAGRAMA UNIFILAR DE LAS PROTECCIONES DIFERENCIALES DEL TRANSFORMADOR Y ECUACIONES DURANTE UNA FALLA INTERNA Y EXTERNA.

En la figura 6 representamos 2 sistemas eléctricos incorporando protecciones diferenciales con el fin de proporcionar una zona de protección al transformador ante estas anomalías que puede comprometer la integridad del transformador y cortocircuito simétrico fuera del área de protección.

Protección Diferencial de Transformadores de Potencia



Supuesto: TC - relación:

1/1

$$I_{P1} = I_{1F}$$

$$I_{P2} = I_{2F}$$

$$I_{Diff} = |I_{P1} + I_{P2}| = |I_{1F} + I_{2F}|$$

→ **DISPARA**

Supuesto: TC - relación: 1/1

$$I_{P1} = I_F$$

$$I_{P2} = -I_F$$

$$I_{Diff} = |I_{P1} + I_{P2}| = |I_F - I_F| = 0$$

→ **NO DISPARA**

Figura 7. Modelo de un sistema eléctrico durante una falla interna y externa.

Fuente: Elaboración Propia en AutoCAD.

3.2. DATOS DE LOS COMPONENTES

Transformador de Potencia con una energía de 25 MVA, transforma a nivel de 138 a 20 KV, una impedancia de cortocircuito de $Z_{cc} = 7.8\%$

Transformador de corriente de 2 devanados en el lado secundario uno de medición y el otro de protección con alta sensibilidad y según el autor Guzmán (2004) y sus ayudantes analizaron con la clase de precisión de 5P10 0 10P20 mejor tolerancia. [7]

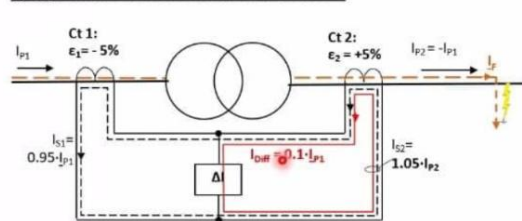
Relé diferencial norma ANSI 87 T modernos como SEL ya tienen integrados el bloqueo de armónicos y restricción dual (slope1, slope2).

3.3. CALCULO DE CORRIENTE DIFERENCIAL DURANTE UNA FALLA EXTERNA ASUMIENDO LA CLASE DE PRECISION Y FACTOR DE SOBRECORRIENTE 5P10.

Ahora esta está evaluando el desempeño del relé diferencial considerando la clase de precisión 5P10, para su sensibilidad si opera ante fallas externa.

Protección Diferencial de Transformadores de Potencia

Ejemplo: falla externa con errores TC lineales



▪ **Asumiendo : TC- proporción: 1/1**

$$I_{Dif} = |I_{s1} + I_{s2}| = |(1+\epsilon_1) \cdot I_{p1} + (1+\epsilon_2) \cdot I_{p2}| = |0.95 \cdot I_{p1} - 1.05 \cdot I_{p1}| = 0.1 \cdot I_{p1}$$

▪ **Operación normal:** $I_{p1} = I_N$

$$I_{Dif} = 0.1 \cdot I_{p1} = 0.1 \cdot I_N$$

▪ **Falla externa:** Asumiendo: $I_{p1} = 10 \cdot I_N$

$$I_{Dif} = 0.1 \cdot I_{p1} = 1 \cdot I_N$$

Como el ajuste I_{Dif} para aplicaciones habituales se sitúa por debajo de la corriente nominal, se produciría un disparo incorrecto en caso de fallas externas con mucha corriente.

Figura 8. Modelo Matemático de la Falla externa considerando la Clase de protección.

Fuente: Elaboración Propia en AutoCAD.

3.4. COMPORTAMIENTO DEL REL DIFERENCIAL 87T CON LA MARCA DEL FABRICANTE SEL-387

En la figura 8. Nos muestra claramente el comportamiento del relé diferencial según la marca del fabricante y cada uno de marcas no determinara su respectivo $I_{pick\ up}$, slope dual y contenido de armónico recomendado para cada masa metálica que se desea dar prevención a la integridad del sistema, en mi caso use la marca SEL5-387. Todo este estudio de coordinación de protecciones de la norma IEC 61850 nos permitirá que todo el sistema eléctrico sea altamente confiable, seguro y altamente flexible para evitar que los consumidores o comerciales sufren frecuentemente la interrupción de la continuidad del servicio para solucionar estas posibles perturbaciones que recibe el suministro energético es de realizar un sistema en malla o anillo.

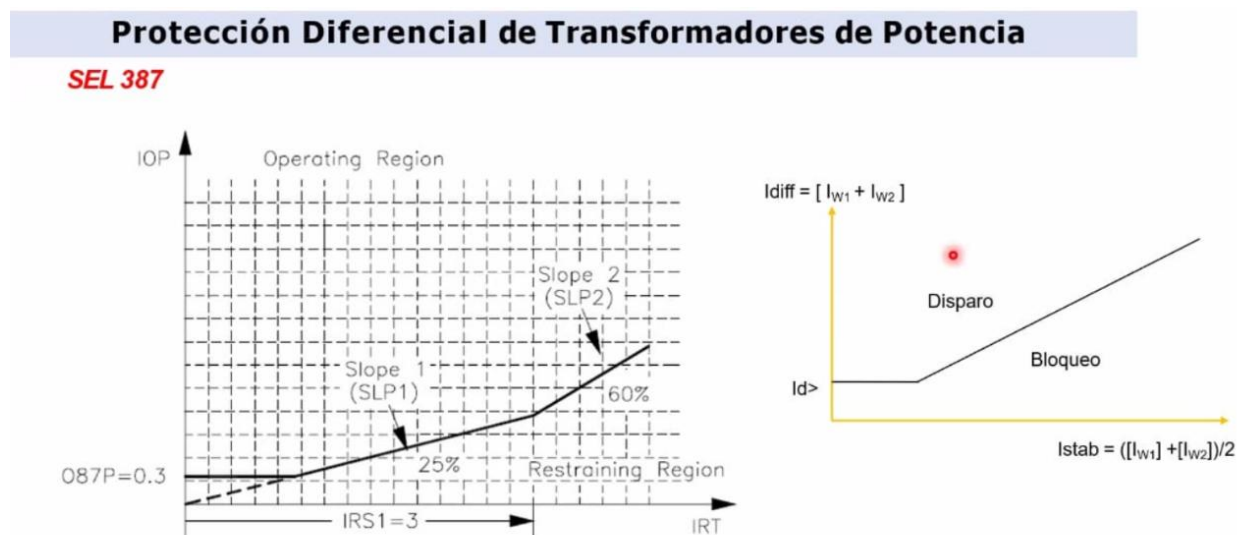


Figura 9. Comportamiento Característico del relé diferencial según la marca del Fabricante (SEL-387)

Fuente: Elaboración Propia en AutoCAD

CAPITULO IV

4. PROCEDIMIENTO DE LA PRUEBA DEL RELE (87T) CON EL PROGRAMA OMICRON TEST UNIVERSE

En la figura 9. Se realiza la prueba con el relé diferencial SEL-387, iniciando un nuevo documento para registrar e identificar el tipo de protección que vaya a realizar en el programa test universe 5.00.

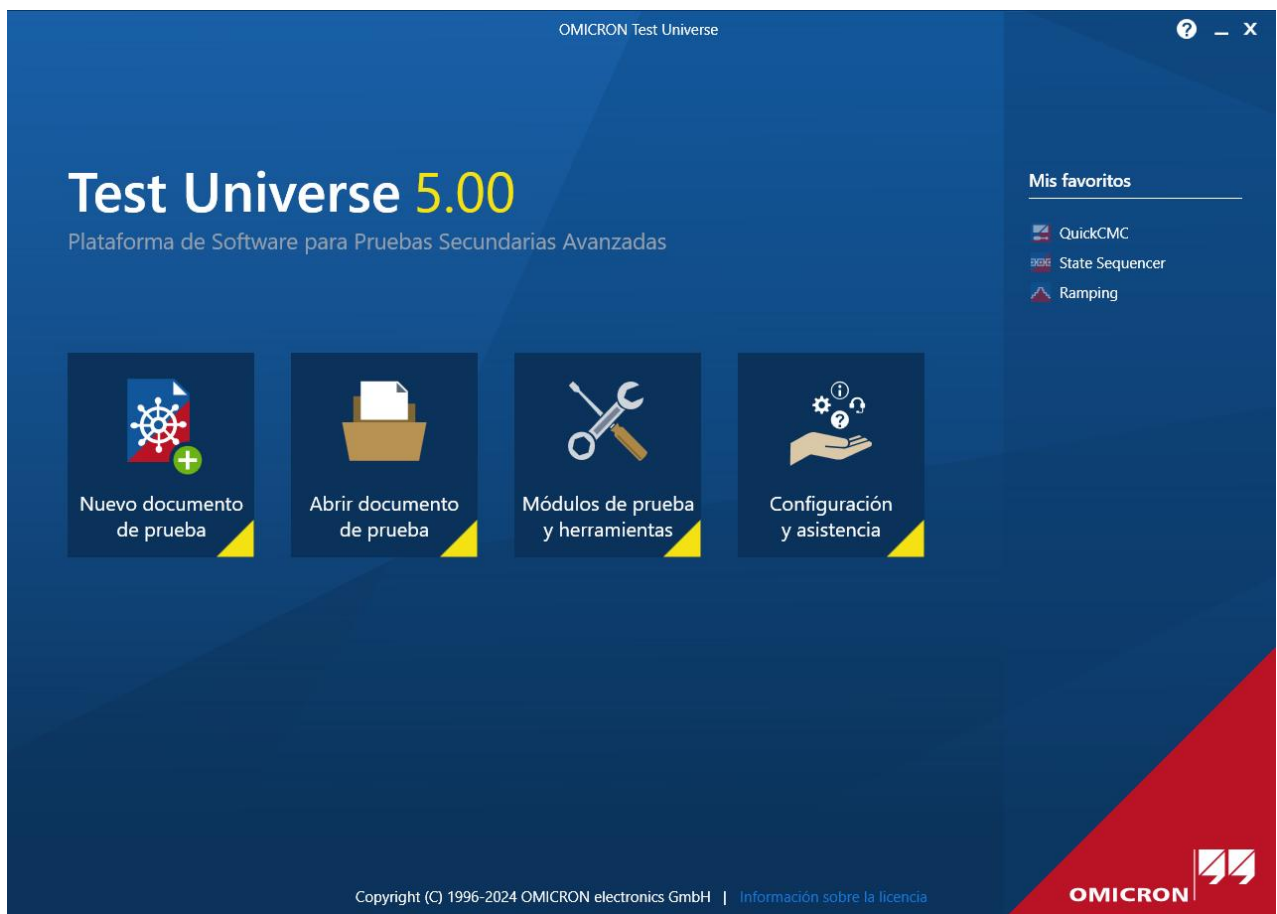


Figura 10. Programa Test Universe versión 5.00

Fuente: Captura de Pantalla.

INTERFAZ DE CONFIGURACION DEL OBJETO DE PRUEBA Y HADWARE.

Se debe configurar el equipo y el programa para que dispositivo de prueba de protección desea comprobar por último ajuste del hardware del sistema nos ayudara a tener un control eficaz al momento de realizar las conexiones adecuadas y verificación del comportamiento del dispositivo de protección.

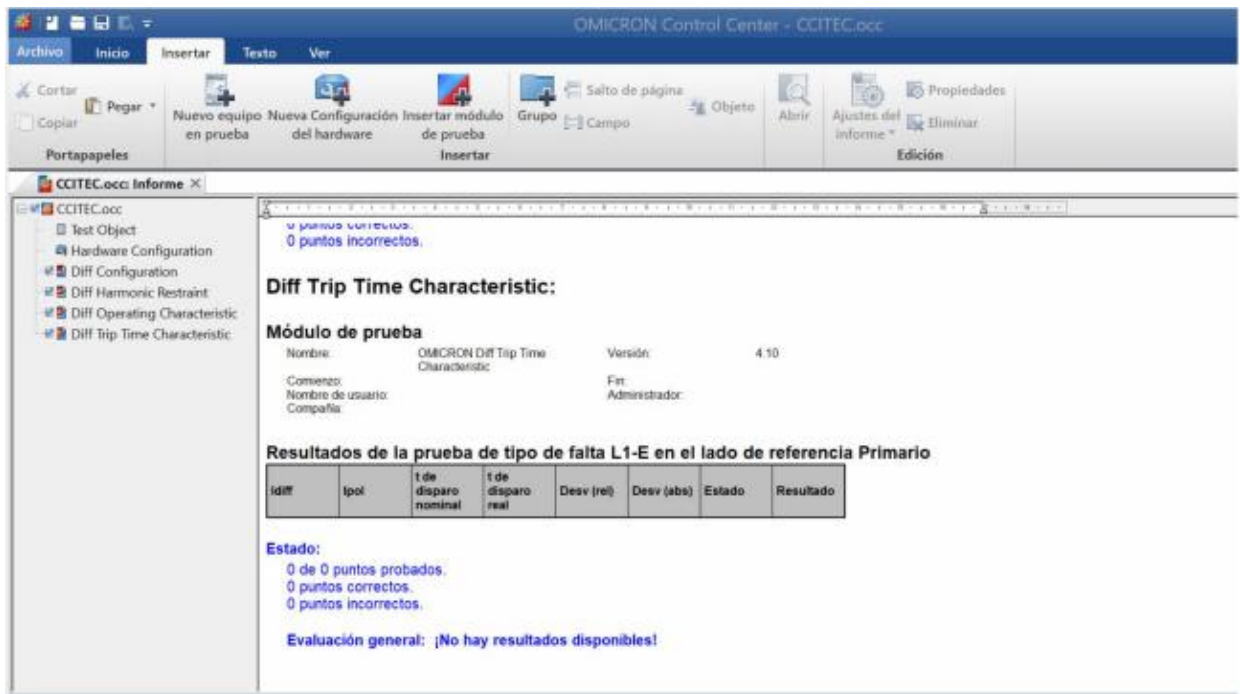


Figura 11. Software del programa

Fuente: Prueba Test Universe 5.00.

En la figura 10. Se realizó la evaluación e identificación del dispositivo de protección diferencial, colocando el tipo de fabricante que desea analizar, podemos observar son los siguientes:

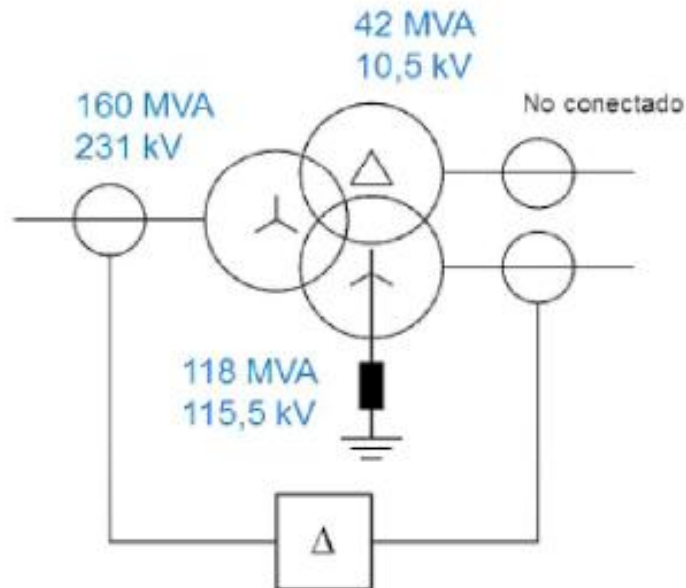
Paso 1: Se ingresa los datos básicos para identificar el tipo de relé de protección que queremos analizar.

Ajustes del dispositivo	
Dispositivo	
Nombre/descripción:	Protección Diferencial
Fabricante:	SIEMENS
Tipo de dispositivo:	7UT613
Dirección del dispositivo:	
Número de serie/modelo:	
Información adicional 1:	
Información adicional 2:	
Subestación	
Nombre:	
Dirección:	
Bahía	
Nombre:	
Dirección:	

Figura 12. Configuración del sistema en test Universe.

Fuente: Prueba Test Universe 5.00.

Paso 2: Ingresamos los datos del Transformador trifásico de nuestro Sistema eléctrico y con su respectivo relé diferencial indicándole que esta es nuestra área de protección.



Parámetros de la protección diferencial

Equipo protegido: TC Disp. de protección Definición de la característica Armónicos

Equipo protegido: Transformador Grupo vectorial: YY0D5 Nº de devanados: 2 3

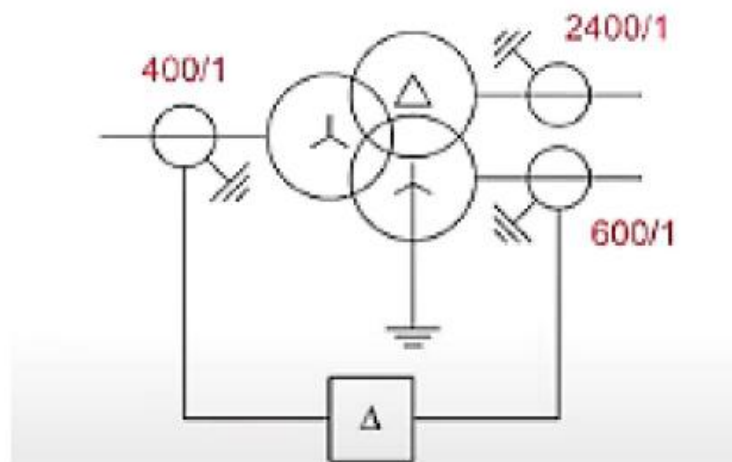
Valores nominales

	Primario	Secundario	Terciario
Dev./Nombre:	Primario	Secundario	Terciario
Tensión:	231.00 kV	115.00 kV	10.50 kV
Potencia:	160.00 MVA	1.18 GVA	42.00 MVA
Grupo vectorial:	Y	Y0 (Y0°)	D5 (D150°)
Pto. de estrella a tierra:	No	Si	No
Corriente:	399.90 A	5.92 kA	2.31 kA
TC de conexión en triángulo:	No	No	No

Figura 13. Registro de datos de los Componentes.

Fuente: Prueba Test Universe 5.00.

Paso 3: Ingresamos la relación de transformación de los transformadores de corriente para que traduzcan la corriente que proviene del transformador de potencia a niveles que el relé diferencial puede gestionar, teniendo en cuenta la carga del relé para evitar la saturación magnética del Transformador de Corriente.



Parámetros de la protección diferencial

Equipo protegido: TC Disp. de protección Definición de la característica Armónicos

TC: valores nominales

	Primario	Secundario	Terciario
Corriente primaria:	400.00 A	600.00 A	2.40 kA
Corriente en sec.:	1.00 A	1.00 A	1.00 A
Pto. de estrella a tierra:	Hacia equipo prot. ▾	Hacia equipo prot. ▾	Hacia equipo prot. ▾

Utilizar entradas de medida de corriente de tierra (TC)

TC tierra: Valores nominales

	Primario	Secundario	Terciario
Corriente primaria:	200.00 A	800.00 A	800.00 A
Corriente en sec.:	1.00 A	1.00 A	1.00 A
Pto. de estrella a tierra:	Hacia equipo prot. ▾	Hacia equipo prot. ▾	Hacia equipo prot. ▾

Aceptar Cancelar Ayuda

Figura 14. Registro de datos de los TC

Fuente: Prueba Test Universe 5.00.

Paso 4: Modificamos los parámetros de la protección diferencial, estableciendo las polaridades desde las que circula la corriente eléctrica desde la línea hacia el transformador de corriente y desde allí hasta el relé diferencial, lo cual nos ayuda a identificar una falla interna.

-Seleccionamos el valor de polarización que depende de cada relé.

-Tiempo máximo para proteger al relé.
-Tiempo de retardo, es el tiempo que transcurre entre 2 puntos de prueba, con el objetivo de reiniciar a la para la siguiente prueba.

-Ajuste de la curva característica del relé

-Tolerancias a considerar para la prueba

-Referencia por punto de conexión o medida

-Sustracción en ambos devanados para que se comparen las corrientes.

-Tiempo por tipo de relé

Figura 15. Ajuste en el relé diferencial.

Fuente: Prueba Test Universe 5.00.

Paso 5: Configuración de la Curva Característica del relé diferencial, realizando ajustes en la pendiente dual.

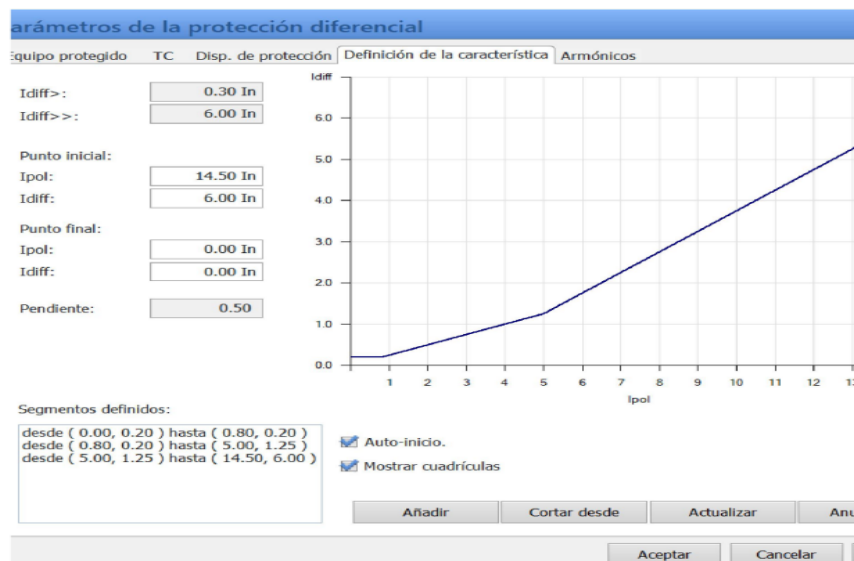


Figura 16. Registro de datos de los Componentes.

Fuente: Prueba Test Universe 5.00.

Paso 6: Introducimos el parámetro armónico relacionado con la activación del transformador.

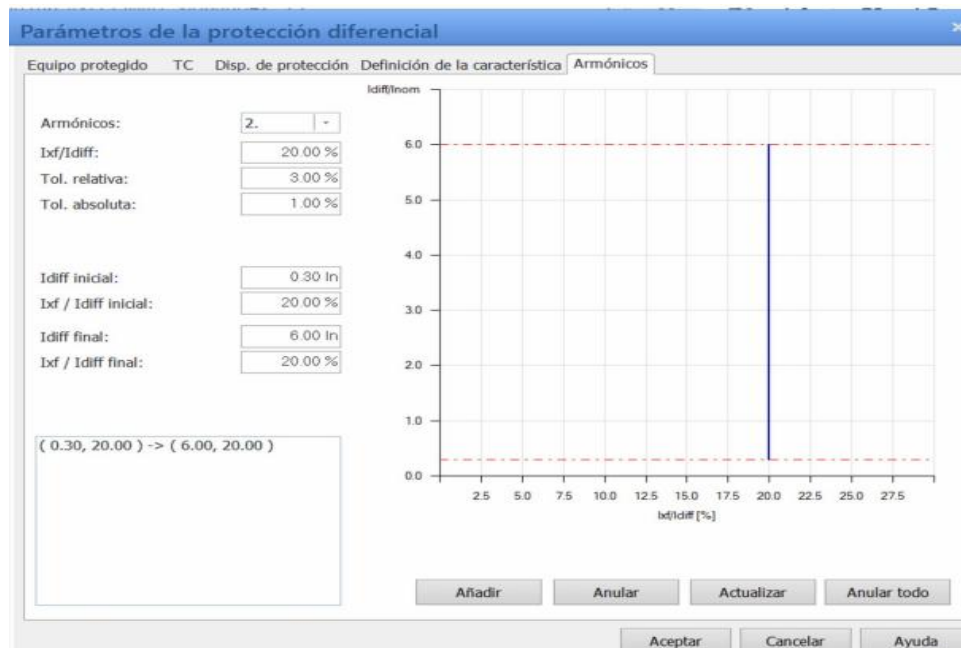


Figura 17. Ajuste del Contenido Armónico.

Fuente: Prueba Test Universe 5.00.

Paso 7: Registramos el armónico asociado a la sobreexcitación.

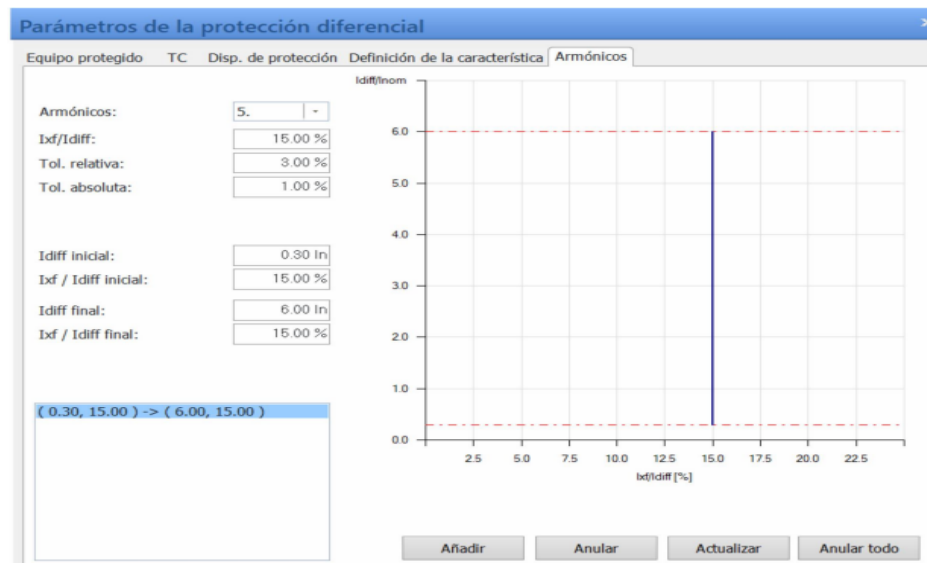


Figura 18. Armónico de Sobreexcitación.

Fuente: Prueba Test Universe 5.00.

Paso 8: Verificamos el cableado utilizando el módulo Diff Configurador.

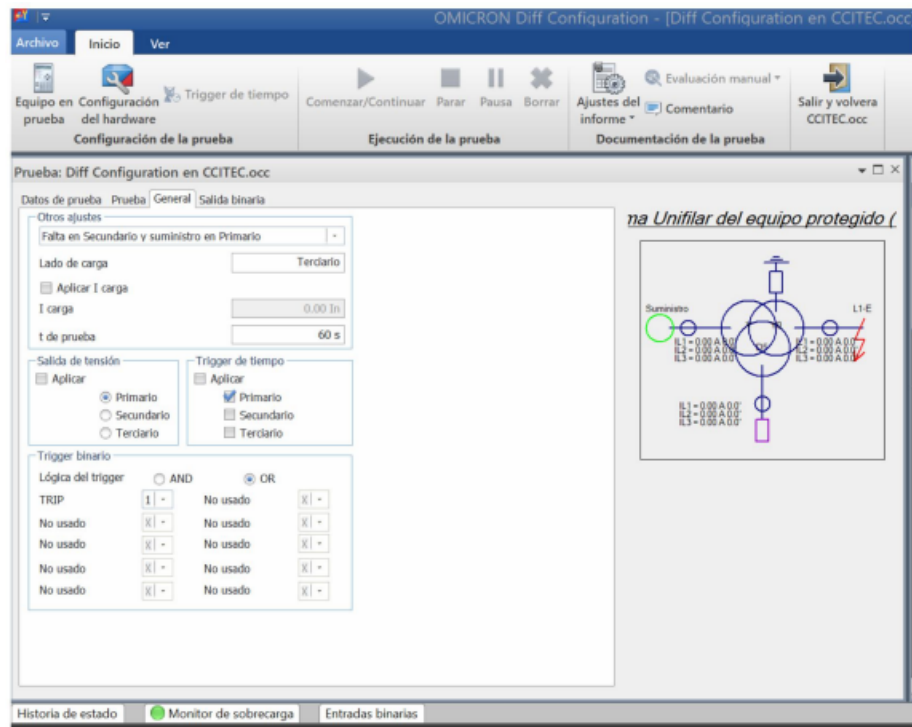


Figura 19. Comprobación del cableado mediante inducción de falla externa.

Fuente: Prueba Test Universe 5.00.

Paso 9: Representación fasorial de una falla externa.

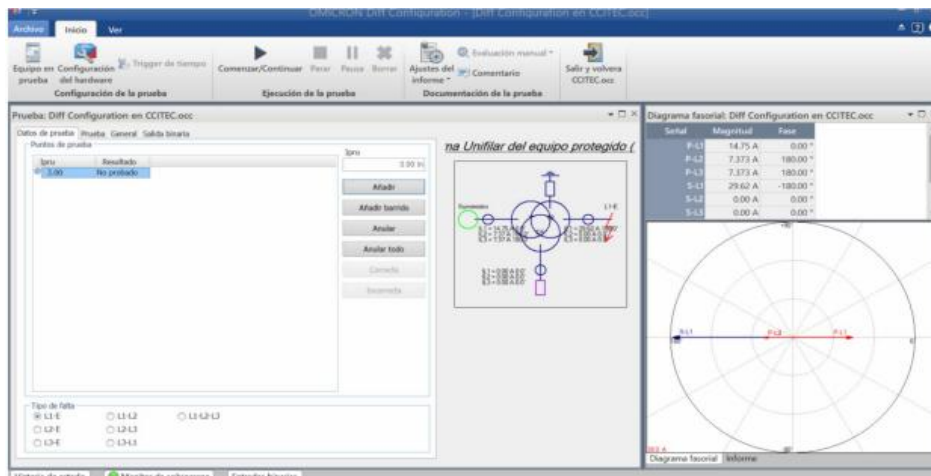


Figura 20. Comportamiento fasorial de una falla externa.

Fuente: Prueba Test Universe 5.00

Paso11: Realizamos la Evaluación de la Prueba de una falla externa.

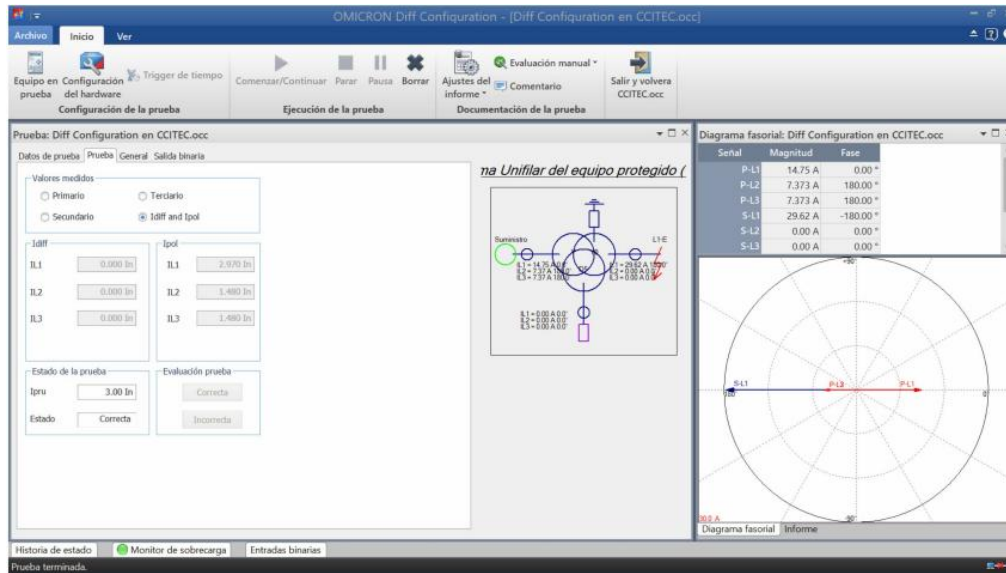


Figura 21. Evaluación de la Prueba de una Falla Externa.

Fuente: Prueba Test Universe 5.00.

Paso 12: Probamos la característica de protección con el módulo Diff Operating Characteristic Prueba de Disparo adecuado en una falla interna y externa.

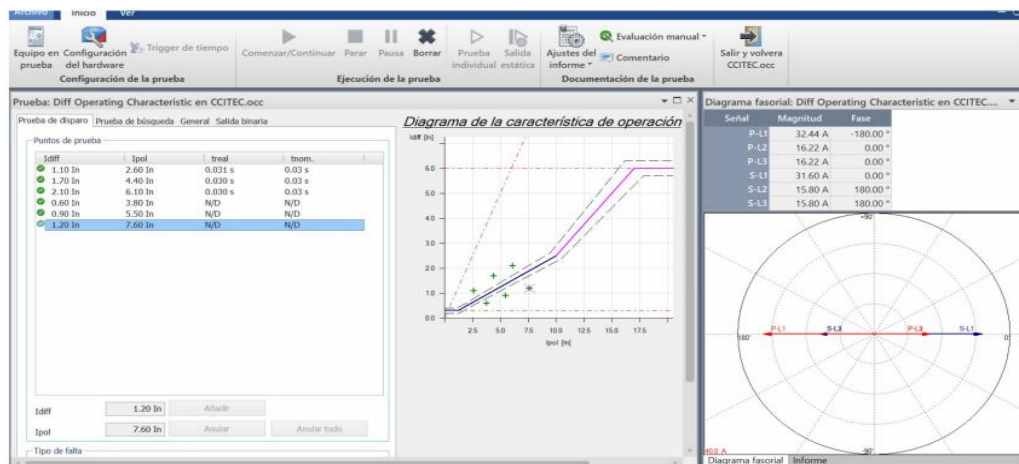


Figura 22. Operación del comportamiento característico del relé ante una falla interna y externa.

Fuente: Prueba Test Universe 5.00.

CAPITULO V

METODOLOGÍA

La metodología propuesta tiene como propósito analizar y evaluar el impacto de la saturación de transformadores de corriente (TC) en la actuación de protecciones diferenciales de transformador (87T), considerando también el efecto de las corrientes de Inrush durante la energización.

Paso 1

- Modelar el Tc con su curva B-H y parámetros de clase (5P10) en Simulink o Digsilent.

Se construye un modelo saturable del transformador de corriente (TC) incorporando la no linealidad del núcleo mediante su curva de magnetización B-H o su curva equivalente V – I de excitación como establecen los criterios de desempeño para TC de protección en IEC 61869-1/61869-2 y clases de exactitud en IEEEc57.13. El TC se representa con su rama magnetización no lineal y circuito secundario con su burden total:

Ecuación 5. Cálculo de la resistencia Burden del lado secundario del TC.

$$R_{burden} = R_{rele} + R_{cable} + R_{conexiones}$$

La tensión requerida en el secundario del TC (para reproducir la corriente) se calcula con:

Ecuación 6. Cálculo del VTC en el lado secundario adecuado para no entrar a saturación.

$$VTC(t) = I_s(t) * R_{burden} + L_s \frac{di(t)}{dt}$$

El criterio de saturación se evalúa mediante el punto de rodilla V_{knee} :

$VCT > V_{knee} = TC$ en saturación

Implementación Practica

- En Simulink se usa un elemento saturable para el núcleo (reactor saturable) alimentado por el flujo equivalente del TC.

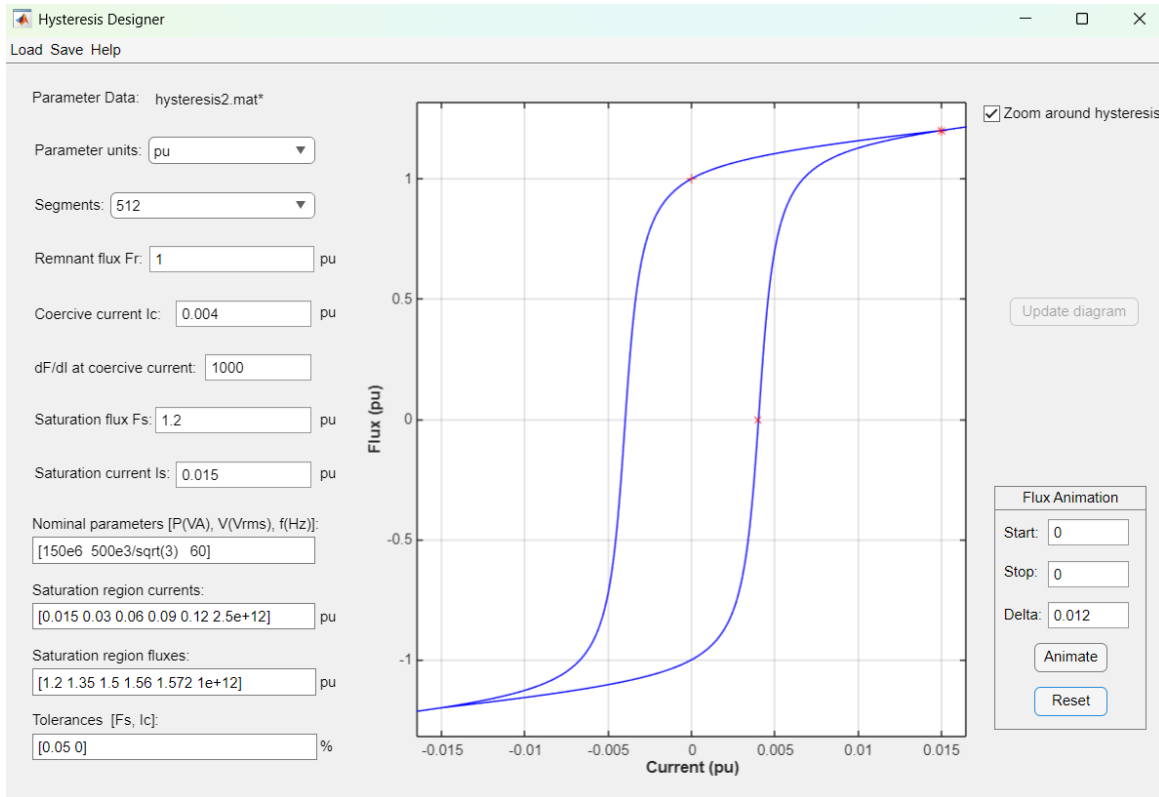


Figura 23. Características de saturación con histéresis.

Fuente: MathWorks MATLAB-Simulink.

5. CARACTERÍSTICA DE SATURACIÓN CON HISTÉRESIS

El voltaje a través de la rama de magnetización y el modelo estático de histéresis define la relación entre el flujo y la corriente de magnetización evaluada en CC, cuando las pérdidas por corrientes parásitas no están presentes.

El modelo de histéresis se basa en una característica semi-empírica, usando una expresión analítica arctangente $\Phi(I)$ y su inversa $I(\Phi)$ para representar las trayectorias de los puntos de operación. Los parámetros de expresión analítica se obtienen mediante el ajuste de curvas de datos empíricos que definen el bucle principal y la característica de saturación de valor único. La herramienta de diseño de histéresis del bloque Powergui se utiliza para ajustar el

bucle principal de histéresis de un tipo de núcleo en particular a los parámetros básicos. Estos parámetros están definidos por el flujo remanente (Φ_r), la corriente coercitiva (I_c) y la pendiente ($d\Phi / dI$) en el punto $(0, I_c)$ como se muestra en la siguiente figura.

La corriente de magnetización I se calcula a partir del flujo Φ obtenido al integrar el voltaje a través de la rama de magnetización. El modelo estático de histéresis define la relación entre el flujo y la corriente de magnetización evaluada en CC, cuando las pérdidas por corrientes parásitas no están presentes. El modelo de histéresis se basa en una característica semi-empírica, usando una expresión analítica arctangente $\Phi(I)$ y su inversa $I(\Phi)$ para representar las trayectorias de los puntos de operación. Los parámetros de expresión analítica se obtienen mediante el ajuste de curvas de datos empíricos que definen el bucle principal y la característica de saturación de valor único. La herramienta de diseño de histéresis del bloque Powergui se utiliza para ajustar el bucle principal de histéresis de un tipo de núcleo en particular a los parámetros básicos. Estos parámetros están definidos por el flujo remanente (Φ_r), la corriente coercitiva (I_c) y la pendiente ($d\Phi / dI$) en el punto $(0, I_c)$ como se muestra en la siguiente figura 23.

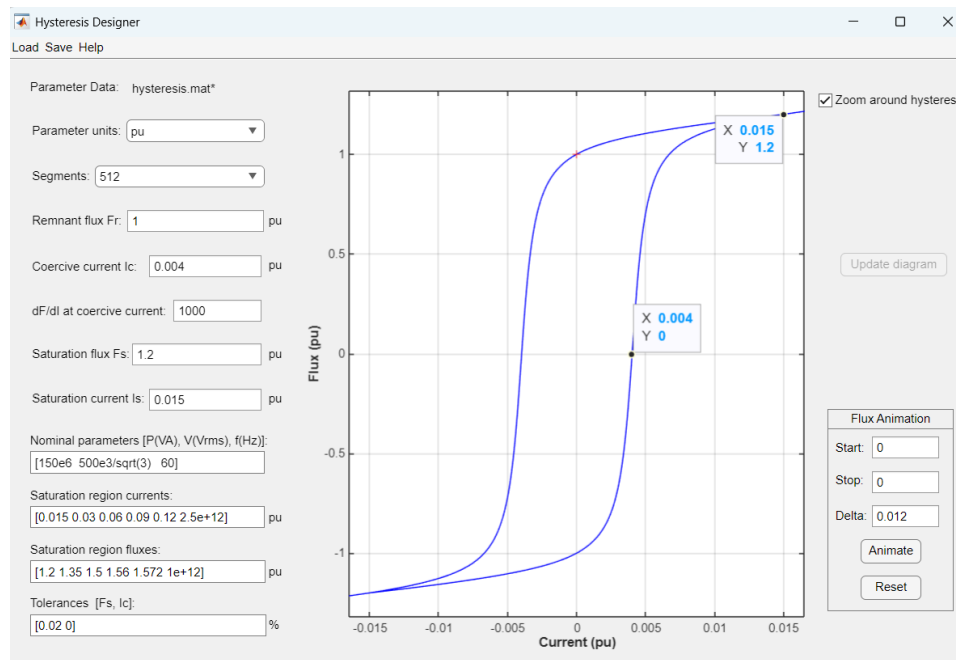


Figura 24. Característica de saturación con histéresis.

Fuente: MathWorks MATLAB-Simulink.

El semiciclo del ciclo principal se define por un conjunto de N puntos igualmente espaciados que se conectan a través de segmentos lineales. El número N se determina en la herramienta de diseño Histéresis del bloque Powergui, siendo $N = 256$ un valor que produce una curva suave y usualmente resultados aceptables. La característica de saturación con un único valor se establece mediante pares de flujo de corriente que crean una curva asintótica en relación con la inductancia del núcleo de aire L_s . A continuación, se describen las propiedades fundamentales del modelo de histéresis:

Una alteración simétrica en el flujo origina una alteración simétrica en la corriente que varía entre $-I_{max}$ y $+I_{max}$, creando un ciclo de histéresis simétrico, cuya forma y área dependen del valor máximo Φ_{max} . El lazo principal se manifiesta cuando el flujo Φ_{max} se sincroniza con el flujo de saturación (Φ_s). Al sobrepasar este límite, la característica se reduce a un estado de saturación con un único valor. En circunstancias transitorias, una corriente que oscila para la magnetización genera bucles asimétricos pequeños, tal como se muestra en la figura 9; además, se parte del supuesto de que todos los puntos de operación permanecen dentro del lazo principal. Una vez que estos lazos se cierran, no afectan el desarrollo posterior (Figura 25).

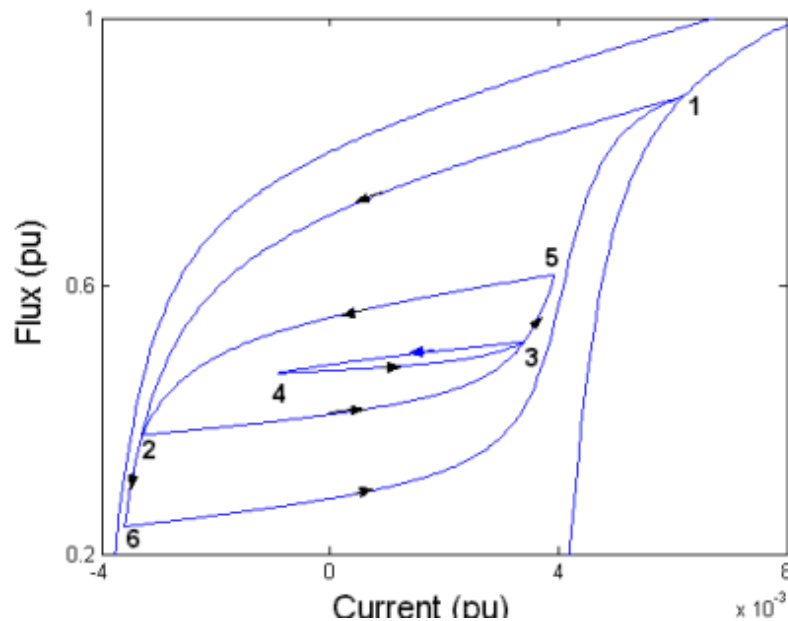


Figura 25. Comportamiento de saturación con histéresis en situación transitoria.

Fuente: MathWorks MATLAB-Simulink.

Paso 2

- Introducir corrientes transitorias de Inrush y fallas externas para ver el nivel de saturación y su impacto en la corriente diferencial en Digsilent.

Falla externa saturación del TC

- Se aplica una corriente alta en el primario del TC que eleva VCT. Se verifica si el producto $I_s * R_{burden}$ lleva al TC a saturación. El error de reproducción se cuantifica como:

Ecuación 7. Análisis del porcentaje de error del burden.

$$\% \text{ Error} = ((I_s - (I_p / n)) / I_p / n) * 100$$

En la figura 26, nos muestra un sistema eléctrico de potencia que tiene un campo eléctrico radial con un flujo magnético variable en tiempo junto con su transformador de potencia está ubicado en una subestación de subtransmisión de energía que se encargara regular/transportar las magnitudes de voltaje y corriente resultante que requiere cada comercial o industria y vemos que también tiene interruptores (Tanque muerto) que nos permitirá abrir o cerrar el circuito eléctrico a medida que relé diferencial le ordene hacerlo pero todo dependerá que el TC mida la corriente ambos extremos del transformador para llevarlos a niveles que el relé pueda procesar como es un esquema sensible que es capaz de detectar rápidamente las fallas internas , con el fin que este sistema eléctrico este dentro de la zona de protección (Transformador de potencia) para analizar si opera adecuadamente antes fallas entre devanados, devanados y tierra o por la mala coordinación del relé que no actúa a tiempo a estas inminentes plasmas eléctricos generando temperaturas de 6 mil grados Celsius y este calor sobre el aceite puede generar gases inflamables como hidrogeno, acetileno y etano lo que provoca que el transformador explote (Blasting jumper), y que no actúe erróneamente durante la saturación magnética del núcleo debido que la forma de onda del secundario se va distorsionando que ya no seguiría fielmente a la onda primario haciendo que relé mida un desequilibrio de corriente hará que la protección dispare falsamente.

SISTEMA DE SUMINISTRO DE ENERGIA ELÉCTRICA BIDIRECCIONAL DE POTENCIA EN DIGSILENT

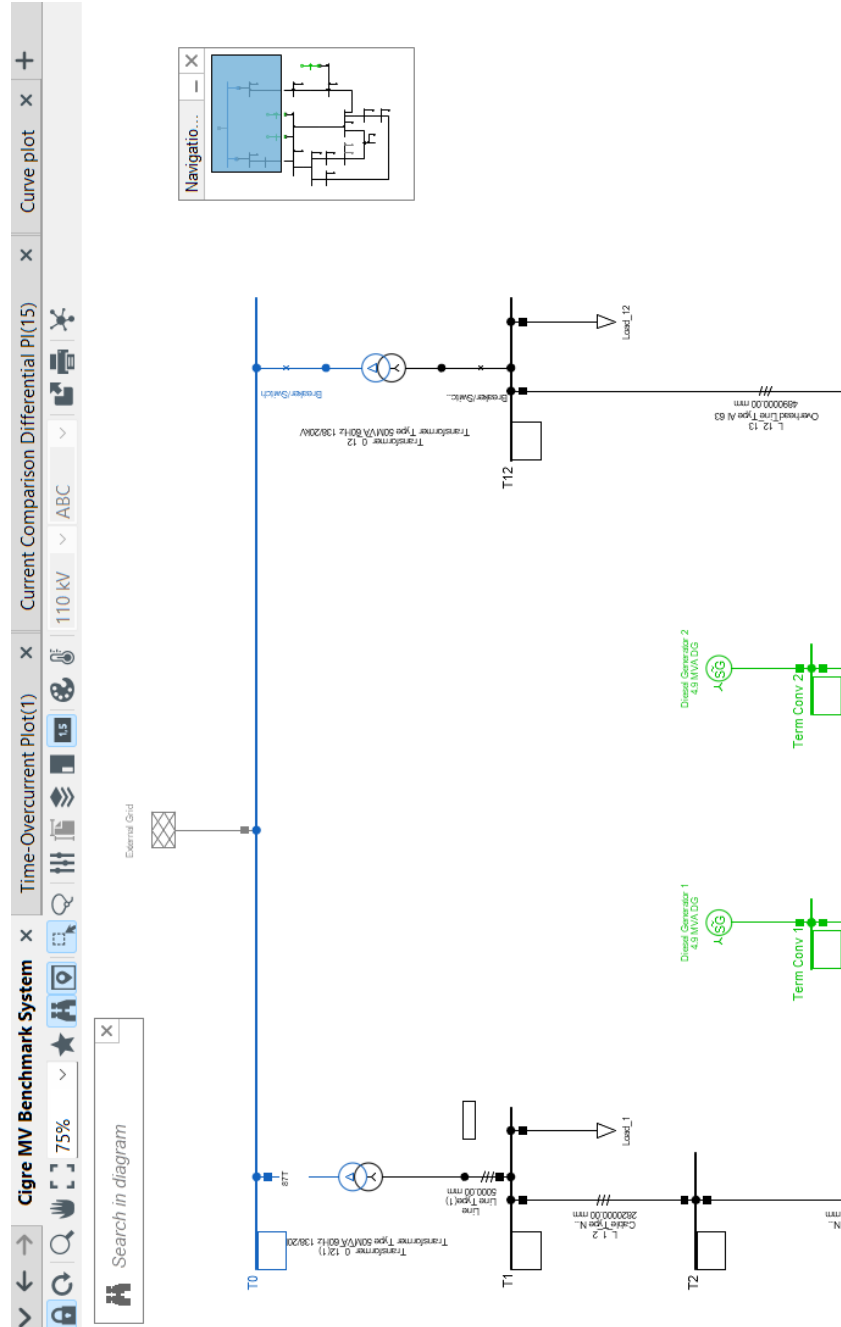


Figura 26. Sistema eléctrico de energía eléctrica altamente confiable.

Fuente: Power Factory (Digsilent).

6. MODELO DEL SISTEMA CUANDO SE PRESENTA UNA FALLA INTERNA

Estamos induciendo una falla interna (corriente de cortocircuito muy alto trifásico) para ver cómo se comporta el relé diferencial.

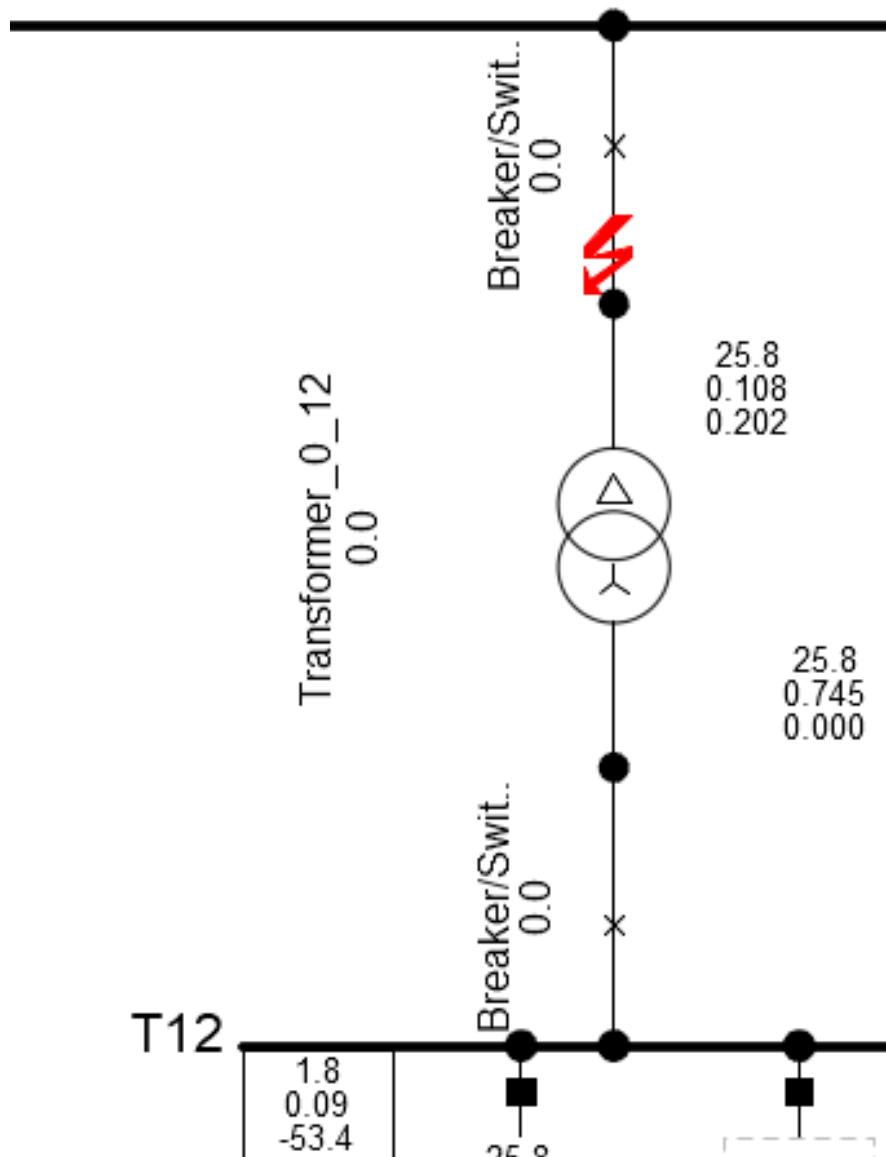


Figura 27. Simulación induciendo una Falla Interna en Digsilent.

Fuente: Power Factory (Digsilent).

7. COMPORTAMIENTO CARACTERISTICO DEL RÉLE DIFERENCIAL MEDIANTE UNA FALLA INTERNA.

En esta figura 28. Podemos apreciar que el comportamiento característico del relé diferencial (87T), la Corriente diferencial está por encima de la curva entonces dispara adecuadamente demostrando que mantiene su sensibilidad y selectividad antes fallas internas que puede comprometer la integridad del transformador de Potencia.

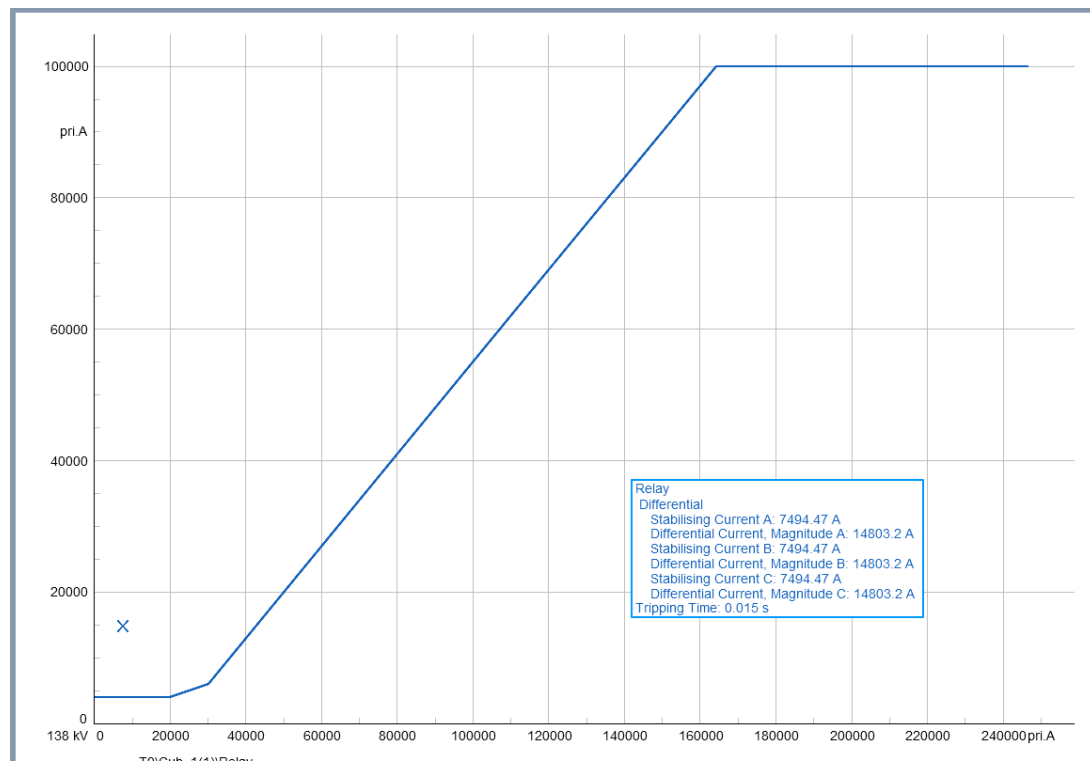


Figura 28. Actuación del relé diferencial mediante una Falla interna.

Fuente: Power Factory (Digsilent).

8. MODELO DEL SISTEMA CUANDO SE PRESENTA UNA FALLA EXTERNA

En la figura 29. Le inducimos una falla en la barra de BT y que la protección diferencial mide la corriente de falla para visualizar si opera indebidamente si es así tenemos que ajustar la pendiente de restricción dual o con contenido de armónico para no dispare ante corriente de corto fuera del área de protección.

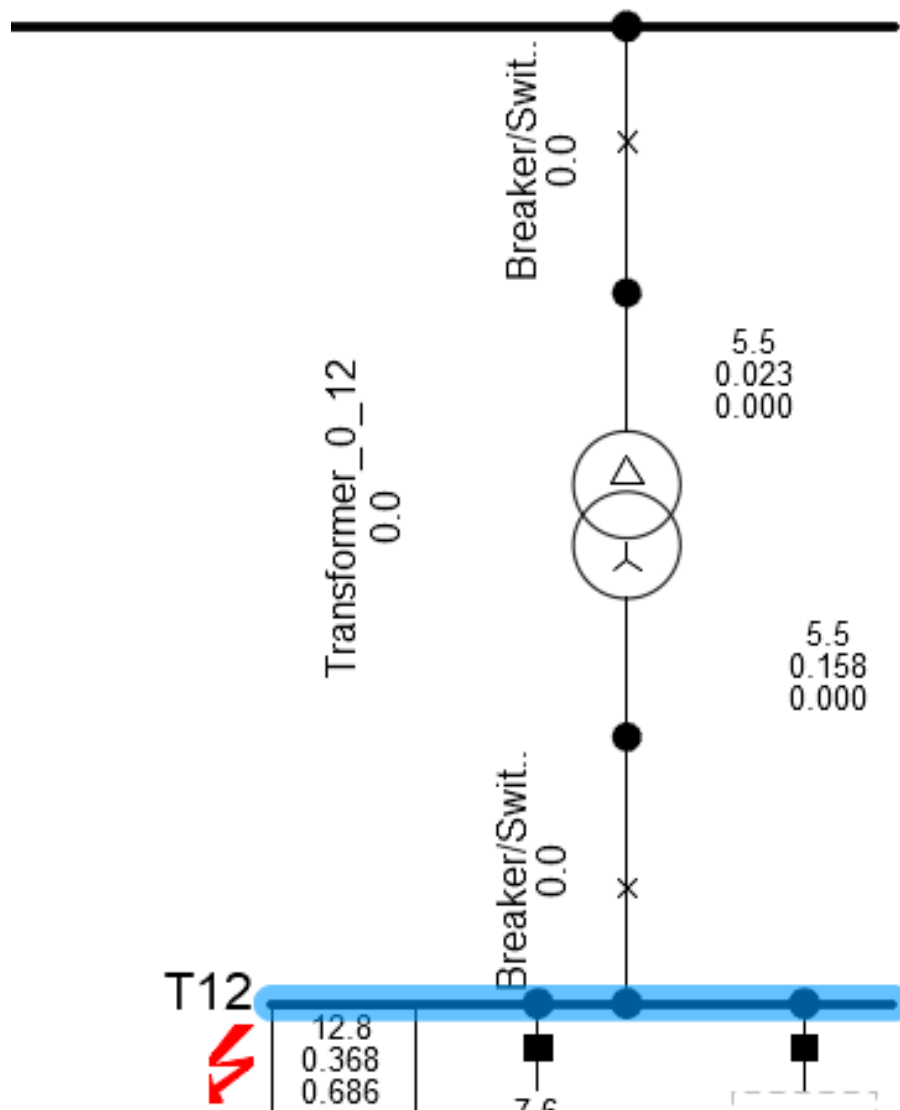


Figura 29. Simulación induciendo una Falla Externa en Digsilent.

Fuente: Power Factory (Digsilent).

9. COMPORTAMIENTO CARACTERISTICO DEL RÉLE DIFERENCIAL MEDIANTE UNA FALLA EXTERNA

Tenemos el comportamiento característico del relé diferencial durante una falla externa que registra que no dispara indebidamente ajustando el slope dual del 20% que pasa de ese pendiente mantenido la sensibilidad de la protección en comparación con relé tradicionales que si disparan ante estos fenómenos externos.

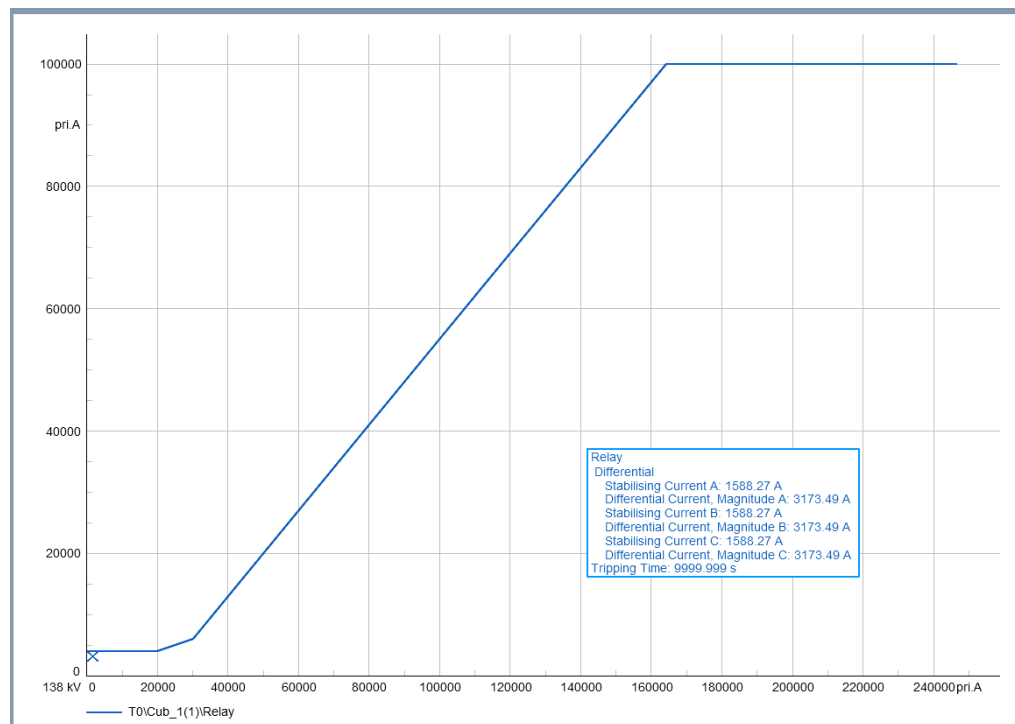


Figura 30. Actuación del relé diferencial mediante una Falla interna.

Fuente: Power Factory (Digsilent).

- **Falla durante la Energización (Inrush magnético)**

El Inrush de alta amplitud y elevada componente armónica es el efecto clave en que la forma de onda se vuelve asimétrica, elevando el flujo instantáneo y favoreciendo saturación del Tc. Para el relé diferencial, se calcula con la siguiente fórmula que se representa en el semiplano de la curva característica del relé:

- Eje coordenado (Y)

$$I_{dif} = I_1 - I_2$$

- Eje de las abscisas (X)

$$I_{rest} = (I_1 + I_2) / 2$$

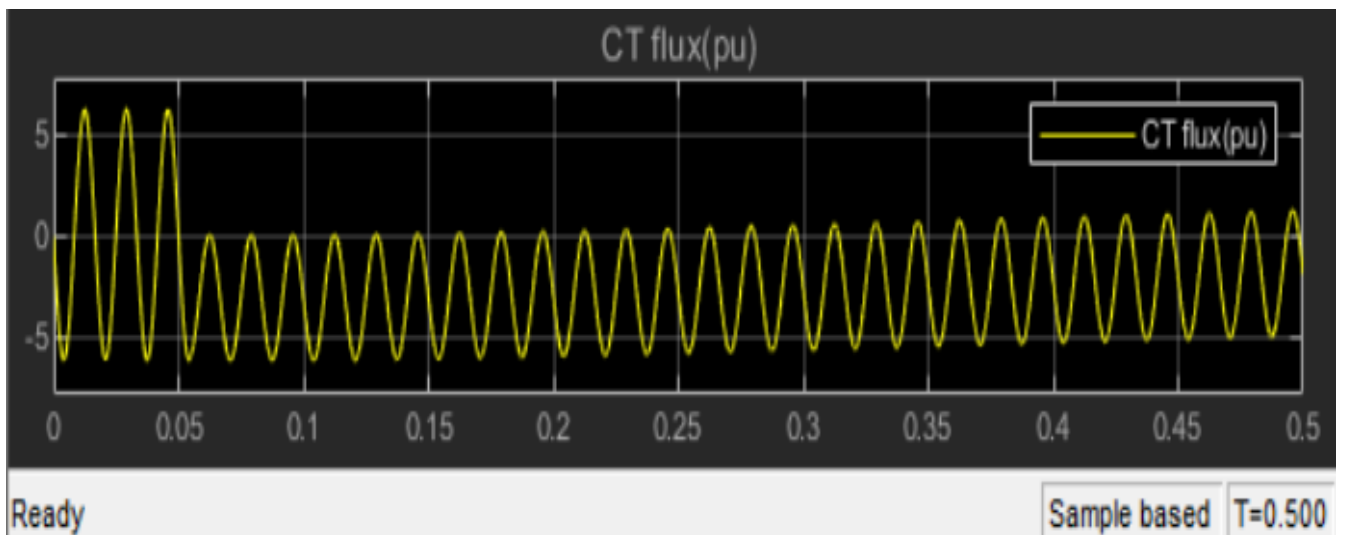


Figura 31. Comportamiento del Inrush mediante la Energización.

Fuente: MathWorks MATLAB-Simulink.

10. COMPORTAMIENTO CUANDO ENTRA EN SATURACIÓN MAGNÉTICA EL TC

Este comportamiento durante la saturación magnética del núcleo del TC lo realice en simulink y vemos que deja de reproducir correctamente a la corriente primaria y aparte de eso se puede visualizar diferentes puntos que puede afectar el núcleo del TC que son las siguientes (como nos indica en la figura 31):

- Comparación de la corriente resultante Primaria y Secundaria del TC, se ve que la forma de onda secundario se va distorsionando o aplanando por la saturación.
- VCT es mayor al V_{knee} .
- Evolución de $I_{dif}(t)$ para evidenciar el desequilibrio falso.



Figura 32. Comportamiento de durante la Saturación magnética del Núcleo TC.

Fuente: MathWorks MATLAB-Simulink.

Paso 3

- Construir el circuito trifásico del transformador y los TC conectados al relé 87T.
- Se implementa un sistema trifásico completo compuesto por: fuente, impedancia equivalente de red, transformador de Potencia, TCs (AT y BT), carga o red equivalente y bloque de protección diferencial.

Se incluyen transformaciones necesarias para la protección diferencial:

- Relación de TC (AT y BT)
- Comparación por relación del transformador.

- Compensación de desfase (por conexión Estrella / delta o Delta / estrella).
- Compensación de magnitud de la onda Senoidal del transporte de energía.

En términos de modelo 87T, relé compara corrientes compensadas:

Ecuación 8. Cálculo de Corriente diferencial compensada

$$I_{dif} = I1_{comp} - I2_{comp}$$

11. MODELO DEL SISTEMA TRIFASICO CON EL TRANSFORMADOR DE POTENCIA, PROTECCION DIFERENCIAL EN SIMULINK.

En esta figura 32. Desarrolle un sistema de suministro eléctrico de energía eléctrica en el programa simulink con su respectiva impedancia de línea de subtransmisión, integrando los interruptores para que abra o cierra el circuito y haciendo la adecuada selección de los transformadores de corriente en la entrada y salida del transformador de potencia se puede proporcionar una tolerancia mínima dependiendo de la clase de procesación que se utilice en mi caso es 5P10 que nos ayudara amplificar la corriente nominal 10 veces antes que entra en estado de saturación (curva no lineal).

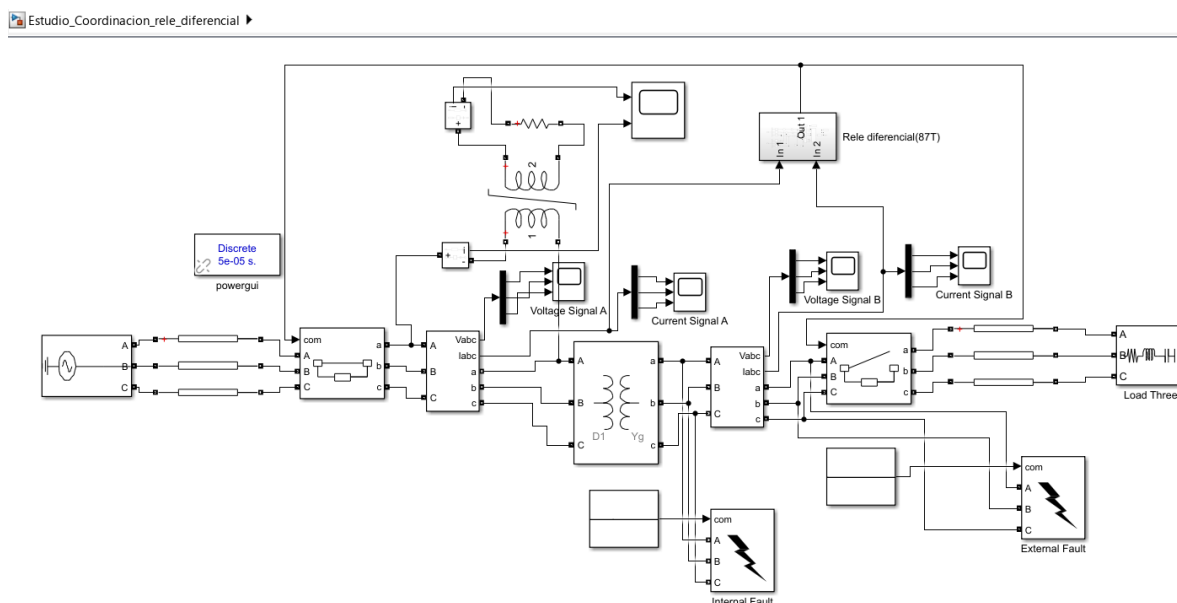


Figura 33. Sistema eléctrico incorporando los TC y el relé diferencial.

Fuente: MathWorks MATLAB-Simulink.

Verificando también cuantas placas laminadas tiempo el TC con el fin de reducir las corrientes de Foucault generado por el flujo magnético variable, colocando el burden que en mi caso es relé diferencial ya que considerando este punto en el secundario del TC ya que aumentando el burden del circuito puede incrementar la posibilidad que se sature el núcleo del TC y también posibilidad de error de medición.

COMO ESTA COMPUESTO EL RELE DIFERENCIAL

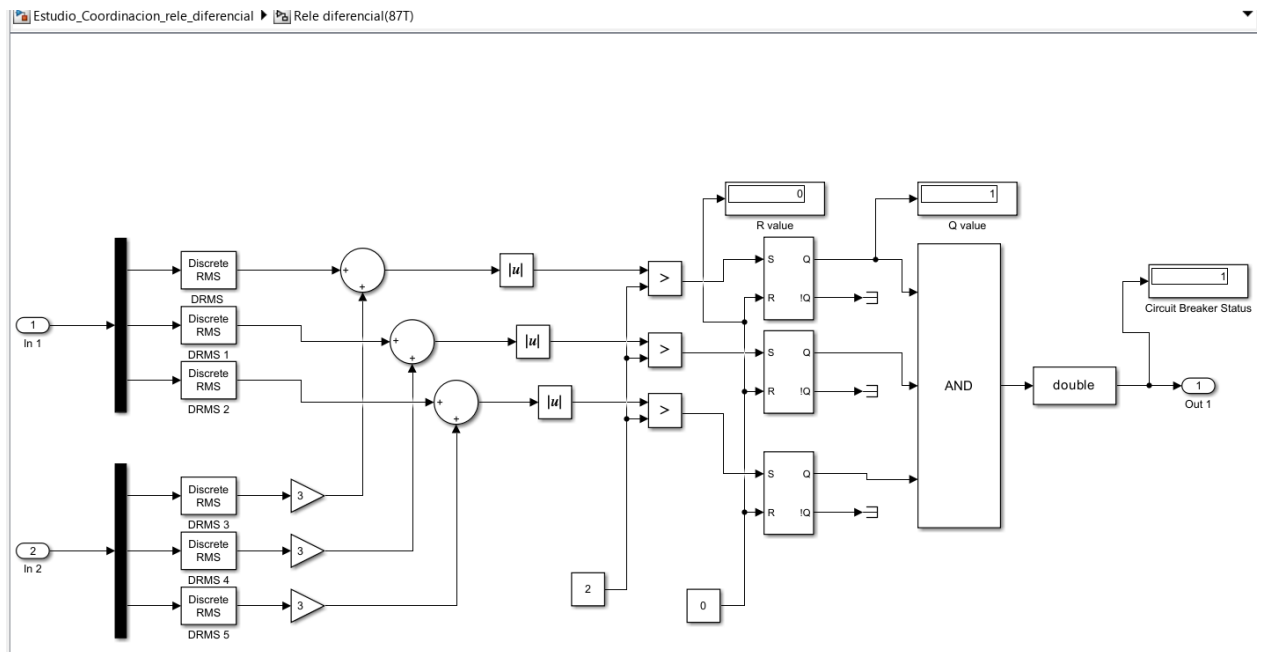


Figura 34. Modelo del relé diferencial en Simulink.

Fuente: MathWorks MATLAB-Simulink.

Paso 4

Ejecutar escenarios de falla interna, externa e Inrush para registrar la respuesta dinámica del relé diferencial.

Guzmán y su equipo recrearon 3 tipos de condiciones típicas que puede afectar el relé 87T.

- **Falla interna**

El relé debe operar(disparo) por existir diferencia real entre corrientes de ambos lados.

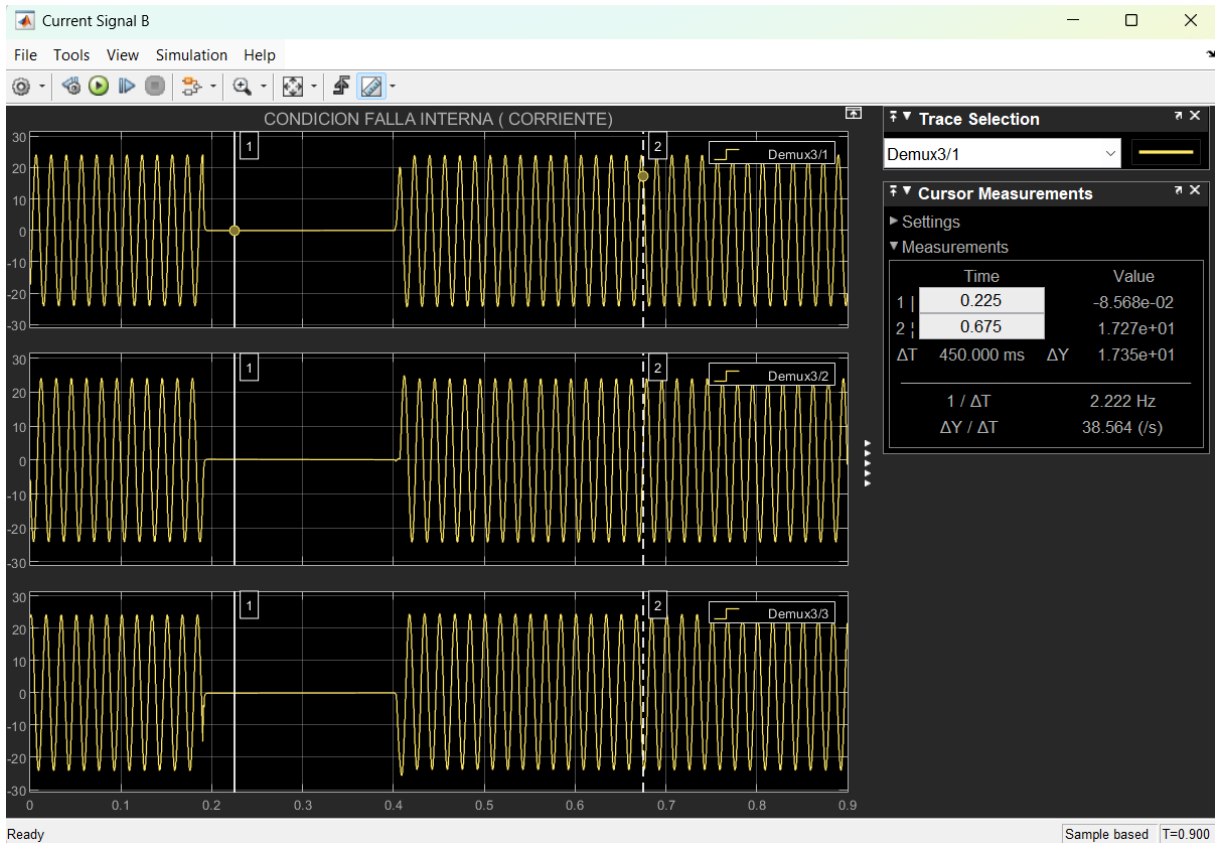


Figura 35. Modelo del relé diferencial en simulink.

Fuente: MathWorks MATLAB-Simulink.

Aquí se puede observar que el relé diferencial (87T) está identificando por un problema interno entre los devanados, entre ellos y la tierra, que puede ser causado por corrientes diferenciales muy elevadas o por un insuficiente aislamiento dieléctrico en el interior del transformador. Esto podría llevar a que el transformador se convierta en conductor, perdiendo su capacidad de aislamiento y generando arcos eléctricos a través del camino de menor resistencia. Es decir, las corrientes simétricas o las ondas de impulso similares a un rayo que ingresan al nodo (el objeto de protección) se consideran como un canal conductor positivo, lo que hará que el relé envíe la señal al interruptor para dispararlo adecuadamente, mostrando así sensibilidad ante fenómenos transitorios. Todo dependerá del tipo de conexión que tenga el TC porque si es una conexión estrella neutro y ocurre una inminente falla de plasma monofásica a tierra fuera del área de protección y esa corriente de falla simétrica fluye hacia la tierra funcional generando campos

eléctricos radiales a esta superficie como ondas concéntricas generado voltaje de paso y esa gradiente de potencial de falla del suelo fluirá también en la conexión estrella del neutro del transformador hará que el relé perciba un falso desequilibrio de corriente y hará que actúe erróneamente, debido como es de protección dependerá del número de devanados que tenga el secundario para aumentar la sensibilidad de protección.[20]

- **Falla externa**

El relé no debe operar. Si hay saturación magnética del núcleo TC, corto circuitos que están fuera del área de protección.

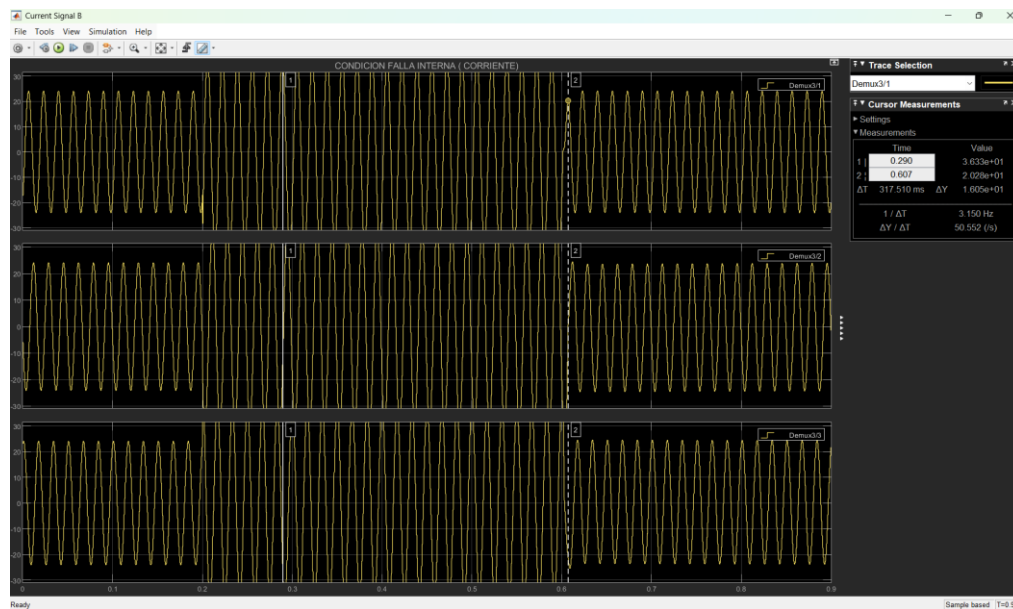


Figura 36. Actuación del relé diferencial durante una falla Externa.

Fuente: MathWorks MATLAB-Simulink.

Tenemos aquí el comportamiento de una falla externa es decir cortocircuito fuera del área de protección, la simulación del TC de protección punto de rodilla bajo o al saltarse el transformador de corriente la forma de onda del secundaria se va distorsionando o apantallando en un intervalo de tiempo deja de representar fielmente la corriente primaria por lo tanto los relé tradicionales hará que dispare falsamente en cambio los relés modernos tiene restricción dual (slope dual) de aproximadamente de 20- 70% o contenido de

armónicos mayor al 15% del H2 todas estas algoritmos permitirá que el relé no dispare erróneamente ante esta inminentes fallas transitorias, ajustando el slope dual podemos tener que el sistema eléctrico sea altamente fiable y regulando también el burden del circuito secundario del TC como en este caso el relé va aumentando el burden incrementará las posibilidades que el núcleo de TC comience a saturarse, la probabilidad de fidelidad de medición y la otra posible solución podría ser una clase de precisión de factor de sobre corriente adecuado debido que se recomienda que el TC de protección sea mínima pero todo esto nos basamos en las normas IEC 61869-2 para evitar los errores de saturación y podemos ajustar también el factor X/R que esto dependerá del tipo de falla que se de en líneas de distribución de energía eléctrica bidireccional y tendrá una corriente de falla asimétrica es aquí donde comienza análisis ya que regulando el X que sería la reactancia inductiva de la línea podemos hacer que el componente DC se demore mucho en amortiguar ese comportamiento corriente de corto asimétrico pero si aumento la resistencia voy hacer que el DC se aplane mucho más rápido hasta que se convierta en una falla simétrica, al que tener en cuenta la remanencia del TC debido que depende del material si es capaz de almacenar flujo magnéticos variables en tiempo actúa como un efecto inductivo solo que el valor de la remanencia no se puede calcular así no más, la remanencia puede afectar o mejorar el comportamiento del núcleo del transformador de corriente para una falla determinada, el problema es cuando una falla produce un flujo del mismo signo que la remanencia y la remanencia tiene sobre la saturación solo dura aproximadamente $\frac{1}{2}$ ciclo. [16], [17]

- **Energización (Inrush magnético)**

El relé no debe disparar. Se evalúa el bloqueo por armónico mayor al 15% de H2 (si este habilitado)

Se analiza:

- Tiempo de operación top, estado Trip, $I_{dif}(t)$, $I_{rest}(t)$.
- Ubicación de puntos en la característica $I_{dif} - I_{rest}$.

Podemos ver en este comportamiento que se genera un Inrush magnético es decir corrientes transitorias que se inicia cuando energizamos el transformador de potencia de energía eléctrica y vemos que el Inrush es de aproximadamente de $8-12 \cdot I_n$ con un contenido del 2

armónico y esto puede durar ciento de milisegundos dependiendo del tamaño del transformador o de la carga y también puede darse por la conexión al vacío del transformador entonces el relé moderno en este caso SEL387 tendrá una lógica de contenido de armónico mayor al 15% al H2.

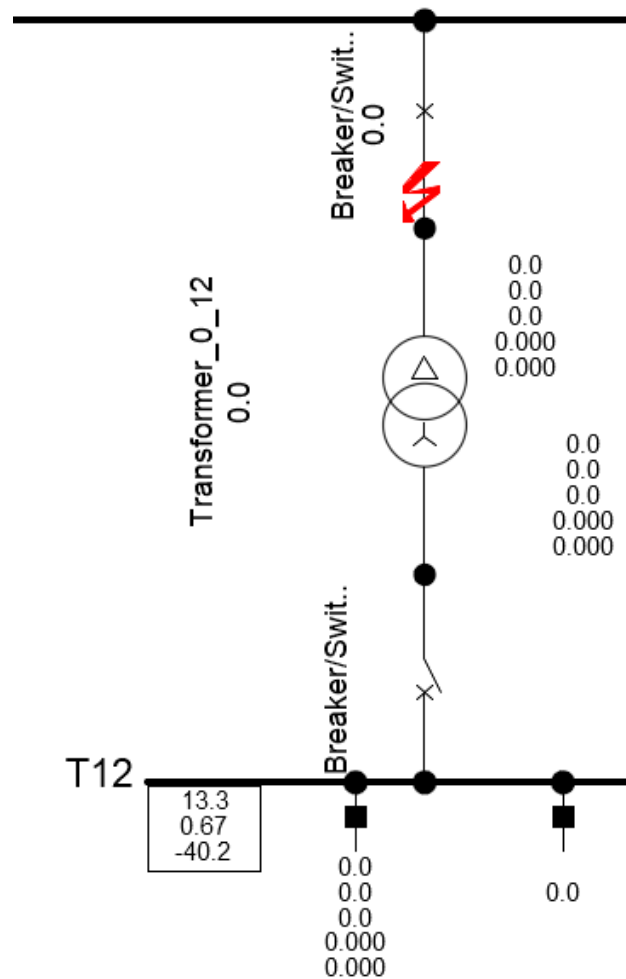


Figura 37. Energización del LH del Transformador y Secundario en corto.

Fuente: Power Factory (Digsilent).

En la figura 38. Nos muestra el comportamiento del relé diferencial mientras sufre una corriente transitoria denominada Inrush que ocurre cuando energizamos el transformador de potencia dejando en el lado secundario abierto o sin carga para no afectar la integridad de las

cargas por lo tanto durante el Inrush tiene un contenido de 2do armónico de 20- 40% para que no actúe el relé ante este fenómeno. [15]

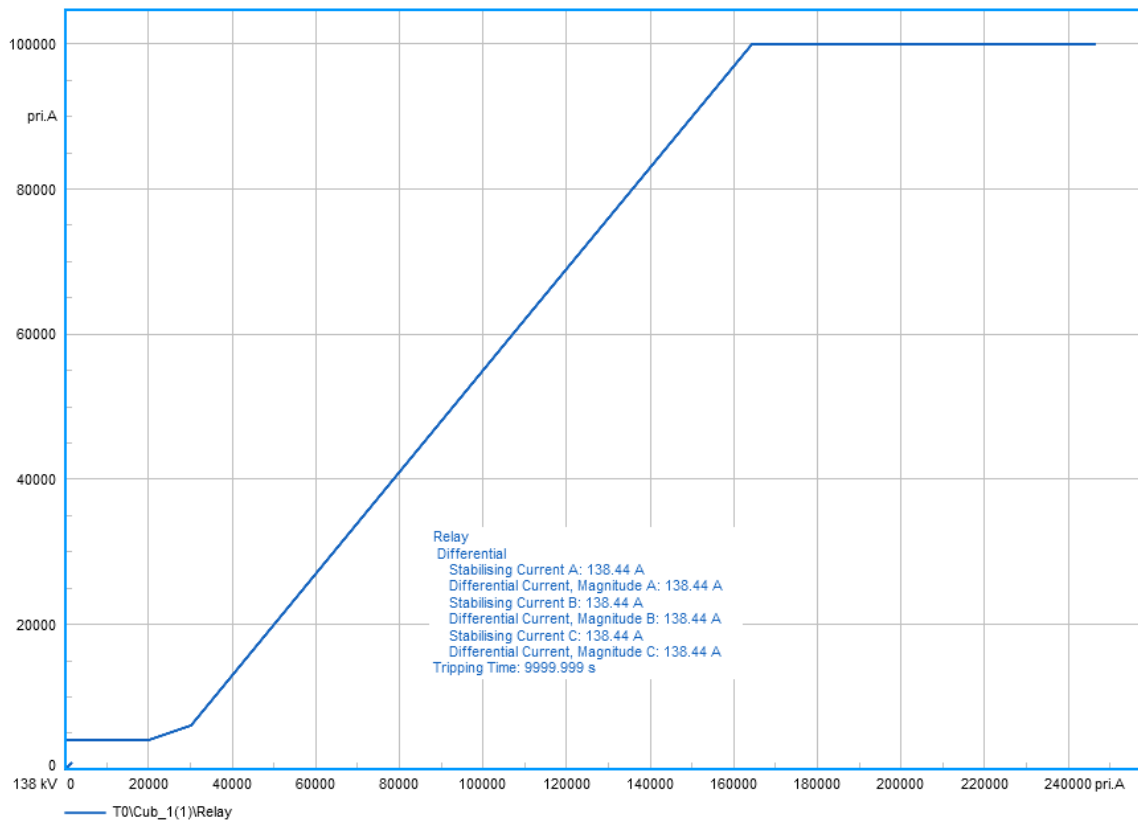


Figura 38. Actuación del relé diferencial mediante un Inrush.

Fuente: Power Factory (Digsilent).

Paso 5

Configurar TC de distintas clases de precisión (5P10, 10P20) y comparar sus curvas de magnetización.

Se parametrizan TC con diferentes clases de precisión y factor de sobre corriente:

- 5P10: buena precisión hasta $10 \cdot I_n$ (en condiciones de burden especificado), pero se satura antes.
- 10P20: Tolera mayor corriente antes de saturarse.

Se comparan sus curvas: V -I_{exc} o B – H y especialmente el V_{knee} (mayor v_{knee} más margen contra saturación).

CLASE DE PRECISION 5P10 CURVA MAGNETIZACION

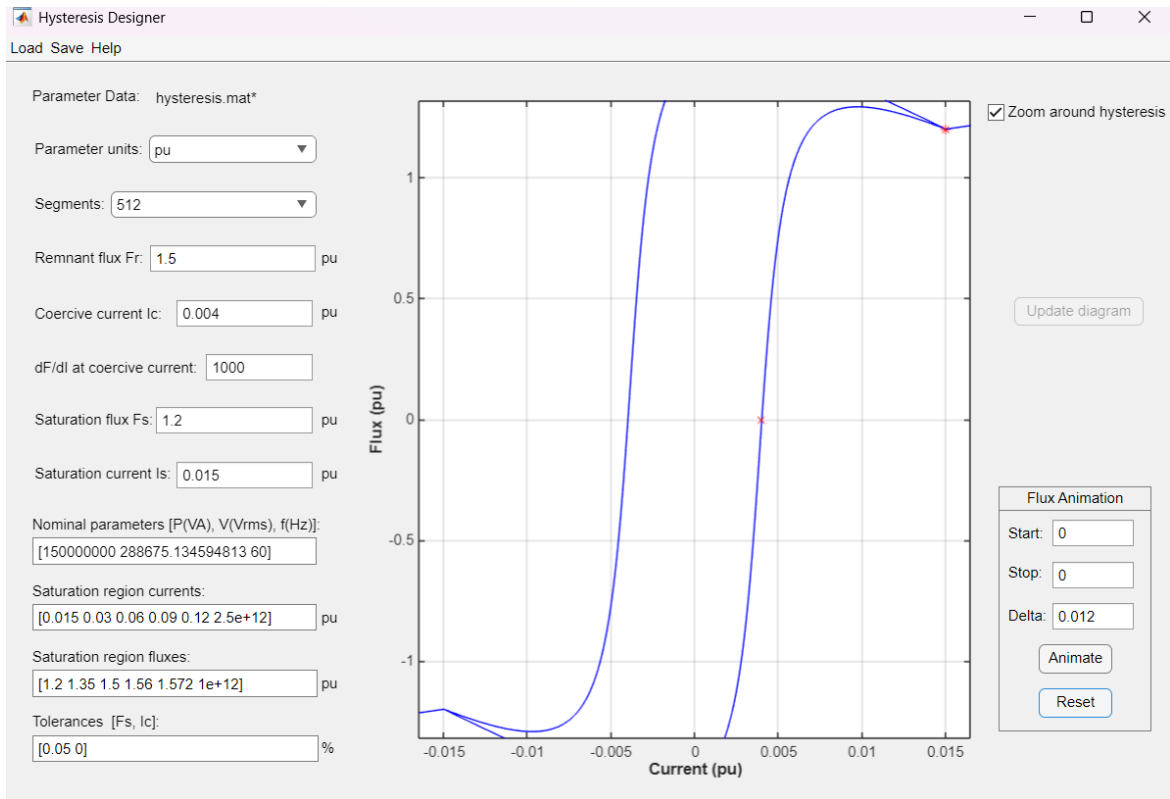


Figura 39. Comportamiento de la Curva magnetización según su Clase de Precisión.

Fuente: Matlab- Mathworks/ Simulink

Aquí nos muestra el comportamiento del núcleo del punto de rodilla del TC que según su clase de precisión nos da una tolerancia o mayor capacidad absorber corriente en el primario del transformador antes de estar en la curva no lineal de saturación.

Paso 6

Evaluar en simulación como se varía el punto de rodilla (V_{knee}) y el error de corriente diferencial durante una falla.

Se repiten las simulaciones con cada clase y se cuantifica:

- Condición de Saturación:

$$VCT = I_s * R_{burden}$$

VCT mayor V_{knee} entrando a saturación

- Error Secundario

$$\text{Error} = ((I_s - (I_p / n)) / I_p / n) * 100$$

- Impacto en el 87T.

Idif mayor Riesgo de disparo.

- Resultado Esperado:

TC 10P20 o TPY

Paso 7

Conectar el relé SEL387 al simulador Ómicron CMC 356 y reproducir señales de operación normal.



SEL-387 DOBLE PENDIENTE



Diff Elems	PCT4 4th Harmonic Blocking Percentage OFF, 0-100%	WVGG1 1stg 1 Line-to-Line Voltage 0.000 1.000-2000.000kV
1stg 1 Line Current Tap 1.000 Auto setting when IRTA = OFF	PCT5 5th Harmonic Blocking Percentage OFF, 0-100%	WVGG2 1stg 2 Line-to-Line Voltage 0.000 1.000-2000.000kV
2ndg 2 Line Current Tap 1.000 Auto setting when IRTA = OFF	THDP 5th Harmonic Alarm Threshold OFF, 0.02-3.2 TAP	WVGG3 1stg 3 Line-to-Line Voltage 0.000 1.000-2000.000kV
3rdg 3 Line Current Tap 1.000 Auto setting when IRTA = OFF	THSD 5th Harmonic Alarm TDPU 0.000 0.000-8000.000 cyc	PKR PF Ratio 2000 1-4000
SEIP 5th Harmonic Element Current In 0.000 0.00-1.00 TAP	OCDS DC Ratio Blocking N Select: N, Y	COMPANG Compensation Angle 0 0-360deg
SEIS 5th Harmonic Element Current In 0.000 0.00-1.00 TAP	HSSTR Harmonic Restraint Y Select: N, Y	WVGG Voltage Current Blocking Y Select: N, Y
SEIP 5th Harmonic Element Current In 0.000 0.00-1.00 TAP	IBHL Independent Harmonic Blocking N Select: N, Y	STG Three Phase Voltage Input Y Select: N, Y
PCT2 2nd Harmonic Blocking Percentage OFF, 0-100%		General Data

TC: VALORES NOMINALES	PRIMARIO	SECUNDARIO
CORRIENTE PRIMARIA	300	1200
CORRIENTE SECUNDARIA	5	5
PTO. DE ESTRELLA A TIERRA	HACIA EL EQUIPO PROTEGIDO	HACIA EL EQUIPO PROTEGIDO

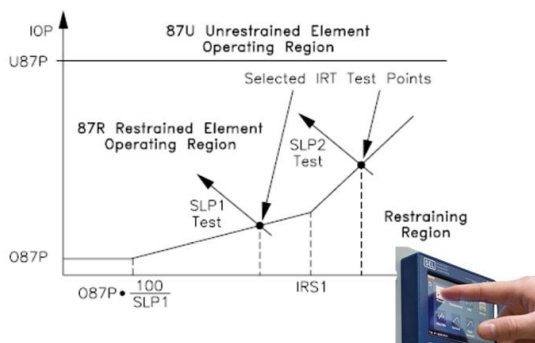


Figura 40. Ajuste detallado del comportamiento del relé 87T

Fuente: Programación de Ómicron.

Aquí hice las conexiones de las tres potentes fuentes de corriente que nos ofrece (3 x 64 A – 3 x 860 VA) y a tierra con la siguiente bobina del dispositivo SEL387 para realizar la

inyección de gran magnitud secundaria para que el relé pueda procesar aproximadamente 1 -5A, también realizar las conexiones de la 4 x binary con sus respectivos funciones de medición analógicas de 10 canales para que podemos hacer un análisis completo del comportamiento de la curva característica del relé diferencial ajustando su slope dual para que no hagan falsas operaciones antes fallas que perjudica el núcleo del transformador de corriente también nos permitirá verificar el burden del relé disminuir su resistencia que no aumente la posibilidad de saturación y errores de medición del relé antes estos fenómenos transitorios.

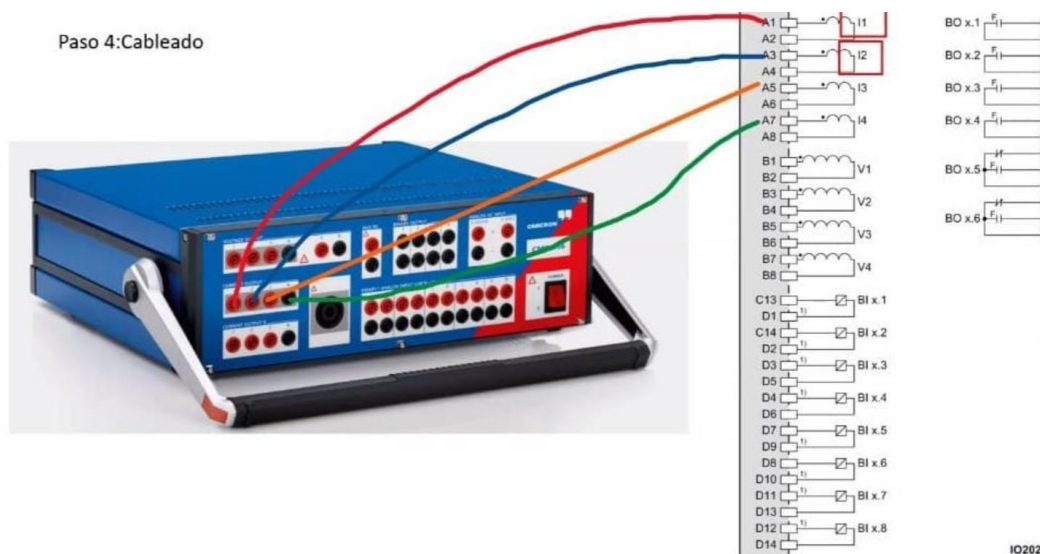


Figura 41. Conexión de la maleta ómicron al relé 87T

Fuente: Programación de Ómicron



Figura 42. Partes posteriores que compone la maleta Ómicron.

Fuente: Programación de Ómicron.

CONEXIONES AL RELE DIFERENCIAL PARA REGISTRAR EL COMPORTAMIENTO CARACTERISTICO.

En la figura 43. Vemos que está conectando desde la maleta CMC356 al relé diferencial para su curva característica y utilice un conductor llamado DB9 para puede ser capaz de transportar información del relé al CMC 356 para que con el programa test universe puede modificar los componentes integrados que tiene el relé (87T).



Figura 43. Conexión de la maleta ómicron Función medición Analógica a la Computadora.

Fuente: Programación de Ómicron.

CAPITULO 6

ANALISIS DE RESULTADOS

MODELO DEL TC EN MATLAB- SIMULINK

Los elementos de SimPowerSystem se emplean para la representación de sistemas eléctricos, apoyándose en las bibliotecas y herramientas de análisis disponibles, lo que nos permite crear sistemas de manera eficiente. Esto incluye fuentes de energía, componentes básicos, dispositivos de electrónica de potencia, diferentes tipos de máquinas, aplicaciones concretas y diferentes formas de controles y mediciones.

El bloque Powergui actúa como un entorno para los Modelos de SimPowerSystems, los elementos de SimPowerSystem sirven para modelar sistemas de energía eléctrica, facilitando el uso de las bibliotecas y herramientas de análisis ofrecidas, esto nos ayuda en la creación efectiva de sistemas que incluye fuentes de energía, componentes básicos, dispositivos de electrónica de potencia, distintos tipos de maquinaria y aplicaciones prácticas, que también abarcará diferentes controles y medidas, el bloque Powergui funciona como un entorno.

Los Modelos de SimPowerSystems constituyen un conjunto valioso de herramientas que pueden facilitar el análisis de armónicos, el flujo de carga y otros tipos de estudios del sistema eléctrico, cuyas funciones son útiles para evaluar el desempeño del diseño. MATLAB ofrece un ejemplo elaborado por G. Sybille (Hydro-Québec) que demuestra la saturación en el transformador de corriente. Se realizaron ajustes menores al modelo original.

La figura 44 ilustra un modelo de saturación para transformadores de corriente dentro de Simulink. Este diseño de transformador de corriente se utiliza para medir la corriente en el lado secundario de un sistema de suministro de línea simple que opera a 20 kV y 60 Hz, con un inductor de derivación, utilizando el solucionador ode23tb (rígido/TR-BDF2) en MATLAB/Simulink, siguiendo pasos de tiempo predeterminados y tolerancia relativa.

El transformador de corriente usado en este diseño tiene especificaciones de 2000 A / 5 A, 25 MVA. Las resistencias de los devanados primario y secundario son 0.001 pu, mientras

que la inductancia L está fijada en 0.04 pu y la resistencia de pérdida del núcleo es $R_m = 100$ pu. La carga que se conecta al devanado primario es un inductor de derivación que tiene una capacidad de 69.3 MVAR, una corriente nominal de 1 kA y un factor de calidad $Q = 100$. Así, la resistencia de la carga R se calcula en 0.693 ohmios, y la inductancia L en 0.221 H. En el lado secundario del transformador de corriente, hay una resistencia de carga (Burden) de 1 ohmio. Esta carga se utiliza para medir la corriente en la rama. La corriente medida con el multímetro 1 es la corriente del lado secundario, la cual debería ser proporcional a la corriente primaria en condiciones normales.

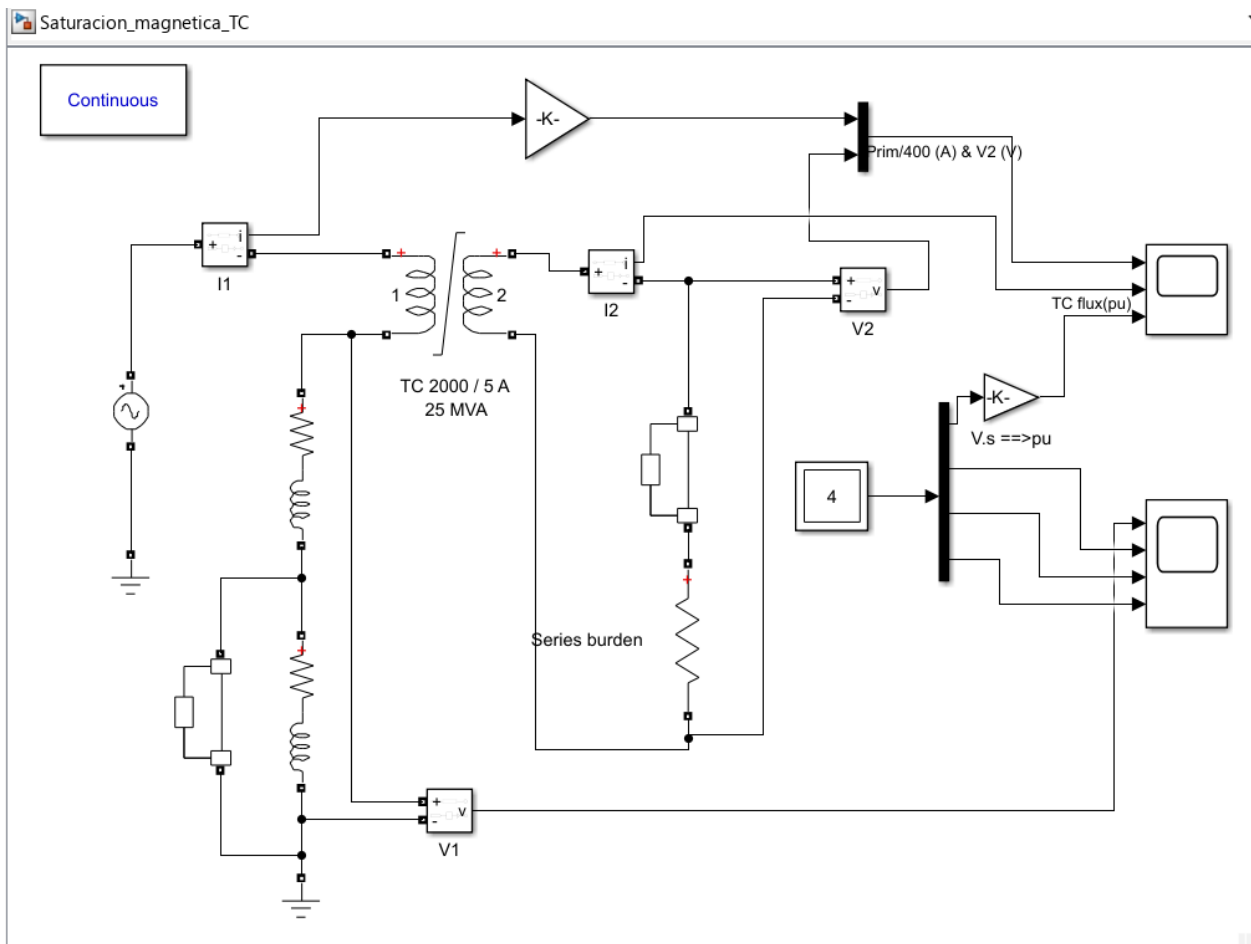


Figura 44. Modelo de saturación del transformador de corriente desarrollado en Simulink.

Fuente: MathWorks MATLAB-Simulink.

Bajo condiciones de operación continua, la corriente secundaria producida por el transformador de corriente, que permite el procesamiento por parte del relé, es igual a $1000 * 5/2000 = 2,5$ A (donde se registró un máximo de 3,54 A en el multímetro 1). El transformador de corriente puede ajustarse con o sin la simulación de histéresis. Se emplean gráficos para examinar directamente el perfil de onda de cada variable. En la figura 2, se muestran superpuestas la corriente secundaria y la primaria, ajustadas según la relación de vueltas. El flujo del transformador de corriente, que mide el multímetro, se calcula en unidades por unidad dividiendo $0.0125 \text{ V} * \text{raíz cuadrada de } 2 / (2 * \pi * 60)$ y se puede observar en la figura 3. La carga primaria (relación de X / R) establece la constante de tiempo del lado primario. La variación en el tiempo del interruptor en la sección primaria determina la magnitud del componente no periódico. Durante la prueba estándar, el interruptor se activa a un voltaje máximo ($t = 1.25$ ciclos). Se realizó la simulación y se pueden ver las corrientes primaria y secundaria del transformador de corriente en la Figura 45. [15]

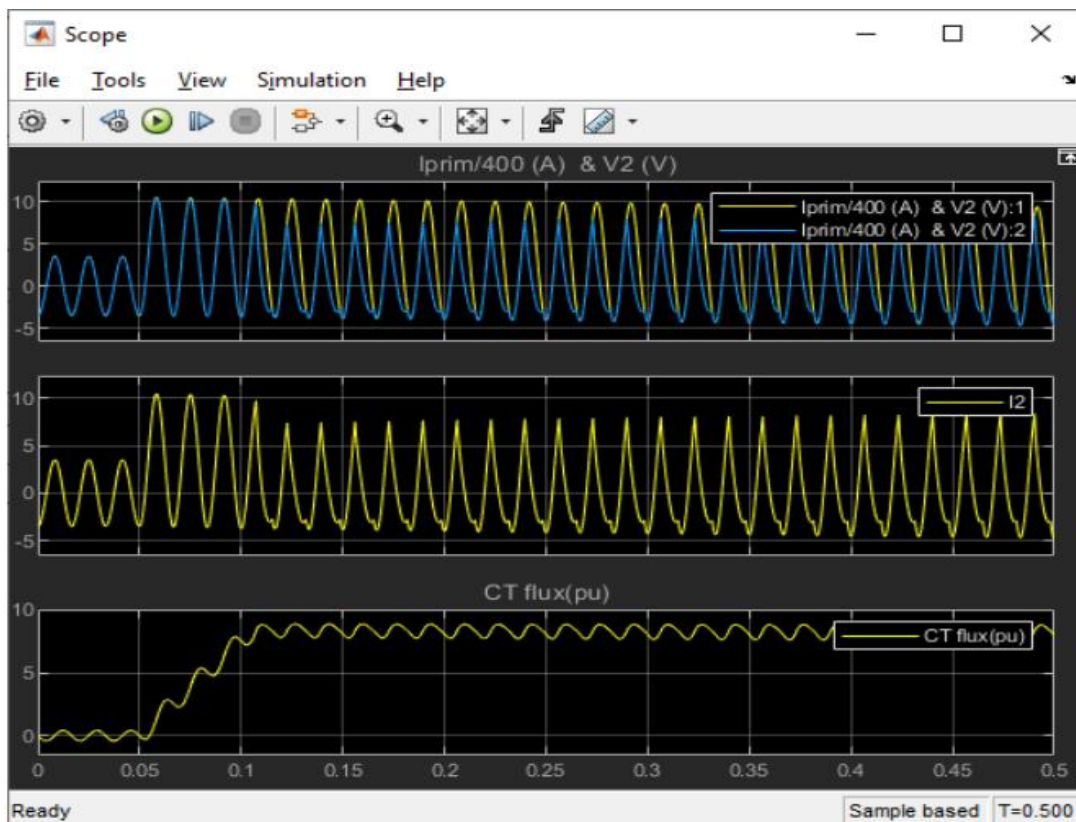


Figura 45. Corriente primaria (azul) en comparación con la corriente secundaria (amarillo), flujo del transformador de corriente en $t = 1.25 / 60s$.

Fuente: Desarrollado en simulink

La línea en color azul ilustra la proporción de las vueltas divididas del circuito principal de 400, mientras que la línea en amarillo sobrepuesta representa el circuito auxiliar. Tal como se esperaba, el elemento es aperiódico e inexistente y el transformador de corriente no alcanzará la región de saturación. El flujo del transformador de corriente que se muestra en la Figura 42 tiene una forma aproximadamente sinusoidal. La influencia del componente de descomposición de corriente continua no resulta significativa. Se ajusta el tiempo de conmutación del interruptor para que se cierre en el instante en que el voltaje cruza cero ($t = 1/60$ s). En este momento, el voltaje de la fuente se encuentra en cero, lo cual indica que el ángulo de fase es $\alpha = 0$, resultando en la máxima contribución aperiódica.

La derivación del reactor generará un flujo de corriente asimétrico después de la conmutación. En la figura 24, se puede ver que, al principio, el transformador de corriente aún puede representar correctamente la corriente primaria. No obstante, después de tres ciclos, la asimetría del flujo ocasionada por la corriente primaria defectuosa hace que el transformador se sature, lo que resulta en la distorsión de la corriente secundaria.

La figura 24 muestra que el flujo ha llegado a un punto de saturación de 10 pu. Tal como se mencionó en la sección previa, hay diversos factores que influirán en la corriente de saturación del transformador. Con la ayuda del modelo de Simulink, se llevará a cabo un análisis para examinar el tamaño de la carga, la histéresis y una corriente primaria extremadamente alta que causará saturación en condiciones de estado estable.

Con la herramienta de diseño de histéresis que forma parte de Powergui, es viable simular la curva de histéresis. La corriente del área de saturación se definirá como [0.015 0.03 0.06 0.09 0.12] y los flujos de saturación se establecerán como [1,2 1,35 1,5 1,56 1,572], dando lugar a una curva de histéresis que se encuentra parcialmente ampliada y se puede visualizar en la Figura 23. Posteriormente, al acceder a los parámetros del bloque del transformador de corriente, se pueden configurar para simular la histéresis. La corriente primaria comparada con la corriente secundaria a $t = 1/60$ s con histéresis, presentada en la Figura 44, ilustra el flujo del transformador de corriente.

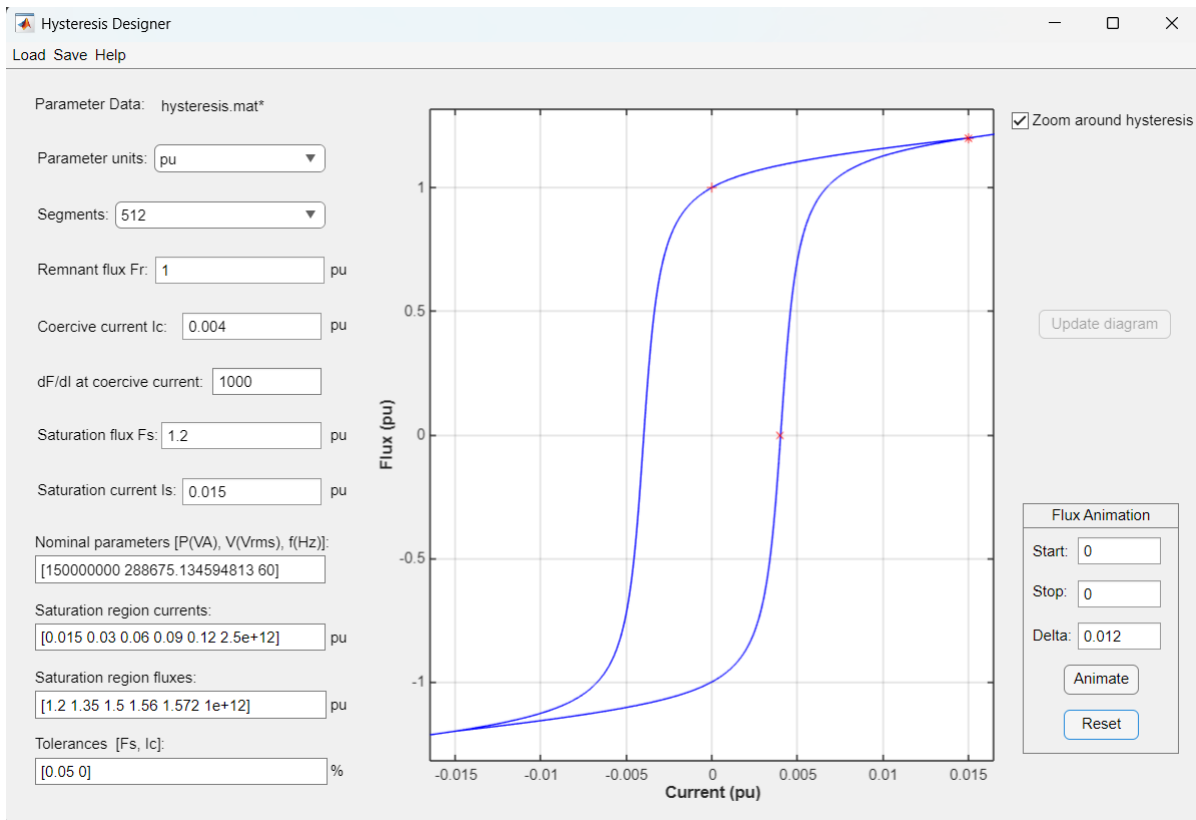


Figura 46. Curva de magnetización del núcleo TC.

Fuente: Elaborado en Simulink

Al revisar los gráficos que se muestran en las Figuras 45 y 47, se puede observar que el TC no logra convertir la corriente de entrada de manera equitativa desde el inicio. La forma de la onda en el flujo que se ve en la figura 46 surge a causa del efecto del magnetismo residual, lo que contribuye a que el núcleo entre en saturación.

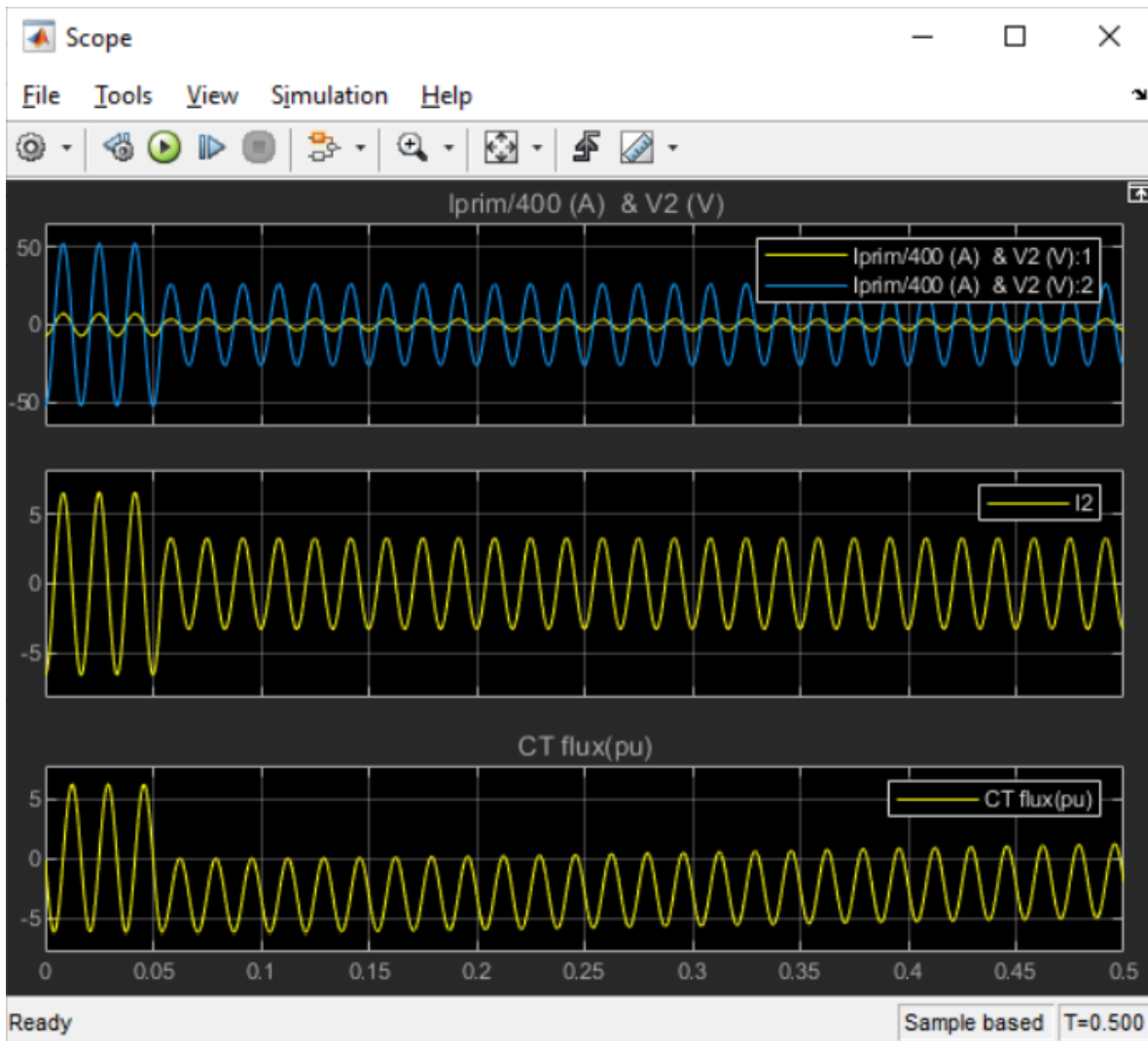


Figura 47. Corriente de entrada (azul) en comparación con la corriente de salida (amarillo), flujo del transformador de corriente en $t = 1.25 / 60s$.

Fuente: Elaborado en Simulink

La figura 47 muestra el resultado de la revisión para ajustar la carga de resistencia $R = 8$ ohmios. Al observarla en relación con la imagen 48, se nota que una resistencia más alta en el lado secundario acelera el proceso de saturación del transformador.

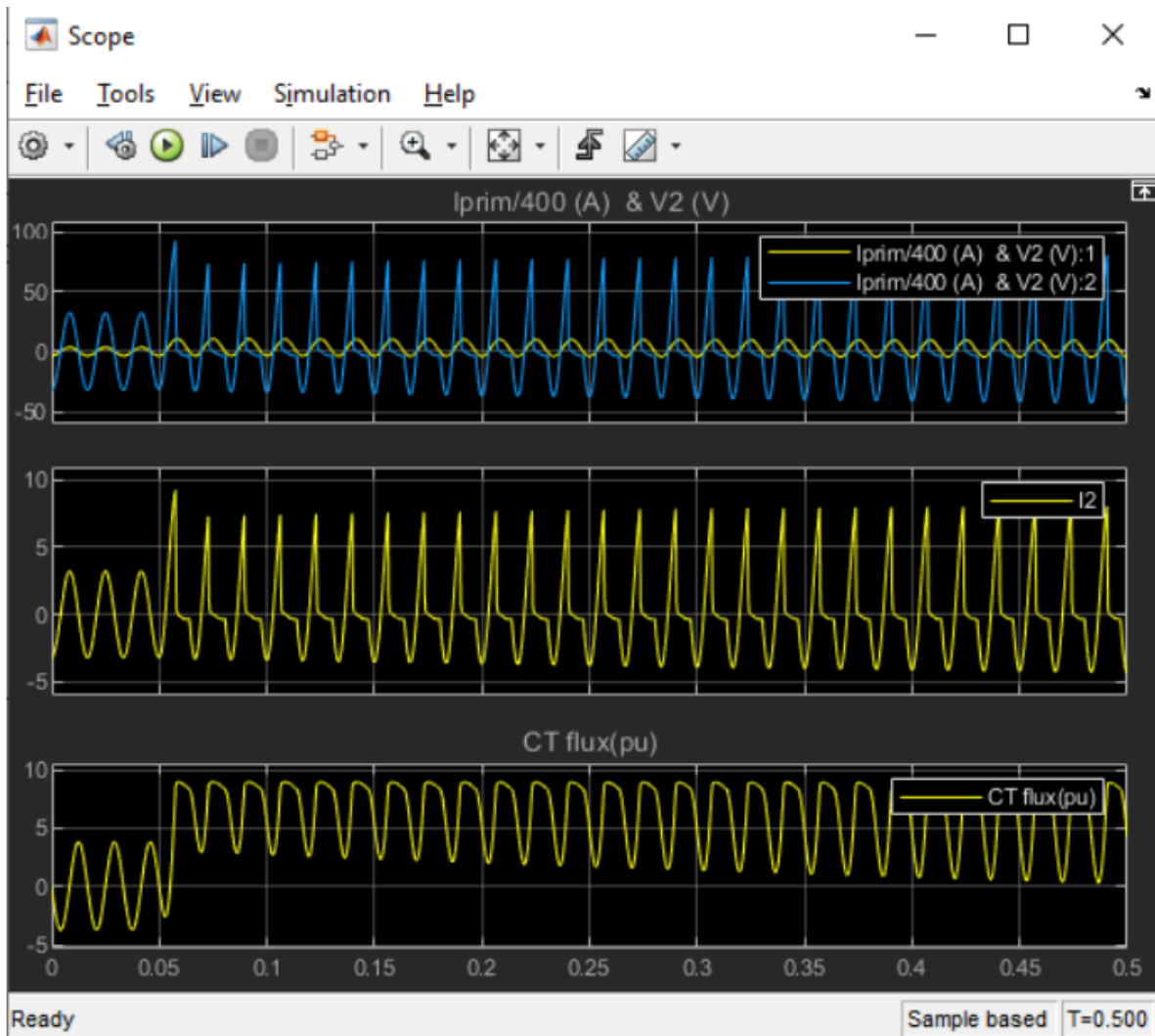


Figura 48. Corriente primaria (rojo) VS Corriente secundaria (azul) con carga de 10 ohmios.

Fuente: Desarrollado en simulink

11.1. CONCLUSIONES

La protección diferencial de transformador (87T) es altamente sensible a las condiciones transitorias del sistema eléctrico, especialmente a la saturación de los transformadores de corriente (TC) durante fallas externas y a la corriente de energización (Inrush) durante la puesta en servicio del transformador.

Se demostró que la saturación del TC ocurre cuando la tensión inducida en su secundario supera el punto de rodilla del núcleo (V_{knee}), condición que provoca una distorsión significativa de la corriente secundaria y genera una corriente diferencial aparente, aun cuando no exista una falla externa real.

Las simulaciones realizadas en Digsilent / Simulink confirmaron que los TC de clase 5P10 presentan una mayor posibilidad de saturación bajo corrientes elevadas, lo que incrementa el riesgo de disparos indebidos en la protección diferencial durante fallas externas.

11.2. RECOMENDACIONES

Para aplicaciones de protección diferencial de transformadores, se recomienda seleccionar TC de protección con clase mínima 10P20 o TPY, asegurándose que el punto de rodilla sea superior a la tensión inducida durante las condiciones de falla más severas del sistema.

Es crucial considerar la carga total del circuito secundario del transformador de corriente, que incluye relés, cables y conexiones. Un incremento en esta carga eleva el riesgo de saturación del núcleo, lo que a su vez dificulta la exactitud de las mediciones.

Para prevenir acciones inapropiadas al iniciar el sistema y durante el Inrush, se sugiere activar la restricción de armónicos para el segundo armónico y configurar los relés diferenciales 87T empleando curvas de limitación de doble pendiente, de acuerdo con las pautas del estándar IEEE C37.91 [14].

CAPITULO VI

12. REFERENCIAS BIBLIOGRAFICAS

- [1] Horowitz, S. H., & Phadke, A. G. (2014). Power system relaying (4th ed.). John Wiley & Sons. <https://doi.org/10.1002/9781118662007>.
- [2] Warrington, A. R. (2012). Protective relaying: Principles and applications (4th ed.). CRC Press. <https://doi.org/10.1201/b12348>.
- [3] IEEE Power System Relaying Committee. (2022). IEEE C37.91-2022: Guide for Protective Relay Applications to Power Transformers. IEEE Standards Association <https://doi.org/10.1109/IEEESTD.2022.9761511>.
- [4] American National Standards Institute. (2011). ANSI C57.13: Standard Requirements for Instrument Transformers. ANSI.
- [5] Comisión Electrotécnica Internacional. (2012). IEC 61869-2: Transformadores de instrumentos - Parte 2: Requisitos complementarios para transformadores de corriente. IEC.
- [6] J. Rebizant, W., Szafran, J., & Wiszniewski, A. (2011). Digital signal processing in power system protection and control. Springer. <https://doi.org/10.1007/978-1-4471-2311-2>.
- [7] Guzmán, A., Benmouyal, G., & Schossig, E. (2004). Performance analysis of traditional and improved transformer differential protective relays. IEEE Transactions on Power Delivery, 19(3), 884–891. <https://doi.org/10.1109/TPWRD.2004.829370>.
- [8] Novosel, D., Hart, D. G., & Taylor, W. A. (1996). Distance relay application with consideration of transformer magnetizing inrush. IEEE Transactions on Power Delivery, 11(1), 68–73. <https://doi.org/10.1109/61.484122>.
- [9] Comité de Relé de Sistema Eléctrico del IEEE. (2010). IEEE C37.110-2007: Manual de aplicación de transformadores de corriente para fines de relé protector. Asociación de Normas IEEE. <https://doi.org/10.1109/IEEESTD.2007.4286567>.
- [10] Yalla, R., & Kishore, V. V. (2009). False tripping of transformer differential relay due to CT saturation and mitigation techniques. Electric Power Systems Research, 79(3), 507–512 <https://doi.org/10.1016/j.epsr.2008.07.002>.
- [11] Comisión Electrotécnica Internacional. (2012). IEC 61869-2: Transformadores de instrumentos – Parte 2: Requisitos adicionales para transformadores de corriente.
- [12] Horowitz, S. H., & Phadke, A. G. (2014). Power System Relaying (4th ed.). Wiley.
- [13] Schweitzer Engineering Laboratories. (2018). SEL-387 Transformer Protection Relay – Instruction Manual. SEL Inc. IEEE Power System Relaying Committee. (2004).
- [14] IEEE Guide for the Application of Transformer Differential Protection. IEEE.

- [15] IEC Technical Committee 38. (2010). Instrument Transformers – Application Guide. IEC. Kang, Y. C., Park, J. K., & Kang, S. H. (2001).
- [16] Development of a new differential protection algorithm for power transformers. IEEE Transactions on Power Delivery, 16(2), 292–297. <https://doi.org/10.1109/61.915497>
- [17] Wiszniewski, A., Rebizant, W., & Schiel, L. (2008). Advanced protection of power transformers. Springer.
- [18] Phadke, A. G., & Thorp, J. S. (2008). Synchronized phasor measurements and their applications. Springer.
- [19] Eissa, M. M. (2010). A novel digital directional transformer differential relay based on wavelet transformation. IEEE Transactions on Power Delivery, 25(4), 2390–2397. <https://doi.org/10.1109/TPWRD.2010.2050898>.
- [20] Kezunovic, M., Ledesma, J. J., & McKenna, S. M. (1995). Impact of CT saturation on protective relays. IEEE Transactions on Power Delivery, 10(3), 1228–1236. <https://doi.org/10.1109/61.400874>

Anexo 3. Paso 10: Agregamos las señales binarias.

Configuración del hardware global

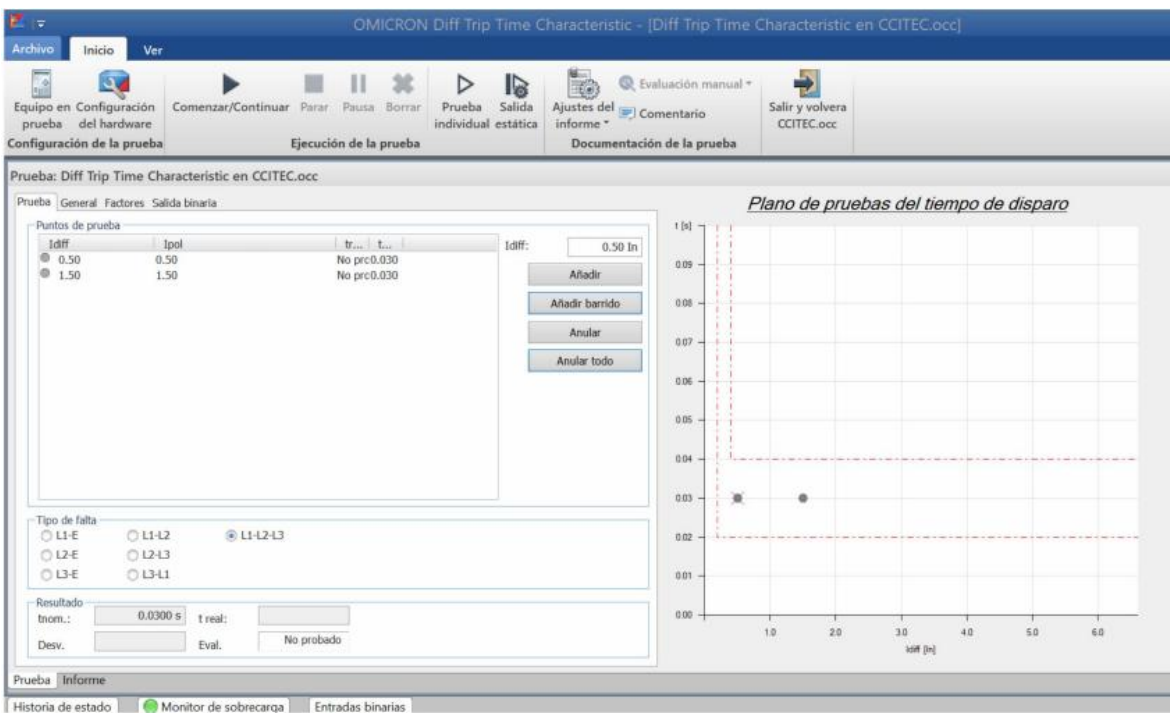
General Salidas analógicas Entradas binarias / analógicas Salidas binarias Entradas analógicas CC. Referencia horaria

CMC356

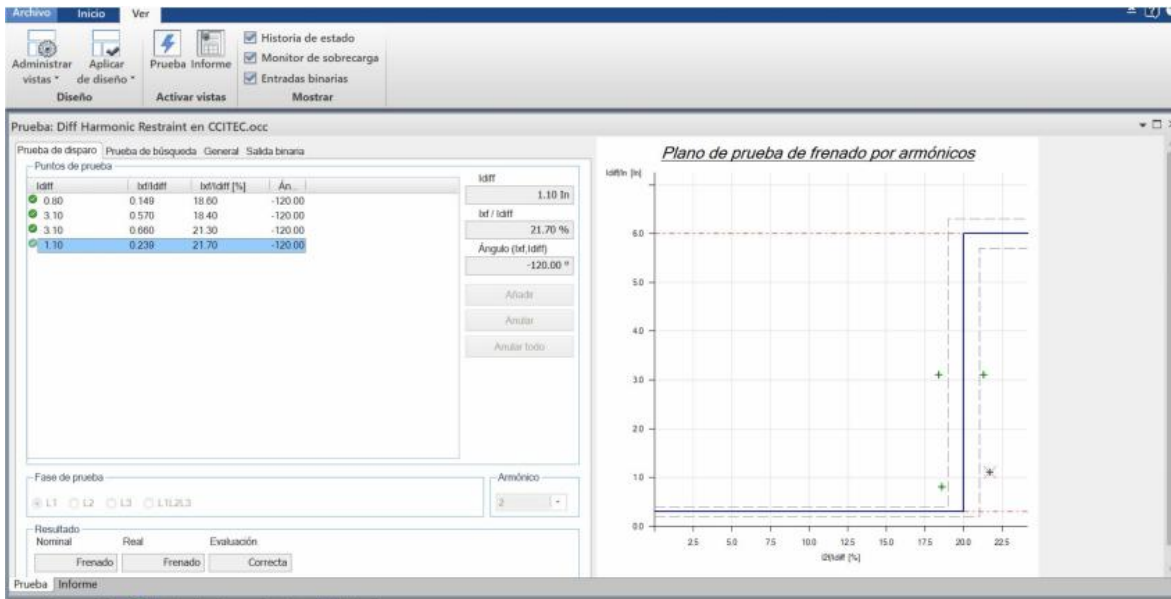
Función	Binario	Binario	Binario	Binario	Binario	Binario	Binario	Binario	Binario										
Libre de potencial	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>										
Tensión nominal	110 V																		
Relación de las pinzas de corriente																			
Tensión de umbral	77 V																		
Etiqueta	Terminal de conexión	1+	1-	2+	2-	3+	3-	4+	4-	5+	5-	6+	6-	7+	7-	8+	8-	9+	9-
TRIP		X																	

Report... Aceptar Cancelar Aplicar Ayuda

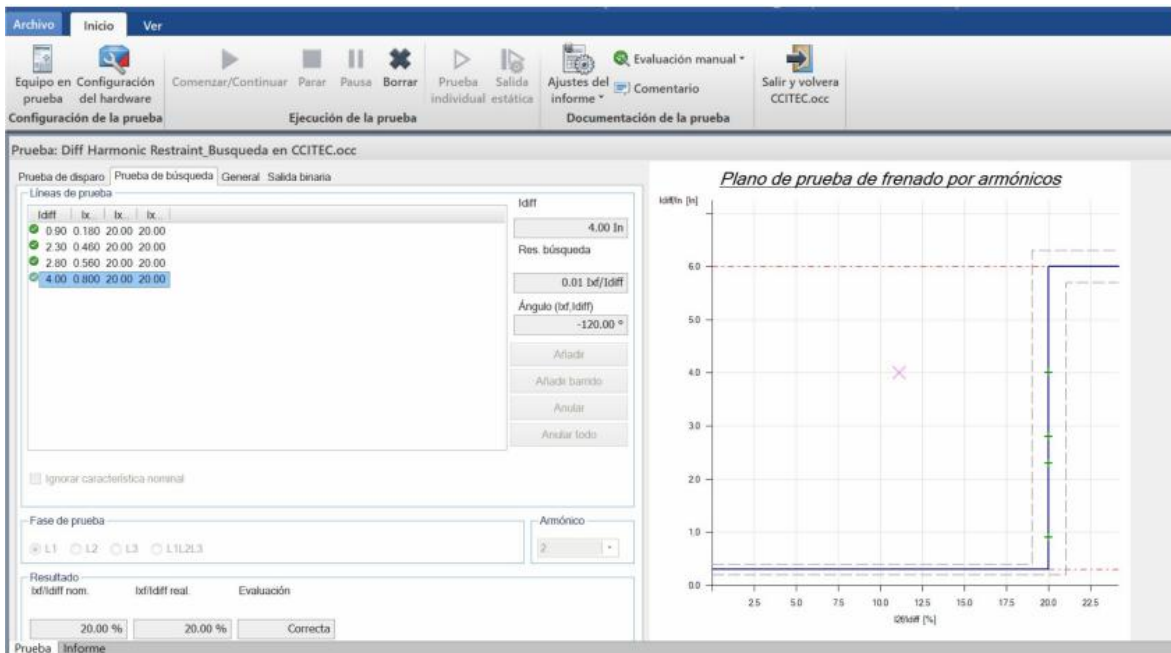
Anexo 4. Evaluación del tiempo de Disparo con el módulo Diff Trip Characteristic.



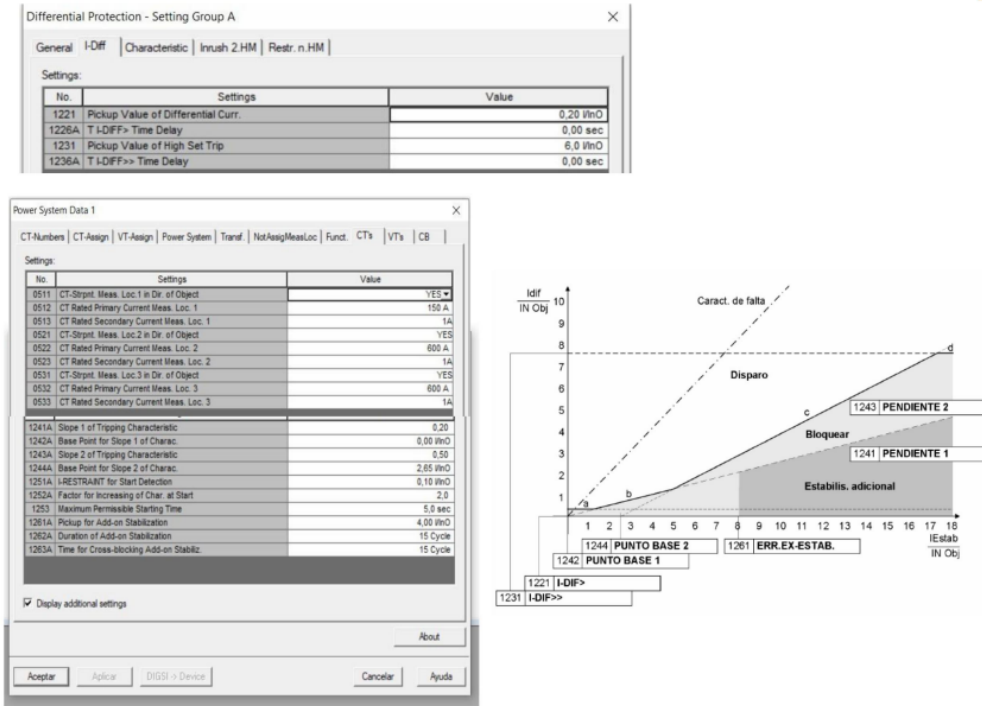
Anexo 5. Probamos los armónicos con el módulo Diff Harmonic Restraint - Prueba de Disparo.



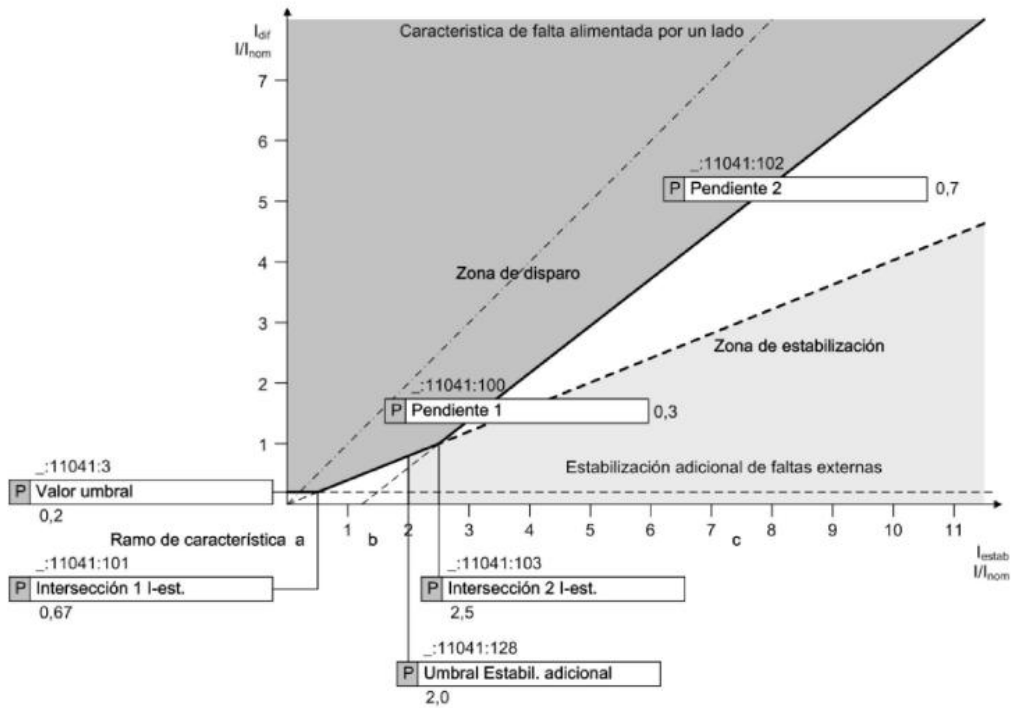
Anexo 6. Probamos los armónicos con el módulo Diff Harmonic Restraint - Prueba de Búsqueda.



Anexo 7. 7UT87 SP4 – SIEMENS.



Anexo 8. Valores por defecto de los relés Siemens.



Anexo 9. Cálculo de corriente resultante de suministro de energía.

CALCULO DE VALORES PARA AJUSTE

a) Cálculo de los transformadores de corriente en alta (HV) y baja tensión (LV):

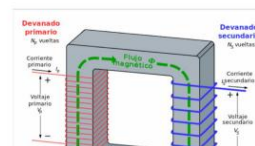
$$I_p = \frac{S}{\sqrt{3} \times V \times 0.9} \quad e \quad I_s = 1 A$$



I_p -primario [A]
 I_s -secundario [A]

	TC lado de alta tensión HV	TC lado de baja tensión LV
	139.46	3207.50
	1	1

Datos del transformador	
Potencia (MVA)	50
Voltaje HV (kV)	230
Voltaje LV (kV)	10
Cambiador de tomas	2 X +/- 2.5%
Voltaje máx HV (kV)	241.5
Voltaje mín HV (kV)	218.5
Intensidad nominal HV (kA)	0.126
Intensidad nominal LV (kA)	2.887
Intensidad máx HV (kA)	0.132
Intensidad mín HV (kA)	0.120
Grupo de Conexión	YNd5



Anexo 10. Cálculo de corriente resultante de suministro de energía.

CALCULO DE VALORES PARA AJUSTE

b) Cálculo de valor de corrección considerando el cambiador de tomas k_{ConnT}

$$k_{ConnT} = \frac{(100\% + ConnTmax) - (100\% + ConnTmin)}{(100\% + ConnTmax) + (100\% + ConnTmin)}$$

$$k_{ConnT} = \frac{(100\% + 5\%) - (100\% - 5\%)}{(100\% + 5\%) + (100\% - 5\%)} = 0.05$$

Valor Umbral Nueva: $0.2 I/Inom.Obj + 0.05 I/Inom.Obj = 0.25 I/Inom.Obj$

c) Cálculo de Pendiente 1 (Intersección $0.67 I/Inom.Obj$)-----Es recomendable un reajuste.

$$Intersección 1 = \frac{Valor Umbral Nueva}{2.4 * k_{ConnT}}$$

$$Intersección 1 = \frac{0.25 I/Inom.Obj}{2.4 * 0.05} = 2.083 I/Inom.Obj$$

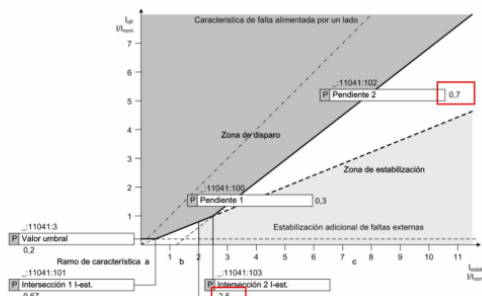
Valor por defecto 0.3 Relé SIEMENS
Pendiente 1 (Nuevo) = Pendiente 1 + 1.2 * (k_{ConnT})
Pendiente 1 (Nuevo) = 0.3 + 1.2 * (0.05) = 0.36

Anexo 11. Cálculo de corriente resultante de suministro de energía.

Cálculo de Valores para Ajuste

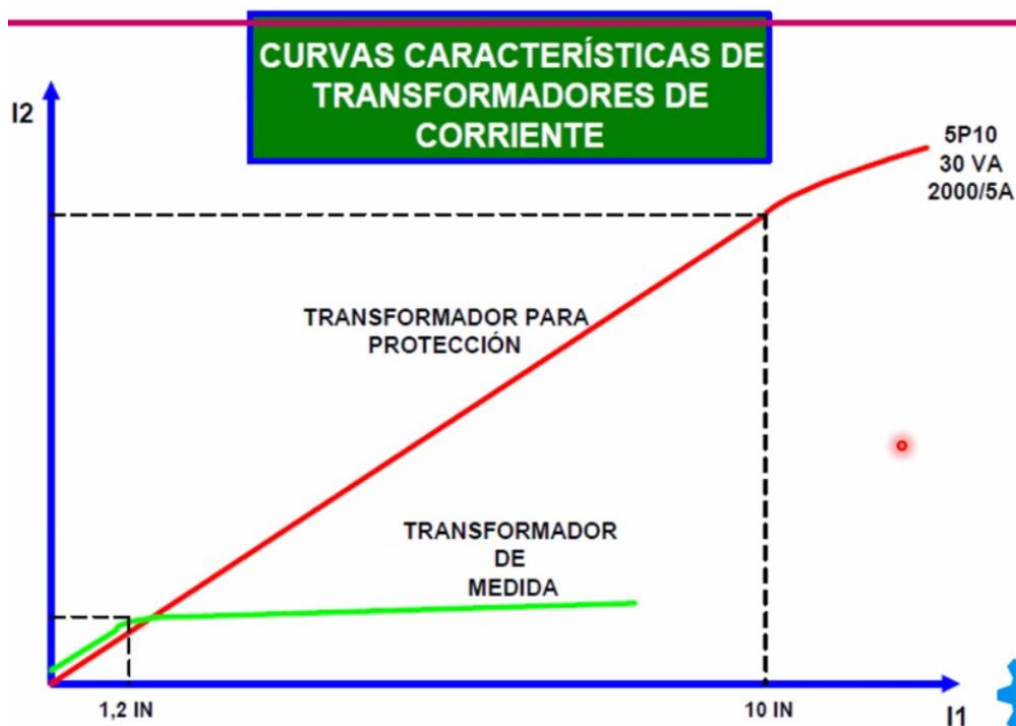
d) Cálculo de Pendiente 2

La pendiente 2 no es necesario un reajuste, solo se considera lo que indica el manual, ya está considerado el Valor que considera fallas de alta intensidad.

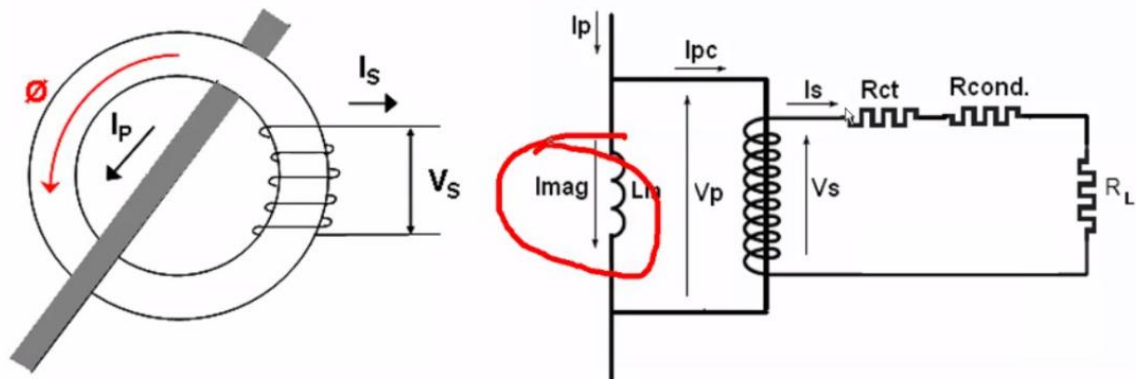


- Intersección 2 por defecto: $2.5 I/I_{nom}. Obj$
- Pendiente 2 por defecto: 0.7

Anexo 12. Representación gráfica de la curva según su Clase de precisión y Factor de sobre corriente.



Anexo 13. Funcionamiento del TC



• Esquema equivalente de un TC.

Hablando: Carlos Manuel Cern...

Particularidades del TC:

- El arrollamiento primario está conectado en serie con la red \Rightarrow su corriente no depende de la carga secundaria.
- No está sometido a una tensión constante, ésta varía permanentemente con las variaciones de la I primaria \Rightarrow para grandes magnitudes de corriente, y según la impedancia secundaria, el núcleo puede saturarse.

Anexo 14. Comportamiento de los niveles que entrando a saturación del TC.

Funcionamiento de los TC

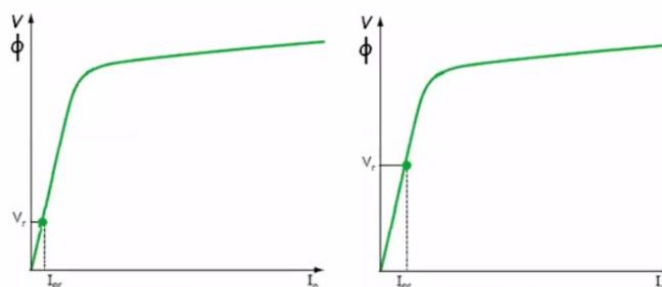


Figura 1

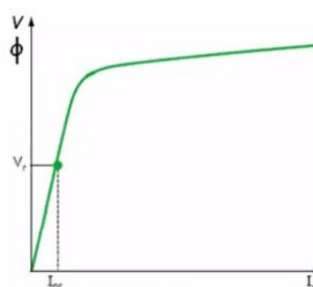


Figura 2

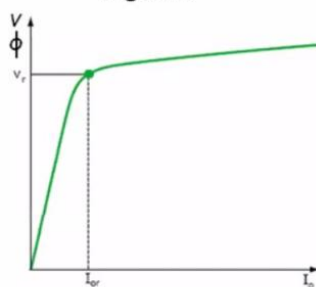


Figura 3

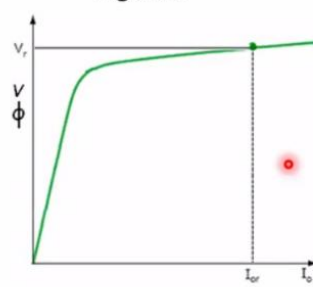


Figura 4

- Fig 1: I_p pequeña
- \Rightarrow TC trabaja en la parte baja de la curva de magnetización.
- Fig 2: I_p aumenta
- \Rightarrow TC trabaja en la parte intermedia de la curva de magnetización.
- Fig 3: I_p continúa aumentando \Rightarrow TC puede llegar a punto de saturación.
- Fig 4: I_p continúa aumentando \Rightarrow TC trabaja en la región de saturación \Rightarrow Alta corriente de magnetización

