



UNIVERSIDAD TÉCNICA DEL NORTE
FACULTAD DE INGENIERÍA EN CIENCIAS
APLICADAS

CARRERA DE ELECTRICIDAD

TEMA:

“Análisis de funcionamiento de la protección diferencial 87 en transformadores de distribución monofásicos con ATP”

Trabajo de Grado previo a la obtención del título de Ingeniero Eléctrico

Línea de investigación: Producción industrial y tecnología sostenible

AUTOR (A):

Diego Vicente Sarzosa Mafla

DIRECTOR (A):

Msc. Jhonny Javier Barzola Iza

Ibarra - Ecuador 2025



UNIVERSIDAD TÉCNICA DEL NORTE

Acreditada Resolución Nro. 173-SE-33-
CACES-2020

FACULTAD DE INGENIERÍA EN CIENCIAS APLICADAS



UNIVERSIDAD TÉCNICA DEL NORTE BIBLIOTECA UNIVERSITARIA

AUTORIZACIÓN DE USO Y PUBLICACIÓN A FAVOR DE LA UNIVERSIDAD TÉCNICA DEL NORTE

1. IDENTIFICACIÓN DE LA OBRA

En cumplimiento del Art. 144 de la Ley de Educación Superior, hago la entrega del presente trabajo a la Universidad Técnica del Norte para que sea publicado en el Repositorio Digital Institucional, para lo cual pongo a disposición la siguiente información:

DATOS DE CONTACTO		
CÉDULA DE IDENTIDAD:	1750426197	
APELLIDOS Y NOMBRES:	Sarzosam Mafía Diego Vicente	
DIRECCIÓN:	Ibarra La Victoria	
EMAIL:	dvsarzosam@utn.edu.ec	
TELÉFONO FIJO:	TELÉFONO MÓVIL:	0990554173

DATOS DE LA OBRA	
TÍTULO:	Análisis de funcionamiento de la protección diferencial 87 en transformadores de distribución monofásicos con ATP.
AUTOR (ES):	Sarzosam Mafía Diego Vicente
FECHA: DD/MM/AAAA	04/09/2025
SOLO PARA TRABAJOS DE GRADO	
PROGRAMA:	<input checked="" type="checkbox"/> PREGRADO <input type="checkbox"/> POSGRADO
TÍTULO POR EL QUE OPTA:	Ingeniero Eléctrico
ASESOR /DIRECTOR:	Msc. Jhonny Javier Barzola Iza

2. CONSTANCIAS

El autor (es) manifiesta (n) que la obra objeto de la presente autorización es original y se la desarrolló, sin violar derechos de autor de terceros, por lo tanto, la obra es original y que es (son) el (los) titular (es) de los derechos patrimoniales, por lo que asume (n) la responsabilidad sobre el contenido de la misma y saldrá (n) en defensa de la Universidad en caso de reclamación por parte de terceros.

Ibarra, a los 4 días del mes de septiembre de 2025

EL AUTOR:

(Firma).....
Nombre: Sarzosam Mafía Diego Vicente



UNIVERSIDAD TÉCNICA DEL NORTE

Acreditada Resolución Nro. 173-SE-33-
CACES-2020

**FACULTAD DE INGENIERÍA EN CIENCIAS
APLICADAS**



UNIVERSIDAD TÉCNICA DEL NORTE

Acreditada Resolución Nro. 173-SE-33-
CACES-2020

**FACULTAD DE INGENIERÍA EN CIENCIAS
APLICADAS**



**CERTIFICADO DEL DIRECTOR DE TRABAJO DE INTEGRACIÓN
CURRICULAR**

Yo, Jhonny Javier Barzola Iza en calidad de director del señor estudiante Sarzosa Mafla Diego Vicente certifico que ha culminado con las normas establecidas en la elaboración del Trabajo de Integración Curricular con el tema: Análisis de funcionamiento de la protección diferencial 87 en transformadores de distribución monofásicos con ATP.

Para la obtención del título de Ingeniero(a) Eléctrico(a), aprobado la defensa, impresión y empastado.

Jhonny Javier Barzola Iza

DIRECTOR DE TRABAJO DE INTEGRACIÓN CURRICULAR



UNIVERSIDAD TÉCNICA DEL NORTE

Acreditada Resolución Nro. 173-SE-33-
CACES-2020



**FACULTAD DE INGENIERÍA EN CIENCIAS
APLICADAS**

DEDICATORIA

Dedico con todo el corazón mi tesis a mis padres, pues sin ellos no lo habría logrado. Las bendiciones diarias a lo largo de mi carrera universitaria me protegieron y me llevaron por el camino de poder concluir esta meta. Por eso les entrego mi trabajo en ofrenda por la paciencia, y espera. Terminar este proyecto no hubiera sido posible sin el apoyo de mi tutor quien con paciencia me motivo a realizar mi trabajo con sus conocimientos.



UNIVERSIDAD TÉCNICA DEL NORTE

Acreditada Resolución Nro. 173-SE-33-
CACES-2020

**FACULTAD DE INGENIERÍA EN CIENCIAS
APLICADAS**



AGRADECIMIENTO

Expreso mi mayor agradecimiento a mi director de titulación Ing. Jhonny Barzola y asesor de tesis al Ing. Hernán Pérez su experiencia, comprensión y paciencia contribuyeron a mi experiencia en el complejo y gratificante camino de la investigación e implementación de este trabajo. Su guía constante y el refuerzo de mis habilidades me han motivado a alcanzar esta meta. No existen palabras para poder expresar mi gratitud por su inmenso apoyo durante este viaje.

Gracias infinitas a mis padres, por su amor incondicional y su apoyo moral. Su fe en mí, incluso en los momentos más difíciles, ha sido el pilar de este logro. También expreso mi gratitud a mi hermano, esposa quienes supieron brindarme su tiempo para escucharme y apoyarme, y a mis tías, quienes supieron estar cuando más los necesitaba. Sin ustedes, todo esto no habría sido posible. Su amor y sacrificio han sido la luz que guio mi camino a través de este viaje académico.



UNIVERSIDAD TÉCNICA DEL NORTE

Acreditada Resolución Nro. 173-SE-33-
CACES-2020



FACULTAD DE INGENIERÍA EN CIENCIAS APLICADAS

INDICE DE CONTENIDOS

INDICE DE CONTENIDOS	6
INDICE DE FIGURAS.....	12
INDICE DE TABLAS	14
RESUMEN	15
ABSTRACT.....	16
CAPITULO I	17
INTRODUCCIÓN	17
1.1. Problema de investigación.	17
1.2. Objetivos.....	18
1.2.1. Objetivo General.....	18
1.2.2. Objetivos Específicos.....	18
1.3. Alcance y delimitación	18
1.4. Justificación	19
CAPÍTULO II.....	21
MARCO TEÓRICO.....	21
2.1. Transformadores	21
2.1.1. Funcionamiento del transformador	22
2.1.2. Fallas en transformadores	23
2.1.3. Protecciones en transformadores de potencia	24



UNIVERSIDAD TÉCNICA DEL NORTE

Acreditada Resolución Nro. 173-SE-33-
CACES-2020



FACULTAD DE INGENIERÍA EN CIENCIAS APLICADAS

2.1.4.	Transformador de corriente.....	25
2.1.5.	Daños en transformadores.....	25
2.2.	Sistemas de protecciones eléctricas	26
2.2.1.	Sistemas de protección diferencial.....	26
2.2.2.	Protección diferencial 87 en transformadores monofásicos	28
2.2.3.	Funcionamiento de la protección diferencial 87	29
CAPÍTULO III.....		30
MATERIALES Y METODOS		30
3.1.	Métodos usados en el proyecto	30
3.1.1.	Tipo de investigación	31
3.1.2.	Diseño de investigación	32
3.1.3.	Metodología del proyecto	32
3.1.4.	Capacidad de muestreo específico.....	34
3.1.5.	Método de uso de la protección 87.	34
3.1.6.	Medición de Corriente	35
3.1.7.	Método de deflexión	35
3.2.	Materiales.....	36
3.2.1.	Protección diferencial 87T.....	36
3.2.2.	Transformador.....	37
3.2.3.	Esp-32	37
3.2.4.	Sensor SCT-013	37



UNIVERSIDAD TÉCNICA DEL NORTE

Acreditada Resolución Nro. 173-SE-33-
CACES-2020



FACULTAD DE INGENIERÍA EN CIENCIAS APLICADAS

3.2.5.	Dimmer controlador de potencia	38
3.2.6.	Resistencias	38
3.2.7.	Voltímetro Ac 0 – 500V	38
3.2.8.	Amperímetro Ac 0 – 200A	38
3.2.9.	Software	39
3.3.	Diseño del módulo experimental	40
3.3.1.	Descripción general	42
3.4.	Diseño del módulo	42
3.4.1.	Aplicación Solid State Protective Relay	43
3.4.2.	Entradas múltiples	44
3.4.3.	Adaptación de las Entradas	44
3.4.4.	Etapa de alimentación	46
3.4.5.	Conversión analógica/digital	46
3.4.6.	Funcionamiento de la protección diferencial	47
CAPITULO IV		60
RESULTADOS Y ANÁLISIS		60
4.1.	Modelamiento de Relé 87T en transformador monofásico	61
4.1.1.	Simulación del relé 87	67
4.1.2.	Test Procedus – General	77
4.1.3.	Pruebas de verificación	78
4.1.4.	Planeación de la medición de corriente y voltaje	87



UNIVERSIDAD TÉCNICA DEL NORTE

Acreditada Resolución Nro. 173-SE-33-
CACES-2020



FACULTAD DE INGENIERÍA EN CIENCIAS APLICADAS

4.2.	Construcción de la estructura.....	88
4.2.1.	Ubicación de los componentes en la estructura.	89
4.2.2.	Ubicación de las protecciones.....	90
4.2.3.	Conexión interna del modulo.....	90
4.3.	Resultados	92
	Conclusiones	98
	Recomendaciones	99
	Anexos	103
	Anexo A – Marca para perforación de componentes módulo BE1 87T.....	103
	Anexo B – Ubicación de componentes módulo BE1 87T parte frontal	104
	Anexo C – Medición de resistencia 13.5 Ohmios.....	105
	Anexo D – Vista lateral izquierda gabinete BE1-87.....	106
	Anexo E – Vista posterior ubicación componentes de proteccion magnenotermico	106
	Anexo F – Medición resistencia conectada 12.3 Ohmios.....	107
	Anexo G – Ubicación componentes vista trasera placa frontal modulo BE1- 87 .	108
	Anexo H – Ubicación de todos los componentes vista lateral derecha	108
	Anexo I – Ubicación de todos los componentes vista trasera.....	109
	Anexo J – Ubicación del cableado conectado al módulo BE1-87.....	109
	Anexo K – Ubicación de borneras tipo banana, luces piloto, dimmer	110
	Anexo L – Ubicación del cableado conectado voltímetro, amperímetro, dimmer	111



UNIVERSIDAD TÉCNICA DEL NORTE

Acreditada Resolución Nro. 173-SE-33-
CACES-2020



FACULTAD DE INGENIERÍA EN CIENCIAS APLICADAS

Anexo M – Ubicación borneras magnetotérmicos de resistencias, relé 87	112
Anexo N – Vista frontal modulo encajado en su estructura de almacenamiento ..	113
Anexo Ñ – Ubicación de las luces piloto con bocina placa frontal	114
Anexo O – Ubicación de todas las borneras en la placa frontal modulo BE1-87..	114
Anexo P – Construcción gabinete en donde se alojarán todos los componentes del modulo	115
Anexo Q – Soldadura del gabinete en donde se alojará los componentes del modulo	116
Anexo R – Tabla 1-1 múltiplos del Tap Manual de usuario BE1-87	117
Anexo S – Tabla 5-5 Tiempo Manual de usuario BE1-87.....	117
Anexo T – Tabla 5-4 Verificacion de recogida sin retención Manual de usuario BE1-87.....	117
Anexo U – Tabla 5-1 Prueba de recogida con retención Manual de usuario BE1-87.....	118
Anexo V – Figura 2-2 Ubicación de controles e indicadores 1 fase del Manual de Usuario BE1-87	119
Anexo W – Figura 5-1 Ubicación de la placa extensora del Manual de Usuario BE1-87.....	120
Anexo X – Figura 5-2 Tabla de conexiones de entradas y salidas del Manual de Usuario BE1-87	120
Anexo Y – Figura 4-8 Los puentes de puesta a tierra de entrada no utilizados del Manual de Usuario BE1-87	121
Anexo Z – Figura 1-2 Tiempos de respuesta Manual de Usuario BE1-87.....	122



UNIVERSIDAD TÉCNICA DEL NORTE

Acreditada Resolución Nro. 173-SE-33-
CACES-2020



FACULTAD DE INGENIERÍA EN CIENCIAS APLICADAS

Anexo AA – Figura 4-2 Terminales del modulo una fase del Manual de Usuario BE1-87.....	123
Anexo AB – Diagrama de conexiones Modulo BE1-87.....	123
Cronograma de actividades.....	124



INDICE DE FIGURAS

Figura 1. <i>Diagrama de Bloques del Desarrollo del Proyecto</i>	33
Figura 2. <i>Estructura del módulo</i>	41
Figura 3. <i>Señal analógica a y señal muestreada</i>	47
Figura 4. <i>Pendiente Característica de Operación</i>	54
Figura 5. <i>Tiempo de respuesta sin restricciones</i>	57
Figura 6. <i>Corriente de trabajo en múltiplos de pickup.</i>	58
Figura 7. <i>Modelo relé 87 Atpdraw</i>	61
Figura 8. <i>Cuadro de parámetros de la prueba y su simbología atp</i>	63
Figura 9. <i>Conexión del transformador</i>	65
Figura 10. <i>Simulación Atp</i>	68
Figura 11. <i>TC Lado primario</i>	68
Figura 12. <i>TC Lado secundario</i>	69
Figura 13. <i>Parámetros de diferencia de corriente del relé</i>	70
Figura 14. <i>Parámetros de prueba del relé no operativo</i>	71
Figura 15. <i>Medidor de corriente entre nodos</i>	72
Figura 16. <i>Motor de grafico PlotXY</i>	72
Figura 17. <i>Señal de corriente PlotXY</i>	73
Figura 18. <i>Señal de corriente que pasa por el relé</i>	74
Figura 19. <i>Comparación de corrientes de los TC y el relé</i>	75
Figura 20. <i>Corrientes del relé</i>	75



UNIVERSIDAD TÉCNICA DEL NORTE

Acreditada Resolución Nro. 173-SE-33-
CACES-2020



FACULTAD DE INGENIERÍA EN CIENCIAS APLICADAS

Figura 21. <i>Sistema sin fallas</i>	76
Figura 22. <i>Estructura del modulo</i>	88
Figura 23. <i>Ubicación de los componentes</i>	89
Figura 24. <i>Conexión de Protecciones del Sistema</i>	90
Figura 25. <i>Conexión interna del módulo BE1-87T</i>	91
Figura 26. <i>Parte frontal del módulo BE1-87T</i>	92
Figura 27. <i>Curva Restrained (1 Entrada) - Pickup 14.8A</i>	95
Figura 28. <i>Curva Restrained (2 Entradas) - Pickup @ 19.8A</i>	96



INDICE DE TABLAS

Tabla 1. <i>Métodos de medición de corriente mencionados</i>	35
Tabla 2. <i>Especificaciones BE1-87T</i>	51
Tabla 3. <i>Múltiples del TAP</i>	55
Tabla 4. <i>Especificaciones de la fuente de alimentación</i>	56
Tabla 5. <i>Atributos de la fuente AC</i>	61
Tabla 6. <i>Atributos del Tswitch</i>	62
Tabla 7. <i>Atributos del Trafo I</i>	63
Tabla 8. <i>Atributos del Transformador saturable</i>	64
Tabla 9. <i>Atributos de la componente RLC</i>	66
Tabla 10. <i>Atributos de la componente Resistencia</i>	67
Tabla 11. <i>Parámetros de diferencia de corriente del relé</i>	69
Tabla 12. <i>Restraint pickup test</i>	81
Tabla 13. <i>Verificación de entrada</i>	83
Tabla 14. <i>Verificación de entrada</i>	84
Tabla 15. <i>Tiempo: 5 A, 50 o 60 Hz</i>	86



UNIVERSIDAD TÉCNICA DEL NORTE

Acreditada Resolución Nro. 173-SE-33-
CACES-2020



FACULTAD DE INGENIERÍA EN CIENCIAS APLICADAS

RESUMEN

En este trabajo se hizo la construcción de un modelo didáctico que permite valorar cómo trabaja la protección diferencial 87. Para esto se usan varios parámetros como la corriente mínima para funcionar, la corriente para iniciar o la pendiente para trabajar; junto con los números tomados como la corriente en el primario y secundario, se puede saber el valor correcto de la corriente diferencial. Esto ayuda a emular la función de protección diferencial 87 como el valor porcentual.

Para hacer lo que se dijo antes, se usó un grupo de resistencias grandes que tenían mucha potencia, divididas en tres formas: 600 vatios, 750 vatios y 1500 vatios, conectadas a un relé para cuidar contra fallas 87. Este relé también está unido a dos dimmers de 4000 vatios cada uno, lo cual deja controlar bien la carga y hacer como si fueran diferentes maneras de trabajar.

Palabras clave: Relé, unrestrained, restrained, pick up, tap, ATP, level



UNIVERSIDAD TÉCNICA DEL NORTE

Acreditada Resolución Nro. 173-SE-33-
CACES-2020



**FACULTAD DE INGENIERÍA EN CIENCIAS
APLICADAS**

ABSTRACT

This work involved the development of a didactic model designed to evaluate the operation of differential protection (87). Key parameters such as minimum operating current, pickup current, and slope characteristic are utilized. By comparing the measured primary and secondary currents, the correct value of the differential current can be determined. This enables the emulation of the percentage differential protection function (87).

To achieve this, an array of high-power resistors rated at 600 watts, 750 watts, and 1500 watts was employed. These resistors were connected to a protective relay (87) to safeguard against faults. The relay is also interfaced with two 4000W dimmers each, allowing precise load control and simulation of diverse operating conditions.

Keywords: Relé, unrestrained, restrained, pick up, tap, ATP, level



UNIVERSIDAD TÉCNICA DEL NORTE

Acreditada Resolución Nro. 173-SE-33-
CACES-2020



**FACULTAD DE INGENIERÍA EN CIENCIAS
APLICADAS**

CAPITULO I

INTRODUCCIÓN

Análisis de funcionamiento de la protección diferencial 87 en transformadores de distribución monofásicos con ATP.

1.1. Problema de investigación.

Es posible identificar diversas etapas consecutivas las cuales permiten transportar la electricidad de un punto hacia otro dentro de los sistemas eléctricos de potencia, estas son la transmisión, generación, y distribución. En las fases de transmisión eléctrica se identifican varios componentes que integran la operación de la etapa, siendo el más destacado el transformador. Este componentes es una máquina eléctrica que por su principio de operación permite cambiar el nivel de voltaje dependiendo con las necesidades dentro del Sistema Eléctrico de Potencia (SEP). Un transformador consta de dos secciones o bobinas principales: el primario y el secundario. Estos bobinados se distinguen principalmente debido a que el primario está conectado a la fuente de energía, y el secundario se conecta a las cargas.

Por estos motivos, debido a la inesperada situación de fallas es necesario la aplicación de una protección diferencial 87, la cual está encargada de realizar la comparación entre las corrientes de entrada y salida, monitoreando de manera constante la relación dentro del sistema para garantizar un funcionamiento adecuado del elemento, siendo necesario la evaluación del funcionamiento de esta protección, así como la identificación de las zonas de operación, permitiendo comprender el comportamiento del transformador ante la presencia de algún tipo de fallas. En la actualidad se encuentran diferentes situaciones de falla en el sistema eléctrico, y se analizará la respuesta de la protección diferencial ante estas fallas. Los resultados obtenidos permitirán evaluar el desempeño de la protección diferencial en cada situación y proponer posibles mejoras en el sistema de protección en situaciones donde se identifiquen falencias en su funcionamiento.



**FACULTAD DE INGENIERÍA EN CIENCIAS
APLICADAS**

1.2. Objetivos

1.2.1. Objetivo General

Analizar los factores que afectan el funcionamiento de la protección diferencial 87 en transformadores de distribución monofásicos mediante el programa computacional ATP.

1.2.2. Objetivos Específicos

- Describir las corrientes de falla que surgen en transformadores monofásicos.
- Analizar el impacto de los diferentes factores en el funcionamiento de la protección diferencial 87 en transformadores monofásicos de distribución.
- Evaluar la influencia de la configuración de la protección diferencial 87 en transformadores de distribución monofásicos con ATP.

1.3. Alcance y delimitación

La protección de transformadores es fundamental para garantizar la confiabilidad del suministro eléctrico y la seguridad de las persona y los equipos. La protección diferencial 87 es una técnica de protección ampliamente utilizada en transformadores de distribución monofásicos. Esta técnica se basa en la comparación de las corrientes que ingresan y salen del transformador para detectar cualquier falla interna. Emular el comportamiento de la protección diferencial 87 en transformadores de distribución monofásicos utilizando el software de simulación ATP (Alternative Transients Program). Para ello, se llevará a cabo un análisis caracterizando las condiciones de operativas del transformador y se evaluará la eficacia de la protección diferencial 87 en la detección de una falla interna.

Se realizará un módulo en el cual se provocará una falla interna para que se active la protección diferencial 87 en un transformador de distribución monofásico. Se analizarán los principios teóricos de la protección diferencial.



**FACULTAD DE INGENIERÍA EN CIENCIAS
APLICADAS**

Se desarrollará un análisis de la protección 87 en transformadores de distribución monofásicos en ATP, se simulará una falla, para evaluar el desempeño de la protección diferencial 87 en la detección de fallas internas del transformador.

Se simulará el energizado del transformador, para evaluar la capacidad de la protección diferencial 87 para discriminar entre las corrientes de falla y las corrientes de magnetización y se estudiará el impacto de las cargas asimétricas en la protección diferencial 87 por medio del programa ATP.

1.4. Justificación

El trabajo de titulación busca realizar una propuesta metodológica para un análisis de funcionamiento de la protección diferencial 87 en transformadores de distribución monofásicos con ATP. En primer lugar, la ausencia de suministro eléctrico en las zonas urbanas y rurales genera un impacto negativo en la calidad de vida de los usuarios, siendo la interrupción del suministro eléctrico la afectación con más repercusiones hacia la operatividad de los equipos críticos que pueden encontrarse en sitios como hospitales, estaciones de tratamiento de agua y sistemas de refrigeración.

Para poder limitar estas interrupciones, se utilizan herramientas de protección como el relé diferencial para poder detectar la presencia de fallos internos y de esta forma actuar en base a los parámetros ajustados protegiendo los componentes conectados a la red. Este dispositivo puede detectar la presencia de fallos realizando una comparación de señales de corriente, lo cual es útil para prevenir daños en el transformador, debido a que estos generan problemas que requieren intervenciones costosas y pérdidas en la productividad.

Por estas razones, es indispensable tener soluciones eficientes que disminuyan la frecuencia y duración de los cortes de energía en sectores conectados a transformadores de distribución monofásicos. La implementación de técnicas de protección, como la diferencial 87, puede mejorar la detección y prevención de fallos en el transformador y de esta manera disminuir el riesgo de cortes de energía. De igual manera, la implementación de sistemas de



UNIVERSIDAD TÉCNICA DEL NORTE

Acreditada Resolución Nro. 173-SE-33-
CACES-2020



**FACULTAD DE INGENIERÍA EN CIENCIAS
APLICADAS**

monitoreo remoto y mantenimiento preventivo ayudan a identificar y resolver problemas previo a su ocurrencia evitando cortes de energía.



UNIVERSIDAD TÉCNICA DEL NORTE

Acreditada Resolución Nro. 173-SE-33-
CACES-2020



FACULTAD DE INGENIERÍA EN CIENCIAS APLICADAS

CAPÍTULO II

MARCO TEÓRICO

2.1. Transformadores

Según [1] “Un transformador es un sistema eléctrico basado en los principios de la inducción electromagnética la cual permite transferir el voltaje o corriente sin cambiar su frecuencia, por lo que, este dispositivo permite aumentar o disminuir la corriente alterna”. De igual manera, en [2] se afirma lo siguiente: Los transformadores son dispositivos electromagnéticos que se utilizan en diversas etapas de los Sistemas Eléctricos de Potencia. Su aplicación principal está en las fases de distribución y transmisión de energía eléctrica, donde se los utiliza para ajustar los niveles de tensión de acuerdo con las características requeridas.

Un transformador puede ser utilizado para reducir o elevar la tensión, de acuerdo con la necesidad que se requiera en el sistema. Un transformador elevador tiene su lado primario conectado a una baja tensión (B.T), mientras que un transformador reductor tiene su lado primario conectado a una alta tensión (A.T). Cabe mencionar que este equipo se considera como una máquina reversible, es decir que puede funcionar para ambas aplicaciones de acuerdo a la alimentación eléctrica a la que está sometido.

Debido a que estos equipos son importantes dentro de sistemas eléctricos de potencia, se hace indispensable aplicar mecanismos que permitan la salvaguardar la integridad de las cargas y mantener un funcionamiento confiable. Una de los elementos de protección que más se utiliza es una protección diferencial 87, la cual se diseñó específicamente para aislar y detectar fallas internas en transformadores. Esta protección está basada en la comparación de las corrientes de salida y entrada del equipo, identificando de manera precisa cualquier desequilibrio causado por una falla interna. El análisis del funcionamiento de la protección diferencial 87 en transformadores de distribución monofásicos es importante para asegurar la operación confiable y segura de estos equipos críticos dentro de los sistemas eléctricos.



2.1.1. Funcionamiento del transformador

Bajo condiciones nominales de operación, las corrientes de salida y entrada del transformados se encuentran equilibradas. Sin embargo, cuando ocurre una falla al interior de este, tal como lo es el cortocircuito en los devanados secundario y primario o una falla en el aislamiento, se produce el desbalance de corrientes. Esto se puede detectar a través de la protección diferencial 87, la cual está diseñada para monitorear de forma continua la relación entre estas corrientes.

De acuerdo con lo mencionado por [3], cuando se presenta una de estas fallas, la corriente alcanza un valor elevado, lo cual produce daños dentro del transformador cuando esto se presentan por un tiempo prolongado. La protección diferencial 87 posee la capacidad de determinar estas fallas de manera inmediata enviando un señal de disparo al interruptor de potencia asignado, aislando al transformador del sistema y precautelando que estas falla no se distribuyan hacia otros componentes.

De igual manera, este elemento tiene la capacidad de diferenciar entre condiciones operativas normales y ciertos eventos transitorios como lo es las corrientes de magnetización durante la energización del transformador. Estas corrientes transitorias puede causar desequilibrios de corta duración no deben ser detectados como fallas, por lo que la protección diferencial se debe configurar adecuadamente para prevenir disparos innecesarios.

El análisis del funcionamiento de la protección diferencial 87 en este tipo de sistemas de distribución monofásicos está en comprender cómo la protección responde ante diferentes condiciones de falla interna, la capacidad para detectar y aislar las fallas, y la discriminación de fallas reales y condiciones transitorias normales.



2.1.2. Fallas en transformadores

2.1.2.1. Corrientes de falla

Las corrientes de falla se producen debido a anomalías que se presentan por condiciones desfavorables de operación en el sistema. Estas fallas eléctricas generan condiciones anormales que afecta de forma adversa a los componentes eléctricos. Estas fallas producen un impacto negativo directo a las magnitudes de corriente y voltaje, pudiendo alcanzar niveles demasiado altos, lo cual hace necesaria la implementación de dispositivos de protección.

Cuando se presentan cortocircuitos se generan corrientes de falla que perjudican directamente al sistema. La presencia de estas corrientes altera los parámetros térmicos y electrodinámicos de los componentes, produciendo interrupciones en el suministro eléctrico que producen ciertos daños que pueden ser irreparables si no se detectan a tiempo. Existen diversos tipos de cortocircuitos, de los cuales se presentan a continuación los principales que pueden encontrarse en un SEP:

- Cortocircuito bifásico aislado.
- Cortocircuito trifásico equilibrado.
- Cortocircuito monofásico fase-tierra y fase-neutro.

2.1.2.2. Sobrecorriente

De acuerdo con lo que menciona [4], las sobrecorrientes son eventos adversos que se generan como consecuencia de cortocircuitos o sobrecargas. Estas sobrecorrientes afectan de forma directa al transformador, disminuyendo completa o parcialmente su vida útil. En el caso de las sobrecargas, se refiere a un aumento repentino de la corriente nominal de operación, ocurriendo este aumento no solo en el transformador, sino también en otros elementos de los sistemas de distribución como las líneas de transmisión.

Por lo general, la existencia de una sobrecorriente implica un aumento de hasta seis veces la corriente nominal. Por otro lado, [5] menciona que las sobrecorrientes transitorias,



pueden producir sobrecorrientes continuas debido a componentes en mal estado conectados a la red, múltiples cargas conectadas en un mismo circuito o equipos sobrecargados.

2.1.2.3. Fallas de alta impedancia

Las fallas de alta impedancia, conocidas como High Impedance Faults (HIFs), hacen referencia a contactos eléctricos no deseados entre conductores que están energizados o con objetos cercanos no conductores que poseen una alta impedancia debido a la composición de sus materiales, los cuales pueden permitir el paso de una mínima magnitud de corriente. Entre las características diferenciales de este tipo de fallas está en su naturaleza no lineal, debido a que la corriente está compuesta por diferentes frecuencias armónicas. Esta no linealidad se suele asociar a la presencia de un arco eléctrico en el punto de contacto del cable con tierra o con otro objeto cuando se presenta la falla de alta impedancia [3].

Estas tipo de fallas son complicadas de detectar por medio de equipos de monitorización, ya que se manifiestan como un ligero aumento en la corriente de carga, confundiéndolo con un incremento normal en la carga del sistema. En los dispositivos de protección convencionales, un aumento en la corriente se puede detectar como una falla de alta impedancia o como un aumento en la carga, sin los mecanismos para diferenciarlos con claridad [6].

2.1.3. Protecciones en transformadores de potencia

Los autores de [7], Espinoza y Estupiñán, comentan que el transformador de potencia es un dispositivo utilizado para suministrar energía a equipos de protección y medición mediante una tensión igual a la red a la que están conectados. Es fundamental garantizar la integridad y el funcionamiento seguro del transformador, así como la protección de los componentes conectados a él.



2.1.4. Transformador de corriente

En su trabajo, [8] comentan que el transformador de corriente, también conocido como TC, se utiliza ampliamente para la protección y medición de equipos en sistemas eléctricos. El lado secundario de un transformador de corriente puede tener un rango de corriente de 1 a 5 amperios, y desempeña tareas importantes como la medición, el aislamiento de circuitos para la protección y la transformación de corriente. A su vez, el TC genera una corriente secundaria, conocida como ISTC, que es proporcional a la corriente primaria, por lo que la corriente secundaria es de baja magnitud.

El TC se conecta en serie con el circuito al que se requiere realizar la medición para el lado primario, mientras que en el secundario se conecta con la bobina en serie a los dispositivos de protección y medición que se van a energizar.

Al seleccionar un TC, se debe considerar la corriente que circulará por el lado del secundario y por el relé, siendo este el dispositivo de protección asociado a ese circuito. La selección correcta de este componente garantizará que el equipo de medición y protección funcione de forma adecuada y confiable.

2.1.5. Daños en transformadores

La ocurrencia de fallas en transformadores puede producir diversas afectaciones, destacando a las sobrecargas causadas principalmente por el deterioro del aislamiento debido a sobrecalentamientos en el equipo. Estos sobrecalentamientos reducen la vida útil del transformador, incrementan el riesgo de fallas internas. Otro problema que se asocia a las altas temperaturas en los transformadores es la reducción de la resistencia dieléctrica del líquido aislante que se encuentra en el interior. Los puntos calientes pueden generar burbujas en el dieléctrico, lo que a su vez puede ocasionar desbordamientos o roturas.

Por lo tanto, es indispensable implementar medidas de protección tanto para los transformadores como para todos los componentes del Sistema Eléctrico de Potencia (SEP). Sin un control adecuado, las fallas podrían prolongarse, dando lugar a una serie de problemas. Es por esto que



**FACULTAD DE INGENIERÍA EN CIENCIAS
APLICADAS**

se hace necesario el uso de sistemas de protección que salvaguarden la integridad de los equipos y prevenir daños adicionales [6].

2.2. Sistemas de protecciones eléctricas

Según [7] en su tesis de grado los relés de protección desempeñan un papel fundamental en la protección de equipos como transformadores, líneas eléctricas, barras, entre otros. Estos relés se definen en función del equipo que protegen, la señal de entrada que reciben y los principios de operación que aplican. Dado que los relés de protección se consideran como el núcleo del sistema de protección, estos deben satisfacer con diversas características operativas, tales como:

- **Selectividad:** Capacidad de diferenciar cuando la falla se encuentra en la zona de operación para el relé.
- **Sensibilidad:** Capacidad de operación aunque se presenten fallas mínimas, detectando las anomalías más pequeñas.
- **Velocidad:** Rapidez para responder ante daños en los equipos protegidos.
- **Confiablez:** Garantía de operación efectiva del elemento durante toda su vida útil, asegurando la protección en todo momento.
- **Sencillez:** Diseño y funcionamiento simples del relé, reduciendo la probabilidad de fallas adicionales y garantizando una mayor eficiencia en su desempeño.

2.2.1. Sistemas de protección diferencial

Según el Instituto de Ingenieros Eléctricos y Electrónicos [9], el cortocircuito es una de las fallas que más presencia tienen en los transformadores esta falla ocurre cuando se produce un contacto directo entre las bobinas primaria y secundaria del transformador o entre espiras adyacentes. Esto puede producirse por una falla en el aislamiento o un mal funcionamiento de los componentes internos del transformador. Un cortocircuito genera corrientes demasiado elevadas que pueden dañar las bobinas y otros componentes del transformador.



FACULTAD DE INGENIERÍA EN CIENCIAS
APLICADAS

De acuerdo con un estudio realizado por [10], la sobrecarga se considera como una de las causas de fallas más suscitadas en los transformadores, por lo que el aislamiento en estos equipos resulta importante para evitar cortocircuitos y garantizar una operación segura. Sin embargo, debido al tiempo de uso, este aislamiento puede degradarse por la exposición a altas temperaturas, humedad, contaminación o envejecimiento natural de los componentes. Una falla en el aislamiento produce fugas de corriente, cortocircuitos y disminuye la eficiencia del transformador. De igual manera, según un informe publicado por [11], las fallas en el aislamiento son una de los principales causales de fallos en los transformadores, por lo que su identificación es útil para evitar cortocircuitos y garantizar un funcionamiento seguro

Las principales causante que pueden originar estas fallas son:

- **Envejecimiento del aislamiento:** puede provocar una reducción en las propiedades dieléctricas, lo cual incrementa el riesgo de fallas en el transformador.
- **Sobrecarga:** sucede cuando un transformador se somete a una carga que excede su capacidad nominal. Esto se debe a un mal dimensionamiento de la capacidad del transformador o al incremento de la demanda de energía por mala planificación.
- **Cortocircuitos:** ocurren cuando se presenta un contacto entre las bobinas primaria y secundaria del transformador o entre espiras adyacentes. Este problema surge por fallas en el aislamiento, vibraciones excesivas o daños en los componentes internos del transformador.
- **Fallas en los devanados:** son fallos que se presentan por factores como la fatiga del material, vibraciones, fluctuaciones de voltaje o corrientes demasiado elevadas.
- **Defectos de fabricación:** en algunos casos, las fallas en los transformadores pueden originarse por defectos de fabricación, como errores en el ensamblaje,



**FACULTAD DE INGENIERÍA EN CIENCIAS
APLICADAS**

problemas en la calidad del material utilizado o falta de cumplimiento de los estándares de fabricación.

Cuando se ha conseguido comprender la causa y características de las fallas relacionadas con el transformador, se puede definir las medidas de protección que mejor se adecúen con cada tipo de falla. Esto implica realizar investigaciones con respecto a los diversos tipos de protección que se recomiendan para cada situación específica, siguiendo las normas correspondientes, con el objetivo de seleccionar las protecciones más apropiadas para cada situación [12].

2.2.2. Protección diferencial 87 en transformadores monofásicos

De acuerdo con lo que menciona [3], en los sistemas eléctricos, es indispensable contar con protecciones que aislen secciones de los circuitos en caso de presentarse algún tipo de falla. Por esta razón, se utilizan diversos tipos de protección para cada sección que compone un sistemas eléctricos de potencia (SEP).

El relé o dispositivo utilizado para la protección diferencial tiene ciertas limitaciones, siendo una distancia de separación entre los transformadores de corriente (TC) una de las principales. Este dispositivo no es usado solo en transformadores, si no que se lo usa en otros componentes del sistema eléctrico de potencia, como generadores y líneas de transmisión.

De acuerdo con lo que menciona [3], la protección diferencial es un método que se utiliza para comparar la corriente que pasa por los extremos de un equipo que requiere protección mediante el uso de transformadores de corriente (TCs). En el caso de los transformadores con TAPS (Tensiones y Ángulos de los Puntos de Señal), los TAP1 y TAP2 se utilizan para modificar la corriente secundaria con respecto a unidades de protección, lo cual es útil para compensar la relación de transformación y las fases.

Cuando es el caso de un transformador con una conexión Delta-Estrella, se produce un desfase de 30° en el ángulo de fase. Para corregir esto, se aplica la inyección de un ángulo de



**FACULTAD DE INGENIERÍA EN CIENCIAS
APLICADAS**

compensación, mismo que garantiza que la corriente esté en múltiplos del ajuste aplicado. De esta manera, se logra una comparación real de las corrientes y se garantiza la detección de los desequilibrios o falla. Esta protección diferencial es importante para garantizar el funcionamiento seguro de los equipos eléctricos, evitando daños y menorando los riesgos asociados a las fallas eléctricas.

Por otro lado, [13] menciona en su tesis que en el caso de los transformadores equipados con TAPS (Tensiones y Ángulos de los Puntos de Señal), se emplean los TAP1 y TAP2 para ajustar la corriente secundaria en términos de por unidad en el sistema de protección. Esto es realizado para compensar las diferencias en la relación de transformación de las diversas fases del transformador. Cuando se trata de un equipo configurado en Delta-Estrella, se genera un desfase de 30° en el ángulo de fase entre las mismas. Por este motivo, se inyecta un ángulo corrector que mitigue dicho desfase, garantizando de esta forma que la corriente secundaria se encuentre en múltiplos del ajuste efectuado.

2.2.3. Funcionamiento de la protección diferencial 87

En el trabajo realizado por [4], se indica que el principio de operación de la mayoría de las protecciones diferenciales está basado en la comparación entre la corriente de salida y la corriente de entrada, en una región situada entre dos transformadores de corriente. Si la corriente que ingresa a la zona protegida difiere de la corriente que sale, es un indicador de la presencia de una fuga de corriente lo cual se traduce en la existencia de un defecto. Esto genera la circulación de una corriente definida por medio del relé, lo cual provoca su disparo, mientras que cuando la corriente de salida es igual a la corriente de entrada, no existe flujo de corriente por el relé lo cual lo mantendrá desactivado.

De igual forma, el autor menciona que esta protección es cerrada, lo cual significa que únicamente debe actuar cuando el desequilibrio está en el área protección designada. Si se presenta una falla fuera de esta zona protegida, el relé debe detectar la corriente nula, manteniendo el principio de funcionamiento.



MATERIALES Y METODOS

A continuación, se presentan los materiales y métodos utilizados para el presente estudio. Como desarrollo posterior a los conceptos teóricos, se realiza la selección y todas sus fases de diseño, de un sistema de protecciones eléctricas, haciendo énfasis en la protección diferencial (87), con el objetivo de asegurar la seguridad y eficiencia en la operación de instalaciones eléctricas, protegiendo a los equipos y usuarios frente a fallas y anomalías en la red.

El alcance del presente proyecto tiene un componente de carácter exploratorio, ya que se analizan y comparan diferentes tecnologías y metodologías relacionadas con las protecciones eléctricas, con el objetivo de seleccionar los componentes más adecuados para el sistema de protección diferencial diseñado. De igual manera, se investigaron las normativas y estándares vigentes para garantizar que el sistema cumpla con los requisitos de seguridad y técnicos.

Por otro lado, el proyecto también tiene un componente de investigación descriptiva, ya que implica la medición y recopilación de datos en tiempo real mediante equipos especializados. Estos datos permiten la evaluación del comportamiento del sistema de protección diferencial bajo diferentes condiciones de operación, permitiendo recopilar la información obtenida y realizar análisis estadísticos que comprueben la precisión y desempeño durante su funcionamiento.

3.1. Métodos usados en el proyecto

Dentro de los métodos utilizados en el desarrollo tanto teórico como experimental del proyecto, se aplica el método documental, el cual se relaciona con la revisión de fuentes bibliográficas relacionadas con el tema, que permitan extraer información detallada con respecto al funcionamiento, tipos y configuraciones de las protecciones eléctricas, haciendo



**FACULTAD DE INGENIERÍA EN CIENCIAS
APLICADAS**

énfasis en la protección diferencial tipo 87. En este análisis se incluye la revisión de proyectos previos y normativas relacionadas, lo cual permite establecer una base conceptual para el diseño del sistema.

De igual manera, se emplea el método comparativo para realizar la selección detallada de los componentes necesarios y requisitos del sistema diseñado, incluyendo la evaluación de diferentes opciones de microcontroladores, dispositivos electrónicos y módulos de control, tomando en cuenta factores como precisión, confiabilidad, costos y compatibilidad con los requisitos definidos.

Finalmente, se utiliza el método de simulación, el cual permite el modelamiento y simulación del circuito eléctrico de protección diferencial previo a su implementación física. Esta etapa permite evaluar el comportamiento del sistema en diversas condiciones operativas, identificar posibles fallas y ajustar los parámetros para optimizar su funcionamiento.

3.1.1. Tipo de investigación

Para el presente proyecto se implementó una investigación de tipo experimental, fundamentada en la manipulación controlada de parámetros eléctricos y condiciones de falla, con el objetivo de evaluar y medir en tiempo real la respuesta del sistema de protecciones eléctricas, en particular de la protección diferencial tipo 87. Este enfoque permite la validación de la hipótesis principal, la cual se centra en la eficacia de este elemento en la detección y aislamiento de fallas selectivamente, buscando garantizar la seguridad de los equipos y la continuidad en la operación de la instalación. De igual manera, se efectúa un análisis comparativo basado en los escenarios de operación normal y condiciones de falla simuladas, lo cual facilitó la identificación de comportamientos, optimización de los ajustes del relé diferencial y comprobación del cumplimiento de la normativa técnica aplicable.



3.1.2. Diseño de investigación

En cuanto al diseño de la investigación se considera de tipo experimental cuantitativa debido a que se recopilan los datos del comportamiento de las protecciones eléctricas, como lo es la protección diferencial tipo 87, esto por medio de simulación o por diversas pruebas de funcionamiento a las cuales se somete al sistema, realizando la medición y análisis de las respectivas variables cuantitativas. Dentro de estas variables, se incluyen las corrientes de operación, tiempos de respuesta y niveles de desequilibrio en los circuitos monitoreados, obteniéndolas desde el sistemas de adquisición de datos implementado.

Esta información se organiza y tabula para realizar el procesamiento respectivo, permitiendo la generación de gráficas estadísticas y análisis porcentuales. Con este enfoque se facilita la evaluación del desempeño de la protección implementada, la identificación de patrones de operación y la realización del análisis comparativo entre condiciones normales y de falla, lo cual permite la validación de la eficacia del sistema.

3.1.3. Metodología del proyecto

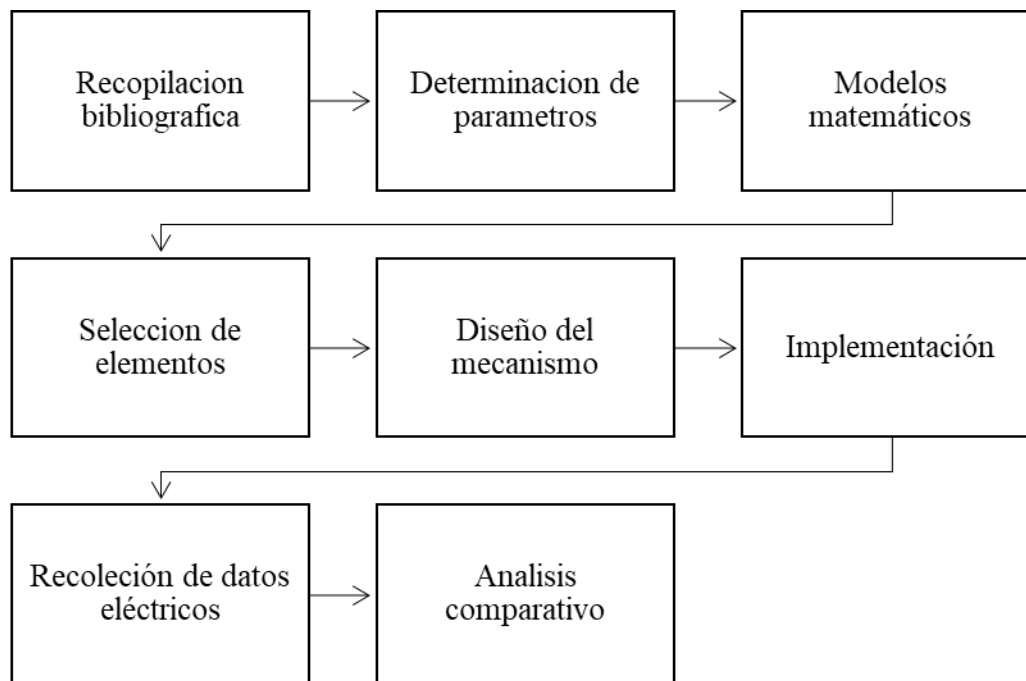
La metodología utilizada para el desarrollo del proyecto se basa en la ejecución de cada uno de los objetivos planteados de manera secuencial, con el fin de determinar las técnicas y procedimientos que permitan ejecutar la investigación.

El proceso que permite ejecutar de manera correcta el presente trabajo se dividen en etapas o bloques que están ordenados de forma secuencial con respecto al objetivo y tema central al que se enfoca la investigación y de los cuales se detallan en la **Figura 1**.

FACULTAD DE INGENIERÍA EN CIENCIAS
APLICADAS

Figura 1.

Diagrama de Bloques del Desarrollo del Proyecto



Nota: Elaboración Propia

En primer lugar, el presente trabajo requiere de la recopilación de investigaciones en artículos, revistas científicas, proyectos de grado y sitios web que puedan contener información importante en relación con las características científicas del estudio, de tal manera que se pueda obtener datos relevantes que se los pueda relacionar con el tema desarrollado.

Los sistemas de protección eléctrica, específicamente la protección diferencial tipo 87, permite detectar y aislar fallas selectivamente en circuitos eléctricos, asegurando la seguridad de los equipos y la continuidad del servicio. Debido a que el planteamiento está en la realización de un análisis comparativo entre sistemas de protección tradicionales y aquellos que integran la protección diferencial 87, se consideran características como la sensibilidad, selectividad, tiempo de respuesta y precisión en la detección de fallas.



**FACULTAD DE INGENIERÍA EN CIENCIAS
APLICADAS**

Para seleccionar los componentes del sistema de protección, es importante considerar requerimientos técnicos como la capacidad de corriente, nivel de aislamiento y la compatibilidad con los dispositivos de medición y control. De igual manera, se evaluaron las medidas físicas y ciertas características de instalación para garantizar que los componentes estén integrados de forma adecuada en el sistema eléctrico. Se analizó una lista de proveedores de relés diferenciales y dispositivos asociados, definiendo las especificaciones técnicas para seleccionar aquellos que mejor se adapten a los requisitos del proyecto.

Finalmente, se selecciona el microcontrolador que permita gestionar el funcionamiento del sistema, así como registrar y analizar los datos obtenidos en tiempo real, facilitando la evaluación del desempeño del sistema en condiciones de operación y falla.

3.1.4. Capacidad de muestreo específico.

En aplicaciones donde se necesita realizar un análisis específico de una sola fase o cuando se desea aislar una fase para un estudio en particular, se utiliza el transformador monofásico el cual tiene esta capacidad y puede usarse como aislante y medidor de una fase específica.

3.1.5. Método de uso de la protección 87.

En sistemas de distribución eléctrica, de manera especial a aquellos que poseen una alta demanda de energía, las pérdidas se consideran como una preocupación importante. El uso de transformadores monofásicos permite disminuir las pérdidas limitando la potencia en una fase definida.

La selección se debe basar en una evaluación cuidadosa de las necesidades y objetivos del análisis, por lo que el uso del programa computacional ATP (Alternative Transient Program) se considera como una herramienta fundamental para llevar a cabo estudios de simulación y análisis de protección diferencial 87 [1].



3.1.6. Medición de Corriente

La corriente eléctrica está presente en circuitos en funcionamiento, la cual se puede definir como el flujo de carga que atraviesa un material conductor. El flujo de la corriente eléctrica puede ser de dos formas: corriente continua (CC), en donde el movimiento de los electrones se mantiene en una dirección; y corriente alterna (CA), en donde la dirección del flujo cambia regularmente de acuerdo con un periodo de oscilación. Independientemente del tipo de corriente, el paso de esta produce efectos térmicos, químicos y magnéticos.

Por lo tanto, es indispensable medir el comportamiento de la corriente eléctrica en los conductores del circuito. Para realizar esto, se utilizan procesos de medición donde se comparan diferentes mecanismos con otros asignando un valor numérico a cada uno. Una vez realizada esta medición, se toma en cuenta el factor de error que está presente en cada medida. Para poder medir la corriente en los diferentes elementos de un circuito, se pueden utilizar los siguientes métodos:

3.1.7. Método de deflexión

Tabla 1.

Métodos de medición de corriente mencionados

Método	Descripción
Deflexión	Se introduce un amperímetro en el circuito para medir la corriente mediante la deflexión de su aguja indicadora.
Detección de cero	Se comparan dos corrientes con la corriente diferencial ID. Si ID no es cero, el relé debe actuar y desconectar los circuitos. Se utiliza un puente de Wheatstone para calcular una resistencia desconocida.
Comparación	Es utilizada cuando se posee una incógnita y un parámetro conocido similar, pero con unidades distintas.



FACULTAD DE INGENIERÍA EN CIENCIAS
APLICADAS

Sustitución	Se reemplaza la incógnita por un patrón ajustado para producir el mismo efecto, pero en distintas unidades.
Diferencial	Se estima la diferencia entre un parámetro y una referencia fija, midiendo la variación en la lectura del sensor.
Muestreo de señales	La señal analógica se convierte a digital, tomando muestras en intervalos iguales de tiempo para facilitar su procesamiento.

Nota: Elaboración Propia

3.2. Materiales

3.2.1. Protección diferencial 87T

La protección diferencial 87T se implementa mediante un relé diferencial, el cual es un dispositivo diseñado específicamente para esta función. Algunos de los componentes y materiales necesarios para montar un sistema de protección diferencial 87T son:

- Relé diferencial que puede ser electromecánico o numérico (microprocesado).
- Transformadores de corriente que miden las corrientes de entrada y salida del protegidas.
- Cables de control y potencia para las conexiones eléctricas.
- Módulo de prueba en donde se simulan las condiciones de falla y operación normal.
- Fuente de alimentación que energiza al relé diferencial y los TCs.
- Equipos de medición como multímetros, osciloscopios, etc. para comprobar las señales.
- Puesta a tierra adecuada para seguridad.
- Gabinete o caja para alojar los componentes.



**FACULTAD DE INGENIERÍA EN CIENCIAS
APLICADAS**

Es importante seguir las normas y estándares aplicables, como las establecidas por IEEE, IEC o ANSI, para garantizar una implementación segura y confiable de la protección diferencial 87T en transformadores.

3.2.2. Transformador

El transformador es un componente esencial de la simulación en ATP, y se elige un transformador monofásico, siguiendo la recomendación de la referencia. Además, esta elección implica que las condiciones de falla son de alta impedancia, lo que conlleva que los elementos del módulo se dimensionen acorde a dichas condiciones. Para obtener las medidas de voltaje y corriente, se utilizarán instrumentos de medición apropiados, como se señala en la referencia [3].

3.2.3. Esp-32

Plataforma de desarrollo en el mundo de la electrónica y la ingeniería, microcontrolador de alto rendimiento y bajo costo, la capacidad que tiene para integrar múltiples funciones con la facilidad de uso la convierten en la opción ideal para una extensa gama de proyectos y soluciones de industria avanzadas también se puede trabajar con entornos más comunes como MicroPython, Espressif Idf, y Arduino IDE que es la que vamos a utilizar en este trabajo de grado.

3.2.4. Sensor SCT-013

Este dispositivo pertenece a los sensores de corrientes no invasivos que miden la intensidad que pasa por un conductor, dispositivos de instrumentación que proporciona mediciones proporcionales a la intensidad que circula en un circuito, este sensor tiene una precisión de $\frac{1}{2}\%$, pero para esto el núcleo ferromagnético debe cerrarse de forma adecuada, pero hasta un mínimo orificio de aire puede producir desviaciones de 10%.



3.2.5. Dimmer controlador de potencia

El dimmer de 4000 Watts también conocido como variador de intensidad, es un elemento pequeño que tiene como objetivo principal la regulación y manipulación de la intensidad de luz que emite una luminaria o foco, sin considerar la cantidad que sean. Está compuesto por un dispositivo semiconductor llamado triac, el cual que consiste en la conexión de 2 tiristores en paralelo, pero con conexiones en sentido contrario y compartiendo una compuerta en común. Se los utiliza de manera principal para la iluminación LED debido a que suele ser más sensible a los cambios de voltaje que otros sistemas de iluminación.

3.2.6. Resistencias

Las niquelinas eléctricas son resistencias que están hechas de níquel y que se utilizan para generar calor, son elementos que se encuentran en los circuitos electrónicos y que se encargan de regular la corriente eléctrica. Se oponen al paso de la corriente y limitan su fuerza, en este caso se usaron 6 niquelinas conectadas en paralelo.

3.2.7. Voltímetro Ac 0 – 500V

Es un identificador de señal o probador de voltaje digital, que tiene una pantalla LED de alto brillo y un cuerpo principal cilíndrico, utilizado para medir la electricidad CA. Entre las aplicaciones principales se encuentra que puede utilizarse como indicador de señal, señal de accidente, señal de advertencia, entre otras señales en la línea de energía eléctrica, máquinas, herramientas, telecomunicaciones, barcos, maquinaria de impresión y minería. Tiene un error aproximado de 0-2 mm debido a la medición manual.

3.2.8. Amperímetro Ac 0 – 200A

Es un dispositivo de medición eléctrica utilizado para medir y mostrar la intensidad de la corriente eléctrica en corriente alterna (AC). Debido a su tamaño compacto, este amperímetro es ideal para montaje en paneles de control, tableros eléctricos y carcasas de equipos eléctricos.



**FACULTAD DE INGENIERÍA EN CIENCIAS
APLICADAS**

La función principal de este amperímetro es medir la corriente alterna en un circuito eléctrico. Por lo tanto, ofrece mediciones precisas de la intensidad de la corriente eléctrica que circula por el circuito. Tamaño compacto de 22mm: Además, el diámetro estándar de 22mm facilita su instalación en espacios reducidos, haciéndolo adecuado para diferentes entornos de trabajo.

3.2.9. Software

Para diseñar el prototipo de la protección diferencial 87, se utilizaron diversas herramientas de software que permiten modelar y explicar de forma detallada el funcionamiento de este equipo. Actualmente, hay varios programas y simuladores que están disponibles, con licencias gratuitas que integran las principales funciones y herramientas requeridas para el modelamiento adecuado del prototipo.

3.2.9.1. ThingSpeak

Es una plataforma en la nube, que permite recopilar y analizar datos de internet de las cosas (IoT). Permitiendo a los usuarios almacenar datos de sensores y dispositivos, realizando análisis y visualizando información en graficas por medio de su interfaz web, permite ser útil en proyectos de investigación y prototipos de automatización y el monitoreo remoto, además ofrece funciones de análisis estadístico, visualización de datos y alertas, haciéndola útil, en todo lo que se refiere a OneDrive permite a los usuarios almacenar datos desde este servicio.

3.2.9.2. Arduino IDE

Es una herramienta fundamental y esencial para programar y desarrollar proyectos con placas, con un entorno de código abierto que permite a los usuarios escribir, compilar y cargar programas en el mundo de la ingeniería, con la facilidad de uso y las potentes características lo muy utilizado para varias aplicaciones electrónicas que van desde la educación hasta el desarrollo profesional.



3.2.9.3. Programa computacional

Según su estudio [14] se emplea extensamente en el campo de la investigación en Ingeniería Eléctrica debido a su capacidad para modelar y resolver una amplia variedad de problemáticas relacionadas con sistemas de potencia. Una de las aplicaciones principales del ATP es la evaluación del comportamiento de las perturbaciones y variaciones en la carga. La capacidad del ATP para simular eventos y anticipar su impacto es importante en las investigaciones de Ingeniería Eléctrica.

Se utiliza un modelo computacional para abordar y resolver aspectos relevantes, tales como la protección del sistema y sus componentes, para lo cual se realizan pruebas de funcionamiento basadas en simulaciones de los sistemas de distribución. Por medio de estas pruebas se puede corroborar el correcto funcionamiento de la protección diferencial [12].

Finalmente, con los resultados obtenidos, se realiza una comparación que permita estimar un margen de error entre los resultados proporcionados por el módulo y los valores obtenidos mediante métodos matemáticos. Con este análisis se puede evaluar la precisión y confiabilidad del módulo de protección diferencial 87T con respecto a las expectativas y especificaciones técnicas definidas en la etapa de diseño.

3.3. Diseño del módulo experimental

Para diseñar el módulo experimental que pruebe la protección diferencial 87T, se utilizan los elementos que se detallan a continuación:

- Relé diferencial 87T monofásico.
- 6 resistencias conectadas en paralelo emulando el lado primario y secundario para medir las corrientes de entrada y salida del transformador.
- Dimmer de 4000 watts
- Voltímetro
- Amperímetro
- Breaker

- Luces piloto con bocina
- Esp 32
- Sensores SCT-013
- Multímetros y osciloscopios para monitorear corrientes, voltajes y señales del relé.
- Cables, borneras tipo banana para las conexiones eléctricas.
- Caja o gabinete metálico para alojar los componentes.
- Software de simulación (ATP u otro) para complementar las pruebas experimentales.

Figura 2.

Estructura del módulo



El módulo que se muestra en la **Figura 2** se ensambla conectando de forma adecuada cada uno de los componentes y siguiendo las recomendaciones del fabricante para la configuración del relé diferencial. Se realizan pruebas sometiendo al transformador a varios escenarios de operación normal y fallas internas controladas, verificando la respuesta del relé 87T ante el evento.

El diseño y construcción del módulo se realiza con 6 metros de perfil de acero de 2 cm de ancho, la altura del modelo es de 52 cm, de ancho 32 cm y de profundidad 30 cm toda la estructura es metálica para que soporte cualquier golpe y sostenga con firmeza los componentes fijados dentro y fuera del módulo.



**FACULTAD DE INGENIERÍA EN CIENCIAS
APLICADAS**

En este capítulo, se describen los métodos y materiales necesarios para analizar el funcionamiento de la protección diferencial 87 en transformadores monofásicos. En esto se incluye la selección correcta de los componentes como el transformador, relé diferencial 87T, transformadores de corriente y equipos de medición. Se presentan los detalles del proceso de configuración y ajuste de parámetros en el relé. De igual manera se propone el diseño de un módulo experimental indicando las pruebas prácticas que pueden realizarse, sometiendo al transformador a condiciones normales y de falla controladas. Finalmente, se utiliza el software de simulación ATP para complementar el análisis y evaluar escenarios adicionales de forma virtual.

3.3.1. Descripción general

El relé diferencial de transformador BE1-87T está diseñado específicamente como protección primaria para transformadores de potencia. Este dispositivo está disponible en configuraciones monofásicas o trifásicas, permitiendo comparar, con rapidez y precisión, las corrientes que ingresan y salen del transformador protegido.

Si este equipo detecta algún desequilibrio, la actuación del relé aísla rápidamente el transformador de potencia buscando fallos internos, limitando de esta manera los posibles daños al transformador y reduciendo la amenaza para la estabilidad del sistema.

La evaluación de las condiciones del relé propone tres tipos de restricción que evitan falsos disparos, siendo estos, la corriente de paso, segundo armónico y quinto armónico.

3.4. Diseño del módulo

En esta sección se describen los procedimientos para el diseño de un módulo experimental que permita realizar pruebas prácticas, sometiendo al relé diferencial a condiciones normales y de falla controlada. Finalmente, se menciona el uso de software de simulación como ATP DRAW para complementar el análisis y evaluar escenarios adicionales de manera virtual.



**FACULTAD DE INGENIERÍA EN CIENCIAS
APLICADAS**

Luego de definir las etapas que componen el trabajo del módulo y los documentos que las componen, se elabora un proyecto correspondiente al módulo. Para ello se considerarán dos partes principales: la estructura física y la parte eléctrica. Por lo tanto, teniendo en cuenta que uno de los principales objetivos del módulo es la revisión didáctica de las operaciones de protección diferencial, la empresa se dedica al desarrollo de tecnologías utilizadas en la educación, en particular en campos técnicos, donde se encuentran los equipos que proporciona la empresa. usado. para muchos campos diferentes,

Por tanto, considerando la importancia y presencia de la protección eléctrica en la industria profesional, el diseño y construcción de un módulo se considera efectivo. Por lo tanto, los módulos de formación brindan mayores oportunidades para aplicar en la práctica los conocimientos adquiridos, permitiendo la identificación de cada módulo. Los componentes le permiten implementar prácticas relevantes, de la misma manera que le permite hacer conexiones educativamente relevantes e incluso integrar más componentes si es necesario. Para obtener resultados efectivos, se utilizará software de diseño para obtener material de referencia similar al material propuesto, en base a los recursos disponibles.

Finalmente, se cree que para la construcción modular es necesario utilizar tubos cuadrados, lo que permitirá crear una estructura en la que se colocarán las diferentes partes del módulo, de la misma forma, que servirá como lugar de trabajo, así como espacio adicional para la colocación de materiales y herramientas, garantizando mejores condiciones para la realización de actividades prácticas adecuadas. Luego de seleccionar los materiales para crear una estructura modular correspondiente a la parte mecánica de la tecnología propuesta, es necesario diseñar la estructura brindando espacios adecuados para acomodar las partes que conforman el módulo.

3.4.1. Aplicación Solid State Protective Relay

Existen etapas en el proceso de conexión de un módulo, y cada etapa tiene una función específica, por lo tanto, incluye diferentes elementos dependiendo de su utilidad en él, tomando



**FACULTAD DE INGENIERÍA EN CIENCIAS
APLICADAS**

en cuenta la referencia que se aplica en la propuesta tecnológica, cada una de los componentes se ensamblaran dentro de cajas metálicas para facilitar el uso y almacenamiento de los mismos, considerando de igual manera que se tenga acceso hacia cada uno de los elementos para situaciones donde sea necesaria la manipulación o mantenimiento.

3.4.2. Entradas múltiples

La selectividad del relé diferencial se basa en la capacidad de distinguir entre un fallo interno y uno externo. En condiciones de funcionamiento ideales, la potencia de entrada del transformador protegido es igual a la potencia de salida. Sin embargo, la comparación de las corrientes de entrada y salida de un transformador de potencia a menudo requiere algo más que dos entradas diferenciales. Un ejemplo de ello es lo siguiente:

- Los transformadores de potencia a menudo tienen una parte significativa (superior al 10%) de la corriente total en el tercer devanado, o "terciario", y por lo tanto requieren otra entrada al relé diferencial.
- La fiabilidad habitual de los transformadores hace que se tienda a omitir un disyuntor dedicado para el lado de alta. El transformador se alimenta entonces de dos o más disyuntores aguas arriba. Dado que normalmente se evita poner en paralelo los transformadores de corriente (TC), los TC de cada disyuntor requerirían entonces entradas de relé separadas.

El BE1-87T está disponible con hasta cinco entradas de restricción para el estilo monofásico, y hasta tres entradas de restricción por fase para el estilo monofásico. por fase para el modelo trifásico.

3.4.3. Adaptación de las Entradas

Los transformadores de potencia, por su propia naturaleza, tienen diferentes valores de corriente que fluye a través de sus devanados primario, secundario y terciario en condiciones normales de funcionamiento. Además de estas diferencias de magnitud, estas corrientes tendrán



UNIVERSIDAD TÉCNICA DEL NORTE

Acreditada Resolución Nro. 173-SE-33-
CACES-2020



FACULTAD DE INGENIERÍA EN CIENCIAS APLICADAS

una relación de fase específica dependiendo de la construcción del transformador y de las conexiones de los devanados individuales (por ejemplo, estrella/A). Las corrientes de fase individuales del transformador protegido deben ajustarse en magnitud y ángulo de fase para que puedan compararse correctamente en el relé y para garantizar que, en condiciones normales, exista un equilibrio (es decir, que la suma de todas las corrientes de entrada sea igual a la suma de todas las corrientes de salida).

Dado que es prácticamente imposible igualar las magnitudes de estas corrientes detectadas de los distintos devanados de potencia utilizando relaciones de TC estándar, las corrientes se igualan dentro del relé mediante escalando cada una de las corrientes aplicadas por un factor apropiado, llamado Ajuste de toma mediante los diales INPUT del panel frontal. Seleccionando las relaciones de derivación adecuadas, las corrientes aplicadas son escalado dentro del relé para lograr el equilibrio deseado en condiciones normales de funcionamiento. La gama de ajustes de derivaciones disponibles para cada entrada del BE1-87T es de 2,0 a 8,9 A. (Estos ajustes son ajustables independientemente en incrementos de 0,1 A. Los incrementos decimales permiten un escalado más preciso de las corrientes aplicadas, y normalmente eliminan la necesidad de instalar TC auxiliares de ajuste de relación).

Para el relé monofásico BE1-87T, se requiere cualquier compensación de ángulo de fase para compensar el desplazamiento de fase a través del transformador protegido. conexión adecuada de los secundarios del sistema-CT. Para un transformador estrella/A, esto significa conectar los secundarios del TC en A para el devanado en estrella, y en estrella para el devanado en A. Tenga en cuenta que este tipo de conexión también elimina la componente de secuencia homopolar del transformador. Este tipo de conexión también elimina la componente de secuencia cero de la corriente (que puede estar presente en condiciones de fallo a tierra externo).

El BE1-87T trifásico tiene la capacidad de proporcionar filtrado de secuencia cero y un desplazamiento de fase de más o menos 30° dentro del relé. 30° dentro del relé para compensar



FACULTAD DE INGENIERÍA EN CIENCIAS
APLICADAS

el desfase introducido por las conexiones del transformador de potencia. del transformador de potencia. La selección de más, menos o ninguna compensación es ajustable en campo.

3.4.4. Etapa de alimentación

Se considera el medio principal por el que se da la conexión necesaria entre el módulo y la fuente de energía, en este caso, se considera implementarlo a la red eléctrica. Un tomacorriente de estas características supone un servicio eléctrico adecuado para mi módulo. De 32 A, que pese a que la red a conectarse es un transformador monofásico, como debe garantizar la integridad de los elementos del módulo, se dimensiona de manera adecuada las protecciones, para lo cual utilizo la siguiente expresión:

$$I_p = I_n * 1.25 \quad (1)$$

Esta expresión está considerada en la norma NEC 2017, en su artículo 210.20, la cual menciona que dentro de un circuito derivado que suministra cargas continuas o no continuas, el elemento de protección no puede ser menor a la carga no continua con más el 125% de la carga continua.

Una vez que tengamos claro cuál debe ser el valor de la protección aseguraremos la integridad de los componentes del módulo, tenemos que ver qué tipo de protección debemos idealizar. Los primeros tipos que solemos manejar son:

- Magnetotérmicos, mismos que protegen a los componentes del circuito, a los conductores y a la carga por interruptor directo en caso de sobrecorriente. Actuará magnéticamente o térmico según la sobrecorriente sea debida a un caso u otro.

3.4.5. Conversión analógica/digital

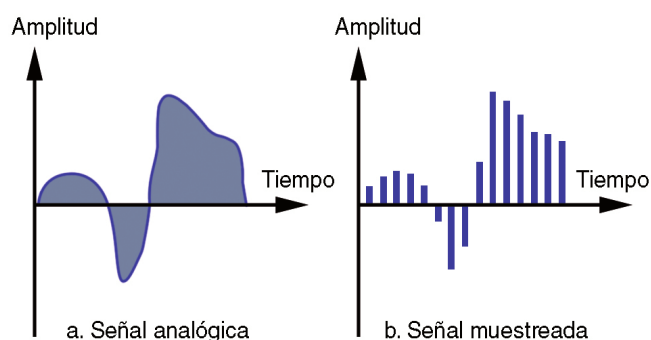
En la era digital actual, la conversión de señales analógicas a digitales es crucial para que los equipos electrónicos puedan interactuar con el mundo real. Este proceso implica

FACULTAD DE INGENIERÍA EN CIENCIAS
APLICADAS

transforma información continua, como la de una onda de sonido o una señal de video, en valores discretos que las computadoras pueden entender y procesar. La conversión analógica-digital se realiza comúnmente utilizando dispositivos electrónicos que reducen el ruido de las señales y las acondicionan para su posterior digitalización [15].

Figura 3.

Señal analógica a y señal muestreada



Nota: Tomado de [15].

3.4.6. Funcionamiento de la protección diferencial

El relé diferencial compara dos corrientes, confrontándolas con la corriente ID, si la corriente ID no es cero, esto indica que el relé debe actuar desconectando los circuitos y protegiendo el sistema.

Para empezar, entender el funcionamiento de relé 87, debemos identificar las corrientes primarias y secundarias, las fórmulas correspondientes dichas corrientes son: la corriente del primario del transformador es igual a la potencia del transformador, sobre la raíz de tres, por el voltaje línea del lado primario, luego aplicamos la fórmula para obtener la corriente del secundario donde sobre la potencia del transformador por el voltaje línea del lado secundario lo cual se muestra en la ecuación.



FACULTAD DE INGENIERÍA EN CIENCIAS
APLICADAS

$$IP = \frac{S}{(\sqrt{3} * VL)} \quad (2)$$

Donde

IP Corriente del lado primario del transformador

S Potencia del transformador o de las cargas

VL Voltaje línea del lado Primario

Se continúa ejecutando la ecuación de la corriente del secundario que es *Is* igual a la potencia del transformador entre la raíz de tres por el voltaje de línea del secundario se muestra en la ecuación:

$$Is = \frac{S}{(\sqrt{3} * VL)} \quad (3)$$

En el siguiente paso utilizamos la corriente diferencial, en donde *i'* multiplicado por el TAP siendo el factor de corrección de la corriente del lado primario, menos la *i'*2 por el factor de corrección de la corriente del lado secundario, aplicamos la intensidad de restricción que es igual a *i* del primario más *i* del secundario sobre dos, en esto tenemos el resultado que se muestra en las siguientes ecuaciones.

$$Id = [I']1*[I']1 - [I']2 \quad (4)$$

$$Id = [I']1*[TAP]TC1 - [I']2 * TAPTC2 \quad (5)$$

Donde

TAP_TC1 Factor de corrección de la corriente del lado primario

TAP_TC2 Factor de corrección de la corriente del lado secundario.



FACULTAD DE INGENIERÍA EN CIENCIAS
APLICADAS

Para la corriente de restricción utilizaremos la ecuación que es la corriente de retención es igual a la corriente del lado primario más la corriente del lado secundario, sobre dos y esto nos dará una corriente de retención que es igual a la corriente del lado primario por el TAP 1 del Tc1 más la corriente del secundario por el TAP, Tc2 dividido entre dos como se presenta la ecuación.

$$I_{rest} = \frac{IP * [TAP]TC1 + IS * TAPTC2}{2} \quad (6)$$

Aplicaremos la ecuación de la corriente operación mínima es igual al porcentaje de la pendiente de la operación por la corriente de retención más la corriente de arranque.

$$I_{mini} = m * I_{rest} + I_{arr} \quad (7)$$

Donde

m porcentaje de la pendiente de operación

I_{rest} corriente de retención

I_{arr} corriente de arranque

En el caso de transformadores con TAPS, se utilizan TAP1 y TAP2 para dar restablecimiento a la corriente secundaria por unidad en la protección, lo cual compensa las diferencias entre la relación de las fases del transformador. Para el caso de una conexión Delta-Estrella, existe un desfase de 30° con respecto al mismo ángulo de fase, por lo que se proporciona un ángulo para corregir el desfase, asegurando que la corriente se encuentre en múltiplos del ajuste realizado.

La protección diferencial de líneas de transmisión, representada por el relé 87, se considera como un componente fundamental en la operación confiable de las redes eléctricas.



**FACULTAD DE INGENIERÍA EN CIENCIAS
APLICADAS**

La capacidad que posee para detectar y responder a las fallas en las líneas de transmisión de manera rápida y precisa mejora de manera significativa la resiliencia de la red eléctrica [16].

Mediante la simulación computacional en ATP, se pueden realizar cálculos complejos y representar modelos detallados de transformadores y sistemas eléctricos, en donde, para este caso en particular se adquiere la licencia del software para su instalación. Se modela y simulan sistemas complejos, característica indispensable en el análisis del funcionamiento de la protección diferencial 87 en transformadores monofásicos [6].

Este análisis se empieza con la preparación del modelo del transformador monofásico dentro del software, lo cual consta en definir detalladamente las características eléctricas y físicas del transformador, en donde se incluyen aspectos como la impedancia, características de carga y el sistema de protección. Posteriormente, se realiza la configuración de la protección diferencial 87 en el programa, estableciendo los parámetros como la corriente de carga, el tiempo de operación, y los ajustes de generales, de acuerdo con las especificaciones del transformador y los requisitos de protección [6].

Una vez configurado el modelo y la protección, se ejecutan las simulaciones que evalúan el comportamiento de la protección en diversas condiciones de operación y fallas, estas simulaciones permiten analizar cómo la protección 87 responde frente a situaciones y determinar de esta manera la eficacia [17].

3.4.6.1. Restricción de paso de corriente

Una de las principales preocupaciones en las aplicaciones de relés diferenciales es la seguridad contra niveles de corriente elevados causados por faltas fuera de la zona protegida. La inevitable diferencia en las características de saturación entre los transformadores de corriente requiere una disminución compensatoria de la sensibilidad del relé. También es necesario poder ajustar la sensibilidad para compensar derivaciones de tensión, desajustes de TC y desplazamientos de ángulo de fase. Esto se logra proporcionando un factor de restricción proporcional a la corriente que fluye a través de la zona protegida. a través de la zona protegida.



FACULTAD DE INGENIERÍA EN CIENCIAS
APLICADAS

El BE1-87T mantiene la sensibilidad a una relación especificada entre la corriente de disparo y la corriente de paso. Esta relación, generalmente denominada pendiente, se puede ajustar desde el panel frontal en incrementos del 5%, desde el 15 al 60%.

3.4.6.2. Especificaciones BE1-87T relé de protección

El relé BE1-87T está disponible en configuraciones de una o tres fases y cuenta con las siguientes características y capacidades como se muestra en la Tabla 2.

Tabla 2.

Especificaciones BE1-87T (manual de usuario, pág. 13-15 BE1-87)

Método	Descripción
Entradas de detección de corriente	<p>La unidad está diseñada para funcionar con el secundario de un transformador de corriente estándar de 5 A. Corriente máxima por entrada: 20 A continuos; 250 A o 50 X TAP (lo que sea menor) durante 1 segundo.</p> <p>Para valores distintos de un segundo, el valor nominal puede calcularse como:</p> $I = \sqrt{\frac{k}{t}}$ <p>Donde t es el tiempo (en segundos) que fluye la corriente, y K = (250 A o 50 veces tap)², lo que sea menor.</p>
Carga de detección actual	<p>La gama de frecuencias es de 55-65 Hz.</p>
Comparación	<p>Se emplea cuando se tiene una incógnita y un parámetro conocido similar, pero con unidades diferentes.</p>



UNIVERSIDAD TÉCNICA DEL NORTE

Acreditada Resolución Nro. 173-SE-33-
CACES-2020



FACULTAD DE INGENIERÍA EN CIENCIAS APLICADAS

Ajuste del TAP	Los conmutadores giratorios del panel frontal permiten escalar la corriente de entrada detectada (o ajuste de toma) en un rango de 2,0 a 8,9 A, en incrementos de 0,1 A. incrementos de 0,1 A.
Salida restringida	Los interruptores de rueda selectora del panel frontal ajustan la captación de la salida restringida como porcentaje de la corriente de paso.
Rango de recogida	El rango es del 15% al 60% de la corriente de funcionamiento en incrementos del 5% (Figura 3).
Precisión de recogida	0,35+6% a más de 1'veces el ajuste del grifo. (Referencia Figura 1-1 Manual de usuario BE1-87).
Restricción del segundo armónico	La inhibición de la salida restringida se produce cuando el segundo componente armónico supera un ajuste de captación que es ajustable internamente entre el 8% y el 15% de la corriente de corriente de funcionamiento (unidades monofásicas), o del 11% al 27% (unidades trifásicas). El ajuste de fábrica es del 12% para para las unidades monofásicas y del 18% para las unidades trifásicas.
Restricción del quinto armónico	La inhibición de la salida restringida se produce cuando el componente de quinto armónico supera un ajuste de captación que tiene un rango ajustable internamente del 25% al 45% de la corriente de funcionamiento. El ajuste de fábrica es del 35%.
Rango de recogida	Los interruptores de rueda selectora del panel frontal ajustan el punto de captación de la salida libre en un rango de 6 a 21 veces el ajuste del tap en incrementos de 1x Tap.
Precisión de recogida	+3% del ajuste del panel frontal.
Salidas	Los contactos de salida están clasificados de la siguiente manera. Resistivo



FACULTAD DE INGENIERÍA EN CIENCIAS
APLICADAS

120/240 Vca: Hacer para 30 A durante 0,2 segundos, llevar 7 A
continuamente, interrupción 7 A.

250 Vca: Realiza y transporta 30 A durante 0,2 segundos, transporta 7
A continuamente, corte 0,3 A.

500 Vca: Realiza y transporta 18 A durante 0,2 segundos, transporta 7
A de forma continua, interrumpe 0,1 A.

Inductivo

120/240 Vca, 125 Vcc, 250 Vde: Interrupción 0,3 A ($L/R = 0,04$).

**Objetivo de
indicadores**

Existen blancos de accionamiento interno y de accionamiento por corriente, y su selección se indica mediante el número de modelo. Los blancos de accionamiento interno utilizan la señal de disparo interna para accionar los blancos. Los blancos accionados por corriente se activan mediante un mínimo de 0,2 A que fluye a través de los contactos de salida (lo que confirma que ha circulado corriente a través de los contactos).

Cuando se especifican blancos accionados por corriente, los contactos de salida asociados (véase más arriba) se reducen como sigue.

Resistiva: 30 A durante 0,2 segundos, 7 A durante 2 minutos y 3 A continuos. (La resistencia en serie de los contactos es igual o inferior a 0,1 ohmios).

**Unidades
monofásicas**

Se suministra un blanco de funcionamiento interno o de funcionamiento por corriente (según el número de modelo) para cada salida de disparo (es decir, las funciones temporizada e instantánea).

Temporización

Revisar la figura 5

Alimentación

Revisar Tabla 4

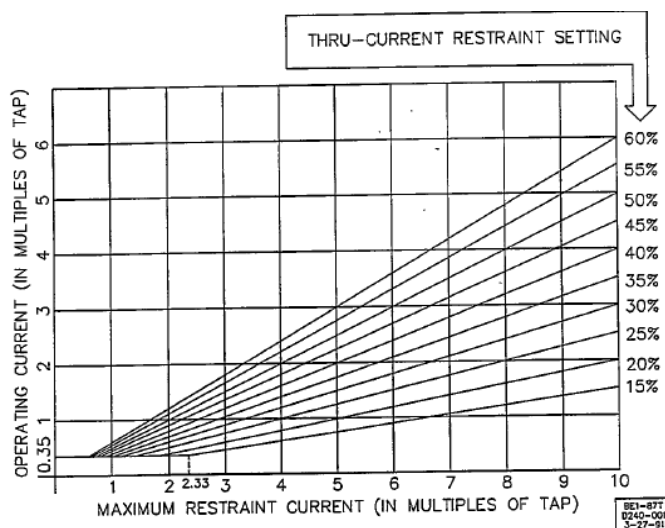
Nota: Elaboración Propia

FACULTAD DE INGENIERÍA EN CIENCIAS
APLICADAS

La pendiente en la característica de operación que se muestra en la Figura 4 del relé diferencial (87) es un parámetro crucial que determina la sensibilidad y la selectividad del relé frente a corrientes de falla y condiciones de desequilibrio. Se observa que la pendiente define la relación entre la corriente de operación y la corriente de restricción. Una pendiente más pronunciada indica que el relé requerirá una mayor diferencia entre las corrientes entrantes y salientes para operar, lo que es útil para evitar operaciones innecesarias durante condiciones de desequilibrio o corrientes de magnetización. Sin embargo, una pendiente demasiado pronunciada podría reducir la sensibilidad del relé a fallas internas reales.

Figura 4.

Pendiente Característica de Operación (manual de usuario figura 1-1, pág. 16 BE1-87)



La selección de la pendiente correcta se debe basar en un análisis del sistema eléctrico, considerando factores como la magnitud de las corrientes de magnetización, las características de los transformadores y las condiciones de carga. Un ajuste correcto de este parámetro garantiza que el relé diferencial opere de manera confiable durante fallas internas, mientras que mantiene su estabilidad durante condiciones normales y transitorias.



FACULTAD DE INGENIERÍA EN CIENCIAS
APLICADAS

En la Tabla 3 se muestra la configuración correcta de los TAPs para el relé diferencial (87) en un sistema monofásico, en donde se consideran las condiciones operativas del sistema y las características del transformador a ser protegido. Se observan diferentes múltiplos del TAP y con sus respectivos ajustes porcentuales, mismos que permiten calibrar el relé de manera diferencie entre corrientes de falla internas y condiciones de operación normales, como corrientes de magnetización o desequilibrios menores.

Tabla 3.

Múltiples del TAP (manual de usuario tabla 1-1, pág. 16 BE1-87)

Panel										
frontal										
Ajuste	15	20	25	30	35	40	45	50	55	60
%										
X TAP	2.33	1.75	1.40	1.17	1.00	0.875	0.778	0.700	0.636	0.583

Para un sistema monofásico, es fundamental seleccionar un TAP que proporcione un equilibrio óptimo entre sensibilidad y estabilidad. Un ejemplo de ello, un TAP de 2.33 veces el valor base puede ser adecuado en sistemas con altas corrientes de magnetización o desequilibrios significativos, ya que ofrece una mayor restricción. Sin embargo, en sistemas con corrientes de falla internas de magnitud menor, un TAP de 1.00 o 0.875 resulta más apropiado, ya que aumenta la sensibilidad del relé. La selección del TAP depende de un análisis detallado de las características del transformador, condiciones de carga y posibles corrientes de falla, asegurando que el relé trabaje de manera segura.

En la Tabla 4 se presentan las especificaciones de la fuente de alimentación tipo J utilizada en el relé diferencial (87), adecuadas para el uso en diversas aplicaciones de sistemas eléctricos. Posee una entrada nominal de voltaje de 125 Vdc y un rango de tensión de entrada de 62-150 Vdc, siendo esta fuente flexible para ser utilizada en situaciones variables de voltaje. De igual manera, soporta una carga nominal de 9.0 W cuando está energizada y 6.5 W cuando



FACULTAD DE INGENIERÍA EN CIENCIAS
APLICADAS

no lo está, mostrando un consumo de energía eficiente, característica importante cuando se pretende garantizar que el relé opere de manera confiable sin sobrecargar el sistema de alimentación.

Tabla 4.

Especificaciones de la fuente de alimentación (manual de usuario tabla 1-3, pág. 17 BE1-87)

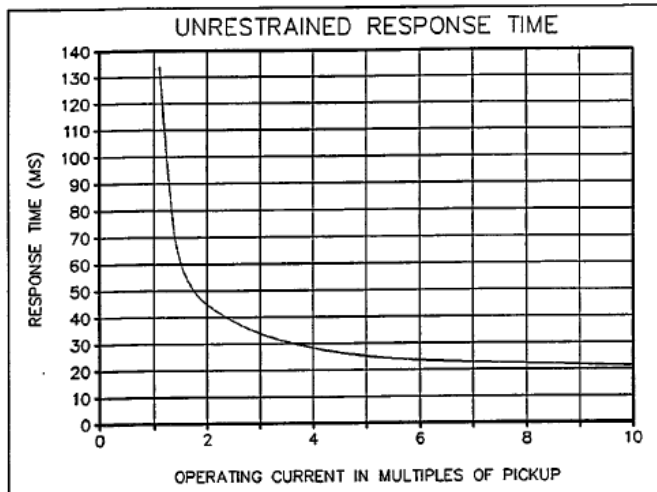
Tipo	Entrada nominal de voltaje	Tensión de entrada Alcance	Carga Nominal (Energizado)	Carga Nominal (Desenergizada)
J	125 Vdc	62-150Vdc	9.0 W	6.5 W
	120 Vac	90 – 132Vac	21.0 VA*	16.0 VA
K	48 Vdc	24 – 60 Vdc	8.5 W	6.0 W
L	24 Vdc	12 – 32 Vdc	9.0 W	6.5 W
Y	48 Vdc	62 – 150 Vdc	8.5 W	6.5 W
	125 Vdc			
Z	250 Vdc	140 – 280 Vdc	9.5 W	7.7 W
	240 Vdc	190 – 270 Vac	28.0 Va*	2606 W

A 55 – 65 Hz

En el caso de la configuración de 120 Vac, la fuente tipo J maneja un rango de tensión de entrada de 90-132 Vac y una carga nominal de 21.0 VA cuando está energizada y 16.0 VA cuando está desenergizada. Esta capacidad que tiene este equipo para utilizar corriente continua o corriente alterna en diversos rangos de voltaje la hace versátil para cualquier instalación eléctrica. La especificación de operación de 55-65 Hz garantiza que esta fuente sea compatible con las frecuencias estandarizadas en sistemas de energía del país, proporcionando una operación estable baja cualquier situación de operatividad normal de la red.

Figura 5.

Tiempo de respuesta sin restricciones (manual de usuario figura 1-2, pág. 18 BE1-87)



En la Figura 5 se muestra el tiempo de respuesta no restringido del relé diferencial (87), el cual se considera un parámetro crítico ya que define cuán rápido el relé puede operar en presencia de una falla interna. Se puede apreciar que el tiempo de respuesta es medido en milisegundos y se encuentra en función de la corriente de operación en múltiplos del valor de pickup. Cuando existe una pendiente pronunciada en la curva de tiempo de respuesta, indica que el relé opera de forma más rápida a medida que la corriente de falla aumenta, siendo esta una característica fundamental para proteger al equipo de daños severos, siendo las fallas de alta magnitud las que causan daños más catastróficos en período de tiempo cortos.

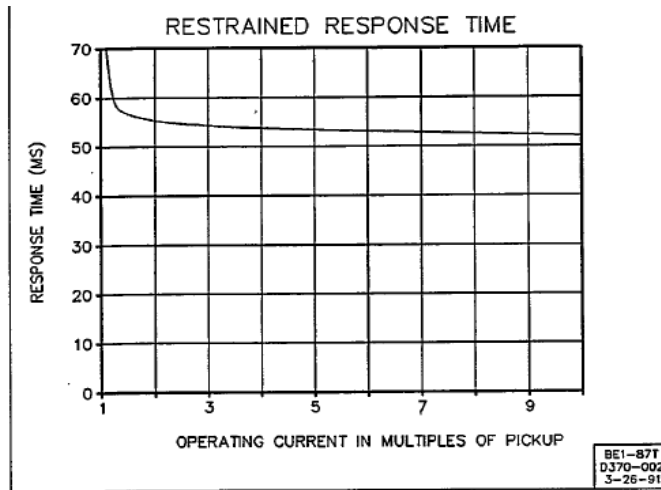
Por otro lado, se observa que una pendiente más suave indica que el relé tiene un tiempo de respuesta más lento incluso en corrientes de falla significativas. Esto es beneficioso en sistemas donde se requiere de cierta tolerancia a transitorios o desequilibrios menores, sin embargo puede comprometer la protección para fallas graves. La selección de la pendiente correcta debe tomar en cuenta el balance entre la rapidez de la operación y la mitigación total de operaciones incorrectas. El ajuste correcto permite que este elemento trabaje de manera

FACULTAD DE INGENIERÍA EN CIENCIAS
APLICADAS

eficiente y confiable, disminuyendo los daños en el equipo y manteniendo la estabilidad del sistema.

Figura 6.

Corriente de trabajo en múltiplos de pickup. (manual de usuario figura 1-2, pág. 18 BE1-87)



En la Figura 6, el eje horizontal indica la corriente de operación en múltiplos de la corriente de pickup (I_{pickup}), que es el valor al que el relé se encuentra configurado para iniciar su operación. El eje vertical corresponde al tiempo de respuesta en milisegundos.

La curva del gráfico indica cómo el tiempo de respuesta del relé varía en función de la magnitud de la corriente. Generalmente, a medida que la corriente aumenta (es decir, a medida que se aleja del valor de pickup), el tiempo de respuesta del relé disminuye. Esto se debe a que el relé está diseñado para actuar más rápidamente en presencia de corrientes más altas, que indican una falla más severa.

Dado que este trabajo está enfocado en la construcción de un módulo experimental que verifique el comportamiento de la protección diferencial 87 ante fallas monofásicas, también emularemos una falla en el software ATPDRAW, esta emulación se realizara con diferentes voltajes y corrientes a las utilizadas en el módulo, así será reflejada la comparación de los



UNIVERSIDAD TÉCNICA DEL NORTE

Acreditada Resolución Nro. 173-SE-33-
CACES-2020



FACULTAD DE INGENIERÍA EN CIENCIAS APLICADAS

resultados obtenidos en el software con los del módulo experimental, como por ejemplo las curvas de voltaje, corriente y disparo serán diferentes en ambos casos por la alimentación y configuración del relé en sí. En atp se puede representar de manera virtual el procedimiento del diferencial 87 incluyendo la inyección de fallas controladas no se precisa de componentes físicos lo que facilitara la modificación de parámetros y de pruebas repetitivas sin riesgos de daño al usuario.

El banco de pruebas diseñado cuenta con la capacidad de evaluar el módulo de verificación de la protección diferencial 87 de manera adecuada en los diferentes ensayos que se requieran para alcanzar este objetivo. Uno de estos propósitos es lograr la diferencia de potencial entre el lado primario y secundario del relé, esto se hará con 6 niquelinas conectadas en paralelo y divididas en tres unidades del lado primario y las otras tres del lado secundario la conectar las cargas y manipularlas con los dimmer obtendremos la diferencia de potencial adecuada para que se dispare el diferencial 87.

Con la integración de cada elemento entre sí, se dan por concluidas las etapas de diseño, simulación e implementación del banco de pruebas, lo cual da paso a la siguiente fase la cual corresponde a la realización de pruebas de experimentación que se visualizan en el siguiente capítulo. La implementación del módulo es importante dentro de la ejecución ya que los resultados obtenidos en la instalación se relacionarán de manera correcta dentro del análisis correcto del funcionamiento de la protección diferencial 87.



UNIVERSIDAD TÉCNICA DEL NORTE

Acreditada Resolución Nro. 173-SE-33-
CACES-2020



FACULTAD DE INGENIERÍA EN CIENCIAS APLICADAS

CAPITULO IV

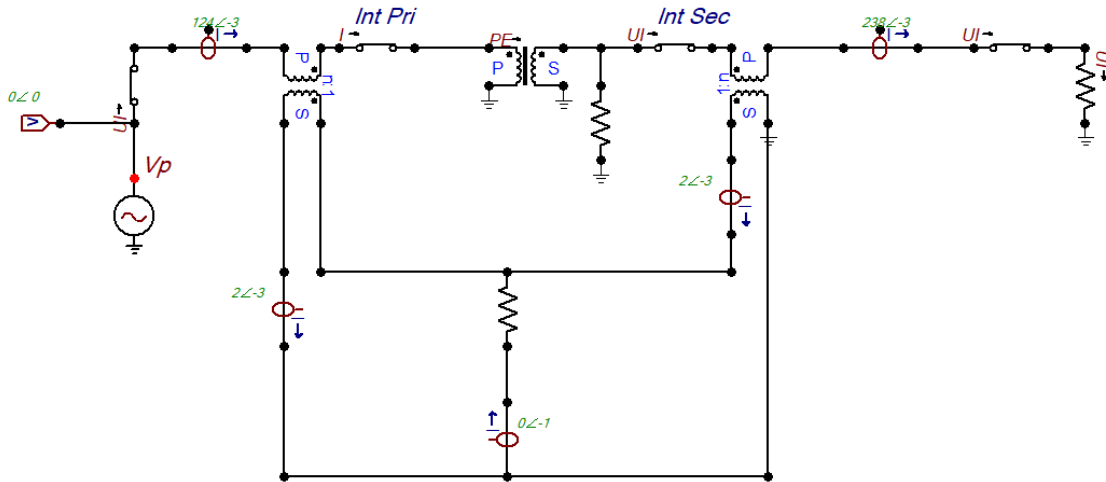
RESULTADOS Y ANÁLISIS

Los resultados obtenidos tanto en el software como el módulo experimental son relevantes y sirven de ayuda para futuras investigaciones en el cual experimentamos las funciones entre ambos casos. En la emulación los datos se adquieren de manera rápida y pueden visualizarse en gráficos o tablas, nos permite analizar el comportamiento del relé incluyendo los tiempos de operación, ajuste de activación. Por otro lado, en el módulo experimental, a pesar de los inherentes riesgos de manejo eléctrico en práctica, que son de utilidad en beneficio de datos verificados, también tenemos una visión realista de desempeño de este incluyendo su respuesta antes perturbaciones y la interacción con los componentes utilizados en el mismo. No obstante, validamos que el sistema funciona correctamente en condiciones reales, esto se hace con mayor complejidad en la configuración y puesta en marcha del sistema, requiriendo un manejo meticuloso y preciso.

El capítulo final de trabajo de investigación se enfoca en el análisis de funcionamiento de la protección diferencial 87, mediante pruebas de experimentación, para esto se desarrollan 2 ensayos que permitan evaluar el funcionamiento de la protección diferencial 87 tanto en el lado primario como secundario del transformador, esto se efectúa en una simulación en el software atpdraw el cual es un programa en el cual se puede visualizar los transitorios electromagnéticos, empleando dentro de su interfaz el programa grafico Plot XY, el cual nos muestra las gráficas de voltaje, corriente en tiempo, también podemos obtener graficas de barras con su segunda función de graficas de la ecuación de Fourier. La simulación solo emula el comportamiento que tiene la protección diferencial 87 ya que sus valores de corriente y voltaje son diferentes a las aplicadas en el módulo experimental, de igual manera se puede evidenciar que cuando fluctúa la corriente en el nodo el relé diferencial se dispara y causa que se active en cuestión de milisegundos.

Figura 7.

Modelo relé 87 Atpdraw



4.1. Modelamiento de Relé 87T en transformador monofásico

Para empezar la simulación debemos utilizar algunos elementos estos necesitan algunos atributos que nos solicita el programa, tales como el transformador monofásico, transformadores de corriente, interruptores, resistencias se muestra en las siguientes tablas a continuación, en la Tabla 5 se puede evidenciar los parámetros de la fuente de corriente que es AC esta a su vez esta alimentada con 13.800 voltios a 60Hz con un ángulo de desfase de 0°.

Tabla 5.

Atributos de la fuente AC (Modelo ATP)

DATA	UNIT	VALUE
Amplitud A	Volt	13800
Frecuency	Hz	60





UNIVERSIDAD TÉCNICA DEL NORTE

Acreditada Resolución Nro. 173-SE-33-
CACES-2020

FACULTAD DE INGENIERÍA EN CIENCIAS APLICADAS



Phase Angle A	Degrees	0
Start A	Sec	-1
Stop A	Sec	100

En la Tabla 6 podemos observar que en T-cl el interruptor se cierra en un segundo de iniciada la simulación, en el T-op el interruptor se abre a los 1000 segundos de la simulación, Imar indica la operación del interruptor depende del tiempo, no las condiciones de corriente, no se activará por los umbrales de corriente, finalmente T-recl y T-reop, no habrá reconexión automática después de una apertura, el interruptor permanece abiertos indefinidamente tras su apertura a los 1000 segundos.

Tabla 6.

Atributos del Tswitch (Modelo ATP)

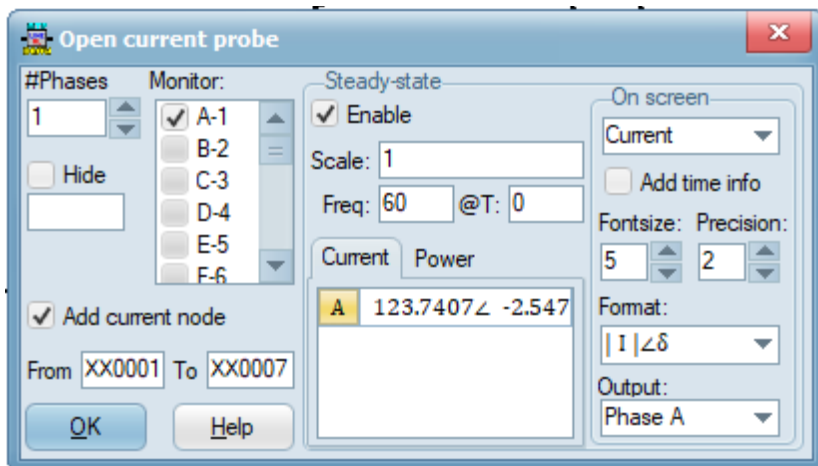
DATA	UNIT	VALUE
T-cl	s	-1
T-op	s	1000
Imar	Amps	0
T-recl	s	0
T-reop	s	0



En la Figura 8 para poder revisar las conexiones en atp este programa nos facilita con dispositivos de prueba, estos nos ayudan a verificar si las conexiones en cada nodo se encuentran bien, a continuación, se muestra en una imagen del cuadro de pruebas del atp para su verificación esto se utiliza en toda la construcción de la simulación, solo se menciona esto en este apartado.

Figura 8.

Cuadro de parámetros de la prueba y su simbología atp (Modelo ATP)



En la Tabla 7 se representa la relación de vueltas del transformador definida como n un valor de 0.02 indica un transformador elevador de voltaje con una relación de 1:50 (primario y secundario). Esto significa que el voltaje en el secundario sería 0 veces mayor que el primario, sin embargo, en contexto de sistemas por unidad o modelos simplificados, se puede interpretar como los ajustes del tap (2%) lo que modificaría ligeramente la relación de transformación.

Tabla 7.

Atributos del Trafo I (Modelo ATP)

DATA	UNIT	VALUE
n		0.02
Branch		0
Nodo	Phase	Name
P1	1	XX0012
P2	1	XX0007
P3	1	XX0009





UNIVERSIDAD TÉCNICA DEL NORTE

Acreditada Resolución Nro. 173-SE-33-
CACES-2020



FACULTAD DE INGENIERÍA EN CIENCIAS APLICADAS

P4	1	XX0010
----	---	--------

Branch = 0 indica que el transformador está configurado como monofásico con dos devanados (primario y secundario) sin ramas adicionales en atp se asocia al tipo de conexión o al número de devanados modelados.

La nomenclatura n indica la relación de transformación, en este caso como la corriente es de 124 A, se asume instalar TC de relación 250/5 por lo que $n = \frac{5}{250} = 0.02$.

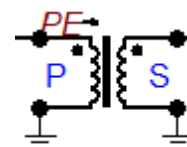
En el lado secundario del transformador se tiene corrientes de 238 A y se selecciona un TC de relación 500/5 por lo que $n = \frac{5}{500} = 0.01$.

En la Tabla 8 podemos ver los voltajes nominales del transformador como primario 220V, secundario 110V, con relación 2:1 transformador reductor, las resistencias del devanado son primario 1.93, secundario 0.484, las inductancias en el lado primario son 9.65mH, secundario 2.42 mH con una relación esperada de 2.4125mH, la corriente de magnetización y saturación es la corriente necesaria para magnetizar el núcleo en vacío y el valor bajo típico de transformadores eficientes con núcleo de alta permeabilidad.

Tabla 8.

Atributos del Transformador saturable (Modelo ATP)

DATA	Prim	Sec
U (V)	220	110
R (ohm)	1.93	0.484
L (mH)	9.65	2.42
Nodo	Phase	Name
P1	1	XX0014
S1	1	XX0015
I (0)	0.1	



F (0)	1.167
Rm	4000

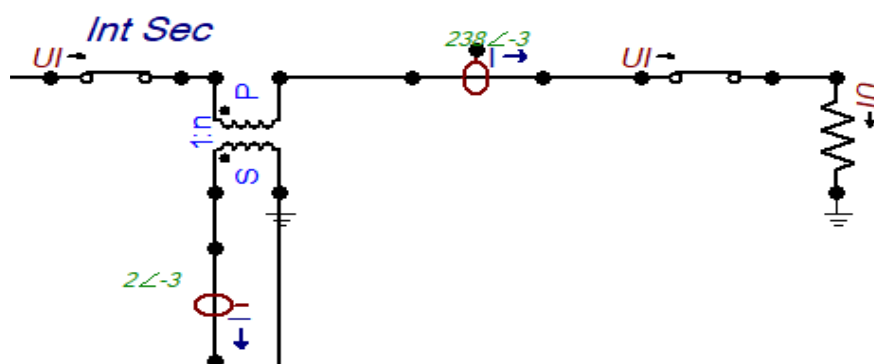
La resistencia de magnetización de 4000 ohmios modela las pérdidas en el núcleo que son corrientes parasitas e histéresis, el valor de Rm debería ser de 2200 ohmios debería coincidir con $I(0) = 0.1^a$, la diferencia sugiere un ajuste de error de entrada. El parámetro F0: 1.167 se refiere al factor de saturación relacionado con la curva de magnetización no lineal del núcleo y la frecuencia base si F0 es igual 50Hz o 60Hz, pero el valor 1.167 no es estándar.

Con estos datos podemos empezar a parametrizar la carga del transformador a continuación se muestra en una figura las conexiones pertinentes en Atp.

En la Figura 9 se parametrizan el umbral de corriente diferencial en 0.4, 1 en Int sec en múltiplos de la corriente nominal para activar el relé. Los parámetros Int Sec varían la interpretación de las corrientes en cada lado, 1 Int Sec indica la compensación de relación para igualar las corrientes en el relé, en el secundario el valor 1 compensa la relación 2:1 del transformador.

Figura 9.

Conexión del transformador (Modelo ATP)



La configuración del relé diferencial 87 utiliza estos parámetros Int Sec para compensar la relación 2:1 del transformador monofásico, garantizando una comparación ideal entre las



FACULTAD DE INGENIERÍA EN CIENCIAS
APLICADAS

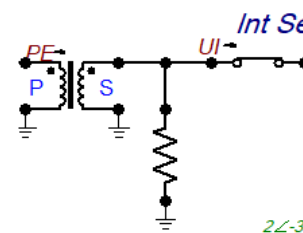
corrientes primaria y secundaria. Los valores 0.4,1 definen el umbral de operación y la pendiente característica, así para garantizar la efectividad del modelo con falla simulada y ajustar los parámetros según las especificaciones del relé y transformador.

En la Tabla 9 el parámetro $R= 40$ ohmios es el único elemento activo ya que $L= 0mH$ y $C= 0uF$. el componente se comporta como una resistencia pura, sin efectos inductivos y capacitivos. La inductancia indica que no hay contribución inductiva en el modelo y la capacitancia elimina cualquier efecto, simplificando el componente a una carga resistiva. Al ser una resistencia pura, no introduce desfases entre voltaje y corriente.

Tabla 9.

Atributos de la componente RLC (Modelo ATP)

DATA	UNIT	VALUE
R	Ohm	40
L	mH	0
C	uF	0
Node	Phase	Name
From	1	XX0004
To	1	



Se ingresa una carga puramente resistiva, se pone una resistencia a lado del transformador para simula el cortocircuito. Donde inicialmente la resistencia es muy grande por lo que no hay paso de corriente a tierra, la ausencia de L y C limita su utilidad en el análisis de transitorios o armónicos donde se requieren elementos reactivos

En la Tabla 10 la resistencia de un 1 Mega ohmio que es utilizada comúnmente para simular una carga despreciable, representa una resistencia de pull up y pull down en sistemas digitales modelando fugas mínimas en aislamientos o dispositivos de alta impedancia, no disipa la mayor cantidad de potencia lo cual evita el sobrecalentamiento en la simulación.




FACULTAD DE INGENIERÍA EN CIENCIAS
APLICADAS

El componente está configurado como una resistencia pura de 1 mega Ohmio conectada en el nodo X40015 y un punto en la fase 1, el valor alto indica un rol de aislamiento o modelado de alta impedancia, sin influencia en el comportamiento general del circuito.

Tabla 10.

Atributos de la componente Resistencia (Modelo ATP)

DATA	UNIT	VALUE
R	Ohm	1000000
Node	Phase	Name
From	1	XX0015
To	1	



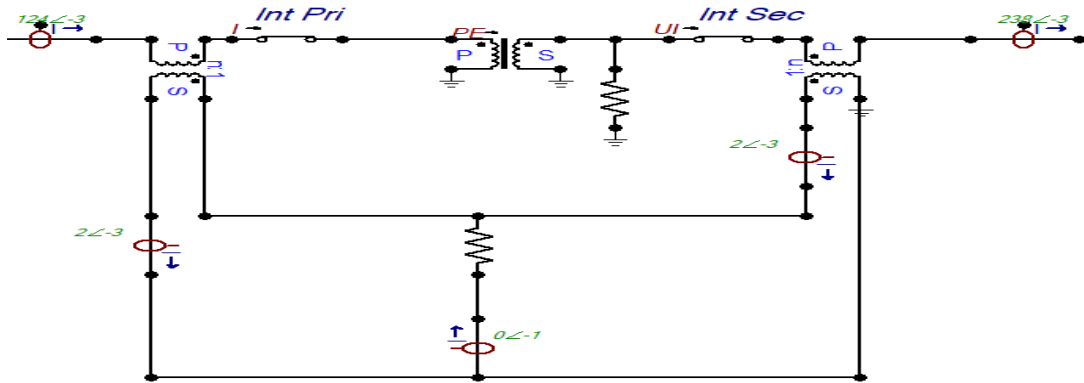
4.1.1. Simulación del relé 87

El principio de funcionamiento de un transformador 87T es comparar las mediciones del lado primario y secundario del transformador, son la diferencia de magnitudes y ángulo no debe ser significativa, es decir no superar un valor límite, y teóricamente debe ser cero.

Como se ve en la Figura 10 las corrientes que salen del TC son de 2[-3 A, acorde a la simulación, a continuación, se muestra una captura de la prueba del lado primario del transformador en donde podemos evidenciar los parámetros, donde se muestran los valores de corriente el número de fases y la corriente que pasa por el nodo con sus coordenadas en donde podemos ver los códigos que buscaremos en el programa grafico PlotXY.

Figura 10.

Simulación Atp (Modelo ATP)



En la Figura 11 y Figura 12 se muestra una sonda abierta para medir corrientes en múltiples fases, con enfoque en la Fase A. Los parámetros como frecuencia (60 Hz) y escala (1) son críticos para la precisión, mientras que los valores de corriente requieren revisión por posibles errores de formato. Esta herramienta es esencial para simular comportamientos realistas de protecciones eléctricas, siempre que se valide la coherencia entre el modelo y las especificaciones técnicas del TC físico.

Figura 11.

TC Lado primario (Modelo ATP)

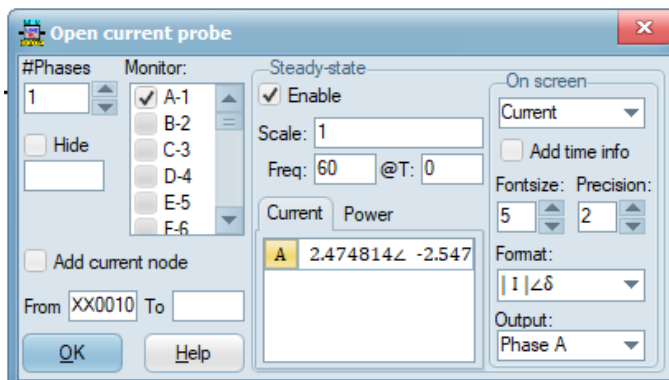
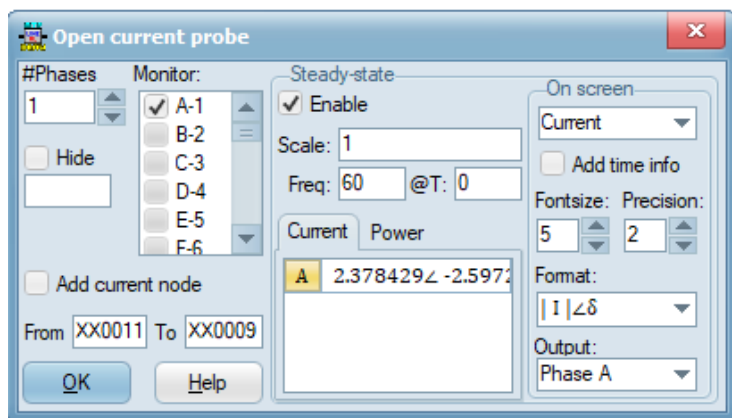


Figura 12.

TC Lado secundario (Modelo ATP)



La configuración del transformador de corriente del lado secundario utiliza una sonda abierta para medir corrientes en régimen permanente, enfocándose en la fase A. Los parámetros como Scale: 1 y la relación de corriente (2.378 A vs. -2.5977 A) requieren validación para garantizar coherencia con el TC físico, depende de ajustar correctamente la escala, las conexiones y los valores de corriente según las especificaciones técnicas reales. Entonces las corrientes se aproximan y de la diferencia de corriente por el relé no hay paso de corriente significativo como se muestra en la Tabla 11, es decir el relé no debe operar.

Tabla 11.

Parámetros de diferencia de corriente del relé (Modelo ATP)

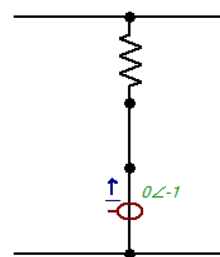
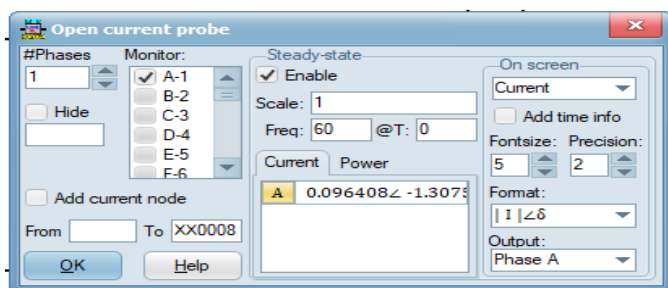
Data	Unit	Value
R	Ohm	1E-6
Node	Phase	Name
From	1	XX0015
To	1	

FACULTAD DE INGENIERÍA EN CIENCIAS
APLICADAS

Si el relé está configurado con un umbral de operación superior a 1.4 A, no se activará, los parámetros clave es de la escala 1 en donde sin ajuste de amplitud, las corrientes se miden directamente, como el sistema opera a 60 Hz tendremos unos valores de corriente que nos muestra la ventana de prueba de operación de 0.0964082 A; corriente en la dirección de referencia entrante y -1.3073 A.

Figura 13.

Parámetros de diferencia de corriente del relé (Modelo ATP)

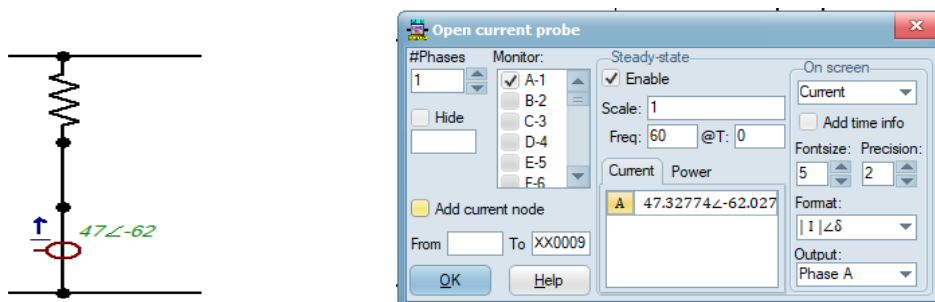


Estas son corrientes de dirección opuesta es decir saliente indicando un flujo balanceado, para simular la falla se ocasiona el paso de corriente a tierra entre los TC del relé diferencial, se cambia la resistencia a un valor pequeño como se muestra en la tabla 12, y se procede a simular.

En la Figura 14 se encuentran los parámetros para realizar un cortocircuito este valor es de un micro ohmio, se simula la falla de baja impedancia en el sistema permitiendo corrientes elevadas. En el contexto del relé diferencial 87 representa una condición de desbalance critico entre las corrientes del primario como secundario, activando el disparo, esto genera una corriente de desequilibrio al desviar flujo de corriente, simulando una falla interna que el relé debe detectar.

Figura 14.

Parámetros de prueba del relé no operativo (Modelo ATP)



En estas graficas se puede evidenciar que con la prueba de que se encuentra en la casilla izquierda se observa que tiene un valor marcado en verde de 47 con un Angulo de fase de -62 por lo tanto el relé no debe operar. Se detecta que en el lado secundario no hay paso de corriente y hay paso de corriente a tierra con un valor de 4730 A. De esta manera en el lado secundario de los TC se detecta que hay valor de corriente en el TC del lado primario del Trafo, pero no hay corriente en el TC del lado secundario del Trafo, y aparece una corriente en el relé diferencial como se muestra en la Figura 14.

A continuación, procedemos a utilizar el PlotXY que es el motor grafico que integra el atpdraw para mostrar las ondas de voltaje y corriente del relé.

En la Figura 15 los parámetros generales de simulación, con variables registradas 18 que son corrientes y voltajes en nodos, se muestra también los puntos de muestreo 500001 lo cual es una alta resolución temporal para capturar transitorios, el tiempo máximo es de 0.5 segundos. Las variables listadas corresponden a mediciones de corriente y voltaje en nodos del sistema; 08 c: vp -XX0006: Corriente entre la fuente y el nodo siendo el lado primario del transformador, 09 c:vp XX0001-XX0008: Corriente entre nodos XX001 y XX008 del lado secundario y 05 v: XX0016-XX0014: Voltaje entre nodos del circuito de protección.

FACULTAD DE INGENIERÍA EN CIENCIAS
APLICADAS

En esta ventana se selecciona en todas las variables de conexión desde la nomenclatura en la parte izquierda con título A – Z, desde 2 hasta 18 podremos escoger para poder mostrar las gráficas que son necesarias para este estudio en las cuales nos enfocaremos entre los nodos que se muestran en la ventana de prueba a continuación.

Figura 15.

Medidor de corriente entre nodos (Modelo ATP)

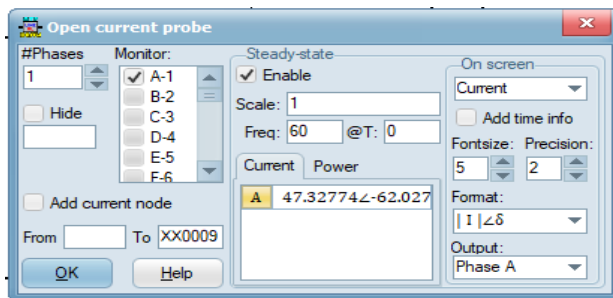
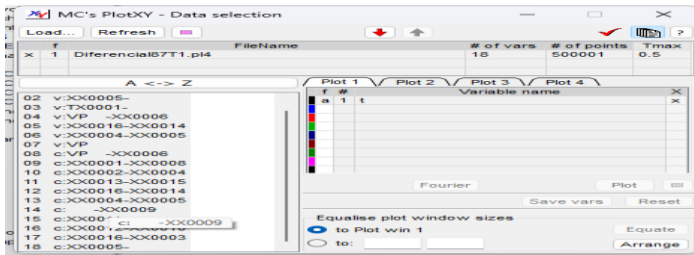


Figura 16.

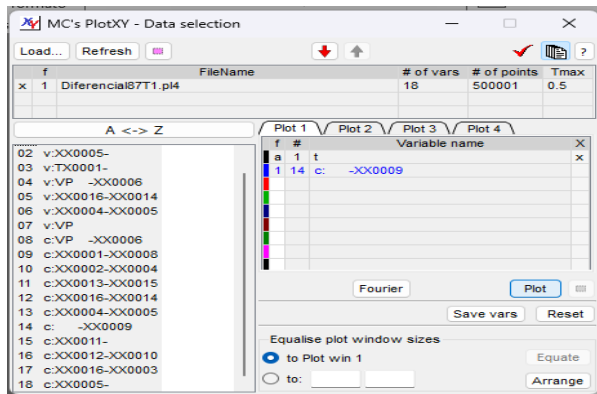
Motor de grafico PlotXY (Modelo ATP)



En la Figura 16 se monitorean corrientes en 6 fases, aunque en este cuadro esta en la fase A, esto sugiere un sistema monofásico o una simulación específica de una fase crítica, los nodos conectados son X0009 que está conectado a un transformador, carga o el dispositivo de protección. Los parámetros clave de la sonda de prueba son la medición de régimen permanente, ignorando los transitorios iniciales, sin la escala adicional las corrientes se miden directamente.

Figura 17.

Señal de corriente PlotXY (Modelo ATP)



Los valores de corriente medidos son: 47.327 A siendo una corriente de referencia entrante, 74.2 A: es una corriente en dirección opuesta saliente -62.027 A: es una corriente de polaridad invertida, posiblemente debido a un desbalance o falla. Los valores altos sugieren una condición de falla o un error en la configuración de la relación de transformación del TC.

Con esta prueba se procede a graficar en el motor PlotXY. Las variables listadas en la Figura 17 corresponden a las mediciones de corriente y voltaje en nodos estratégicos como 08 c: vp -XX006: Corriente entre la fuente VP y el nodo XX0006, lado primario del transformador; 09 c: XX0001- XX0008: Corriente entre nodos XX001 y X0008 del lado secundario; 14 c: -XX0009: corriente con polaridad invertida en el nodo con posibilidad de falla. La variable seleccionada en la ventana de Plot XY 14 c: -XX0009: corriente diferencial crítica para activar el relé 87.

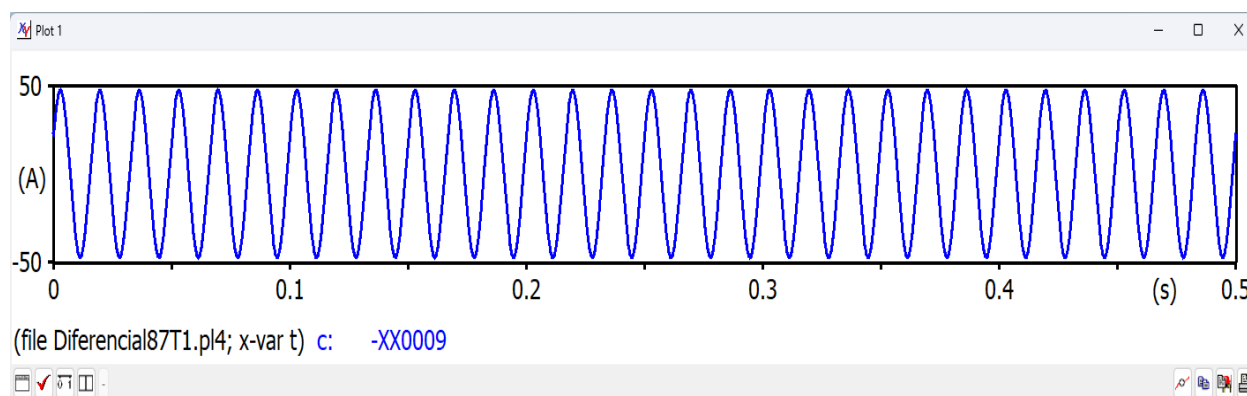
En la Figura 18 se observa la señal de corriente que pasa por el relé, en la que se opera desde -50 A hasta 50 A, con un tiempo de viaje de la onda de 0 hasta 0.5 segundos. Indica que la corriente fluye en ambas direcciones positiva y negativa, lo que es típico en sistemas AC, la resolución temporal es alta, lo que permite observar transitorios y detalles en la forma de onda, la corriente en el nodo XX0009 con polaridad invertida indica una falla interna. La corriente

FACULTAD DE INGENIERÍA EN CIENCIAS
APLICADAS

oscila entre -50 y 50 A lo que muestra una forma de onda sinusoidal típica de un sistema AC, la amplitud máxima de 50 A sugiere una condición de sobrecorriente o falla, ya que supera los valores nominales típicos.

Figura 18.

Señal de corriente que pasa por el relé (Modelo ATP)

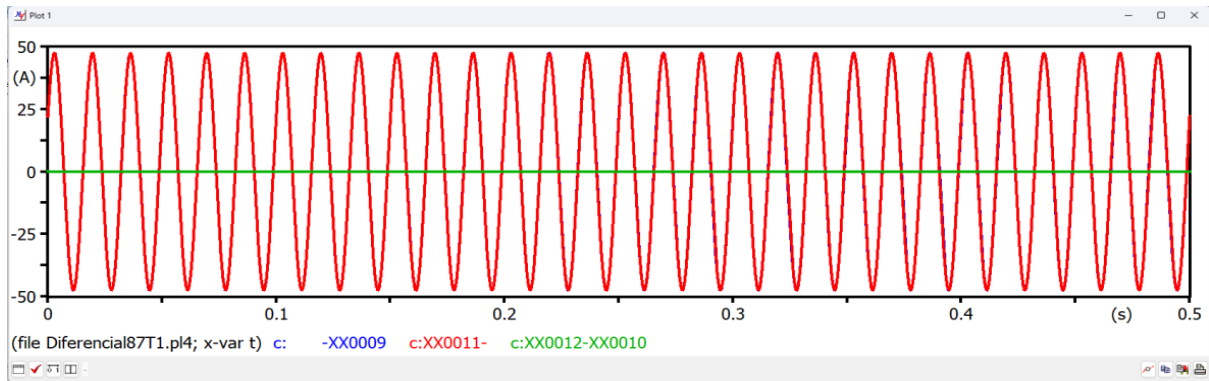


En la Figura 19 al comparar las corrientes de los TC y del Relé se tiene la siguiente gráfica., azul es el relé que tiene la corriente diferencial, rojo es el Tc del lado primario corriente en el primario del transformador, verde Tc del lado secundario corriente en el lado secundario del transformador, en el eje Y la corriente oscila entre -50 y 50 A, el eje X se refleja el tiempo de simulación de 0 segundos a 0.5 segundos.

El comportamiento de las corrientes en rojo y verde coinciden en magnitud y fase ($I_{pri}=25\text{ A}$, $I_{sec}=-25\text{ A}$), indicando un desequilibrio, azul es la I_{dif} que esta cercana a 0A, como se espera en condiciones normales no habrá disparos, la falla interna es a los 0.2 s, la onda en color rojo (I_{pri}) aumenta abruptamente de 25 a 50 A, verde es (I_{sec}) donde disminuye o se invierte indicando un desbalance. La gráfica muestra una condición de falla interna en el transformador, donde la corriente diferencial (I_{dif}/d_{if}) supera ampliamente el umbral del relé 87, activando el disparo.

Figura 19.

Comparación de corrientes de los TC y el relé (Modelo ATP)

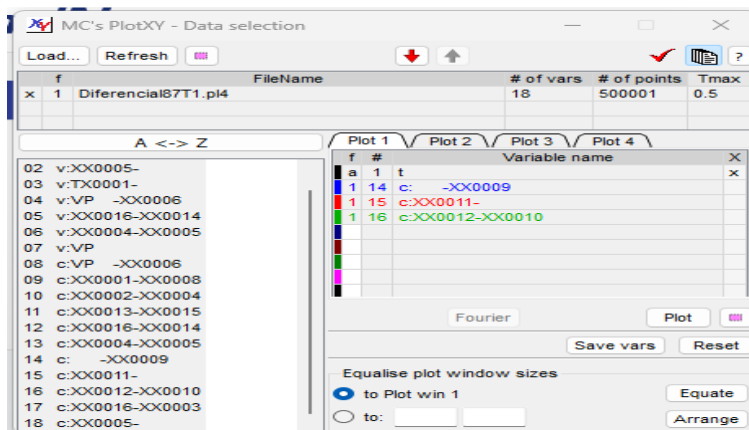


En la Figura 20 se muestra las 3 corrientes en el PlotXY en donde se encuentran las corrientes de los Tc en colores azul, rojo y verde.

- Azul corriente del relé
- Rojo corriente del TC primario del trafo
- Verde corriente del TC lado secundario del Trafo

Figura 20.

Corrientes del relé (Modelo ATP)

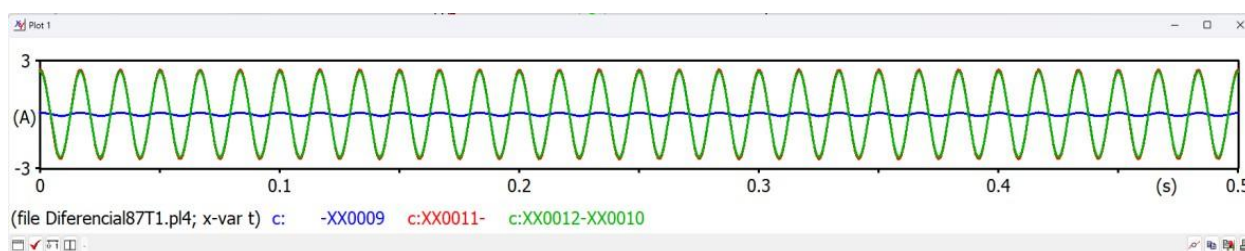


**FACULTAD DE INGENIERÍA EN CIENCIAS
APLICADAS**

El comportamiento de las corrientes en régimen normal sin fallas son aquellas que tienen magnitudes similares pero polaridades opuestas, lo que refleja la relación de transformación, esto indica que el sistema en equilibrio y no hay fugas ni desbalances esto se ve en la grafica con el color rojo, el color azul refleja que la corriente diferencial es cercana a cero ya que esto nos confirma que el relé no debe operar en condiciones normales, suponiendo que el ajuste es del 20% y la corriente nominal es de 5 A, el umbral seria de 1 A, si la $I_{dif} = 0 < 1$ A esto garantiza que el relé no dispara. La gráfica muestra un comportamiento correcto del relé diferencial 87 en condiciones normales, donde $I_{dif} = 0$ A y no se activa el disparo. Cuando no hay fallas en el sistema las gráficas son las siguientes:

Figura 21.

Sistema sin fallas (Modelo ATP)



El capítulo final de trabajo de investigación se enfoca en el análisis de funcionamiento de la protección diferencial 87, mediante pruebas de experimentación en el módulo ya finalizado, para esto se desarrollan 3 ensayos que permitan evaluar el funcionamiento de la protección diferencial 87 tanto en el lado primario como secundario del transformador o la entrada (Input 1) o (Input 2) del Solid state protective relay. De esta forma, logramos obtener las curvas características de disparo del relé aplicando el método clásico para realizar las respectivas pruebas. Además, se emplea un método alternativo para la obtención de las curvas de voltaje y corriente, utilizando el microcontrolador Esp32 el cual trabaja con el servidor de Think Speak de la herramienta Matlab. Estas pruebas son fundamentales para caracterizar el



UNIVERSIDAD TÉCNICA DEL NORTE

Acreditada Resolución Nro. 173-SE-33-
CACES-2020



FACULTAD DE INGENIERÍA EN CIENCIAS APLICADAS

funcionamiento y permiten obtener información para el análisis y comprensión de los datos. El ensayo que se realiza para evaluar el relé es el siguiente:

- Test Procedures – General
- Restrained Pickup Verification
- Unrestrained Pickup Verification

A continuación, se presenta los diferentes pasos que se necesitan para alimentar el relé diferencial

4.1.2. Test Procedus – General

El relé BE1-87T viene calibrado de fábrica y se ha comprobado su correcto funcionamiento. están sellados. Inmediatamente después de recibir el relé, o después de un servicio prolongado, se recomienda que se realicen las "Pruebas de verificación" que se indican a continuación. Estas pruebas exhaustivas verifican todos los parámetros de funcionamiento, incluido el calibrado.

Para la confirmación rutinaria de la viabilidad esencial del relé, se puede encontrar un procedimiento de prueba simplificado en otra parte de esta sección, bajo el título "Pruebas de verificación". De igual manera, para la confirmación rutinaria de la viabilidad esencial del relé, se puede encontrar un procedimiento de prueba simplificado en otra parte de esta sección bajo el título "Procedimiento de prueba operativa".

Antes de iniciar un programa de pruebas, compruebe el número de modelo del relé con la Tabla de Identificación de Números Serie de la página 1-4 del manual de usuario para identificar el relé. de la página 1-4 para identificar las características y opciones específicas que se van a probar. Consulte el Manual de Servicio del BE1-87T (publicación 9 1713 00 620) para los procedimientos de calibración y solución de problemas de averías. En ubicación de los interruptores y Controles se debe verificar el Anexo V – Figura 2-2 Ubicación de controles e indicadores 1 fase del Manual de Usuario BE1-87.



4.1.2.1. Equipo Necesario

Se requiere el siguiente equipo de prueba (o equivalente).

1. Dos fuentes de corriente, con salidas de corriente reguladas independientemente. Deben poder producir salidas desfasadas 180°.
2. Contador, rango de 0 a 1/2 segundo.
3. Dos clavijas de prueba, Basler N/P 10095.
4. Tarjeta extensora, Basler P/N 9 1655 00 100 (Figura 5-1 manual de usuario BE1-87)
5. Medidor de ángulo de fase u osciloscopio con un enchufe sin conexión a tierra o transformador de aislamiento de tierra.

4.1.3. Pruebas de verificación

A continuación, se presenta una prueba exhaustiva que verifica todos los parámetros de funcionamiento del relé diferencial de transformador, incluida la calibración. Para la confirmación rutinaria de la viabilidad esencial del relé, se encuentra un procedimiento de prueba simplificado cerca del final de esta sección bajo el título "Procedimiento de prueba operativa". Los distintos temas de este grupo son independientes, lo que facilita centrarse en un problema concreto de interés. No obstante, todas estas pruebas deben realizarse antes de poner el relé en servicio.

La corriente suministrada a los terminales de entrada del relé no debe superar los 20 A ni 250 A durante 1 segundo. Cuando se superen los 20 A se debe prever la interrupción automática de la corriente de detección tras un intervalo de tiempo adecuado que puede calcularse mediante la ecuación:

$$I = \sqrt{\frac{K}{t}} \quad (8)$$



Donde I es el tiempo (en segundos) que fluye la corriente, y K = (250, o 50 veces la derivación, lo que sea menor.

4.1.3.1. Datos generales del relé diferencial 87

- Numero de modelo BE1- 87T
- Una fase, dos entradas
- Dos contactos normalmente abiertos (Restrained y Unrestrained)
- Alimentación 125 Vdc y 100/120 Vac
- Tiempo de operación instantáneo
- Rango de entrada de detección 2.0 – 8.9 Amp

4.1.3.2. Comportamiento del relé 87T

En una configuración monofásica, es fundamental considerar las características del sistema eléctrico. Con una alimentación de 110 voltios y un consumo total de 4.200 watts distribuidos en seis resistencias conectadas en paralelo, se debe calcular la corriente total del circuito para garantizar que el relé opere correctamente. Utilizando la fórmula:

$$P = V * I \quad (9)$$

La corriente total corresponde a:

$$I = P / V = 4.200 \text{ W} / 110 \text{ V} = 38,18 \text{ A} \quad (10)$$

Cada resistencia, al estar en paralelo, tendrá el mismo voltaje de 110 V, pero la corriente se dividirá entre ellas, resultando en aproximadamente 6,36 A por resistencia (38,18 A / 6). El relé diferencial 87 debe configurarse para detectar desbalances entre las corrientes de entrada y salida, asegurando una protección efectiva contra fallas internas. Es crucial verificar la



FACULTAD DE INGENIERÍA EN CIENCIAS
APLICADAS

sensibilidad y los umbrales de operación del relé, así como utilizar instrumentos de medición precisos para validar las lecturas de corriente y voltaje durante las pruebas.

Las cargas conectadas en el módulo son en total seis resistencias las cuales están conectadas en paralelo y son las que se utilizan para provocar la falla en el módulo experimental y hacer que el relé se dispare emulando una falla en el lado primario o secundario del relé 87 esto se realiza conectando las tres resistencias y al sumar las cargas podremos llegar al umbral de corte el cual está configurado con el set del relé, estas tendrán el mismo voltaje, pero diferentes corrientes a continuación se detallan estos valores:

- R1: $1200 \text{ Watts} / 110\text{V} = 10.9 \text{ A}$
- R2: $1200 \text{ Watts} / 110\text{V} = 10.9 \text{ A}$
- R3: $750 \text{ Watts} / 110\text{V} = 6.81 \text{ A}$
- R4: $750 \text{ Watts} / 110\text{V} = 6.81 \text{ A}$
- R5: $600 \text{ Watts} / 110\text{V} = 5.45 \text{ A}$
- R6: $600 \text{ Watts} / 110\text{V} = 5.45 \text{ A}$

4.1.3.3. Restrained pickup verification

Paso 1. Conecte el relé como se muestra en el Anexo X – Figura 5-2 Tabla de conexiones de entradas y salidas del Manual de Usuario BE1-87, empezando por los terminales de entrada 11 y 13 para las pruebas iniciales. No aplique alimentación en este momento.

Paso 2. Observando las precauciones indicadas en las tres primeras páginas de la Sección 4, saque el relé de su caja y, a continuación, retire el panel frontal para acceder a los circuitos impresos.

Paso 3. Retire las tarjetas de circuito impreso Analog #1 (una por fase). Luego como se presenta en el Anexo Y – Figura 4-8 Los puentes de puesta a tierra de entrada no utilizados del Manual de Usuario BE1-87, conecte los puentes de puesta a tierra de entrada (J1, J2 y J3) a la posición de desactivación.



UNIVERSIDAD TÉCNICA DEL NORTE

Acreditada Resolución Nro. 173-SE-33-
CACES-2020



FACULTAD DE INGENIERÍA EN CIENCIAS APLICADAS

Una vez finalizada la prueba (y antes de poner el relé en servicio), puede ser necesario reposicionar los jumpers. Para más información, consulte la sección (Reposicionamiento de entradas no utilizadas) en la página 4-11 del manual del relé 87.

Paso 4. Sólo unidades trifásicas: Verifique que todos los puentes de Compensación de Desplazamiento de Fase de 30° en la Analog Board #2 como se muestra en el Anexo AA – Figura 4-2 Terminales del modulo una fase del Manual de Usuario BE1-87, estén en la posición WYE. Si no es así, reposicione estos puentes.

Paso 5. Coloque todas las placas de circuito y vuelva a montar el relé.

Paso 6. Verifique en el Anexo R – Tabla 1-1 múltiplos del Tap Manual de usuario BE1-87 y el Anexo Z – Figura 1-2 Tiempos de respuesta Manual de Usuario BE1-87 las características de los múltiplos de toma y el porcentaje de restricción. Ajuste los conmutadores RESTRAINED PICKUP LEVEL, y los conmutadores INPUT 1 e INPUT 2 tap mostrados en el Anexo S – Tabla 5-5 Tiempo Manual de usuario BE1-87.

Paso 7. Si el relé tiene más de 2 entradas, vuelva a conectar el relé sustituyendo los terminales de entrada 3 por los terminales de entrada 2 (Anexo X – Figura 5-2 Tabla de conexiones de entradas y salidas del Manual de Usuario BE1-87) que se encuentra en el apartado de anexos. A continuación, repita el paso 6, utilizando los valores de la entrada 2 que se encuentran en el Anexo U – Tabla 5-1 Prueba de recogida con retención Manual de usuario BE1-87, para la entrada 3. Si hay más de tres entradas (como en algunos relés monofásicos), continúe sustituyendo la entrada 2 por cada entrada numerada más alta (Anexo X – Figura 5-2 Tabla de conexiones de entradas y salidas del Manual de Usuario BE1-87), comparando cada vez la entrada bajo prueba con la entrada 1, como en el paso 6.

Relés trifásicos: Repita los pasos 6 y 7 para las fases B y C.

Tabla 12.

Restraint pickup test (manual de usuario tabla 5-1, pág. 54 BE1-87)



FACULTAD DE INGENIERÍA EN CIENCIAS
APLICADAS

Configuración de recogida restringida		Input 1						Input 2		Reduce la corriente de entrada 2 hasta la activación
Posición	% Pendiente	Tap	I input	X Tap	Tap	I input	X Tap			
A	15	2.0	2.0	1	3.8	3.8 A	1	2.47 ± 0.15 A		
A	15	2.0	4.0	2	3.8	7.6 A	2	4.94 ± 0.30 A		
A	15	2.0	6.0	3	3.8	11.4 A	3	9.69 ± 0.58 A		
A	15	2.0	10.0	5	3.8	19.8 A	5	16.15 ± 0.97 A		

En la **Tabla 12** Restraint pickup test se menciona las 4 posiciones que se utilizó en las pruebas de activación, aunque en el manual de usuario se muestran más configuraciones del Tap, se utilizaron solo estas 4 por las limitaciones de la carga que usamos en el módulo llegando a tener una corriente en total de 16 A en la configuración de 6 niquelinas conectadas en paralelo.

4.1.3.4. Verificación del interruptor de entrada.

Cada entrada se escala utilizando una combinación de dos conmutadores rotativos (Anexo V – Figura 2-2 Ubicación de controles e indicadores 1 fase del Manual de Usuario BE1-87). Aunque estos interruptores se prueban en fábrica, pueden verificarse como sigue.

Paso 1. Determine el tipo de entrada de detección del relé examinando el primer dígito del número de estilo en el panel frontal del relé con referencia a la lista siguiente.

- A - monofásico, dos entradas
- B - monofásico, tres entradas
- C - monofásico, cuatro entradas
- D - monofásico, cinco entradas
- E - trifásico, dos entradas cada fase



FACULTAD DE INGENIERÍA EN CIENCIAS
APLICADAS

F - trifásico, tres entradas cada fase.

En este caso se posee el rele diferencial 87 con dos entradas monofásico que es de Nomenclatura tipo A.

Paso 2. Conecte la entrada que se está probando a la fuente de corriente.

Paso 3. Ajuste la entrada bajo prueba a la posición de toma 3.9. Ponga el interruptor en la posición A (15%). Aplique corriente a la entrada bajo prueba, incrementando la corriente hasta que el LED restrained se ilumine. En este punto la corriente de entrada debe ser de $1,36 A \pm 6\%$.

Paso 4. Repita el paso 3 para las posiciones TAP adicionales que se muestran en la **Tabla 13**, se debe tomar en cuenta que la activación se produce a $0.35 X Tap$.

Tabla 13.

Verificación de entrada (manual de usuario tabla 5-3, pág. 56 BE1-87)

Posición del Tap	Rango de corriente de entrada en la recogida
3.9	1.18 – 1.55 A
4.3	1.31 – 1.70 A
6.4	2.01 – 2.47 A
7.8	2.47 – 2.99 A

Paso 5. Pruebe las otras entradas reconectándolas al siguiente par de terminales como muestra el Anexo X – Figura 5-2 Tabla de conexiones de entradas y salidas del Manual de Usuario BE1-87 y repitiendo los pasos 3 y 4. (La finalización satisfactoria de estas pruebas



FACULTAD DE INGENIERÍA EN CIENCIAS
APLICADAS

verificará la integridad eléctrica de la entrada), y repitiendo los pasos 3 y 4. (La realización con éxito de estas pruebas verificará la integridad eléctrica de todos los conmutadores de tomas.

4.1.3.5. Unrestrained pickup verification

Antes de proceder, tenga en cuenta que la corriente suministrada a los terminales de entrada del relé no debe superar los 20 A continuos ni los 250 A durante 1 segundo.

Paso 1. Coloque los interruptores INPUT 1 (toma) en la posición 2.0 A. Conecte el relé como se muestra en el Anexo X – Figura 5-2 Tabla de conexiones de entradas y salidas del Manual de Usuario BE1-87, utilizando los terminales 11 y 13 (que es la entrada 1 para los relés monofásicos y trifásicos).

Paso 2. Coloque el conmutador UNRESTRINED PICKUP LEVEL en la posición A (6x tap). Aumente la corriente de entrada hasta que se ilumine el LED UNRESTRAINED (no tenga en cuenta el LED RESTRAINED TRIP). Esto debe ocurrir a 12.0 A+3% como se muestra en el Anexo T – Tabla 5-4 Verificación de recogida sin retención Manual de usuario BE1-87.

Paso 3. Repita el paso 2, utilizando las otras posiciones del conmutador UNRESTRINED PICKUP.

Paso 4. Si el relé es trifásico, repita los Pasos 1 a 8 para la Fase B de la entrada 1 (terminales 12 y 13) y la Fase C de la entrada 1 (terminales 14 y 13).

Tabla 14.

Verificación de entrada (manual de usuario tabla 5-4, pág. 56 BE1-87)

Unrestrained pickup level	Input 1 Tap position	Input Current Pickup $\pm 3\%$
A (6x TAP)	2.0	12.0 A



J (14x TAP)	2.0	28.0 A
S (21x TAP)	2.0	42.0 A

La **Tabla 14** indica la configuración del tap que vamos a utilizar nosotros en la parte frontal del rele ubicamos las entradas input 1 e input 2 en los cuales mediante una perilla de rotación pondremos en la posición 2.0 de las dos entradas, de esta manera el rele entenderá que se activará cuando sobrepase el valor de los 12 A continuos y realizará el corte y proteger el sistema.

4.1.3.6. Verificación de tiempo de respuesta.

Paso 1. Conectar el relé Conecte el relé según corresponda como se muestra en los Anexo X – Figura 5-2 Tabla de conexiones de entradas y salidas del Manual de Usuario BE1-87.

Paso 2. Coloque el interruptor RESTRAINED PICKUP LEVEL (fase A) en A (15%). Coloque todos los interruptores INPUT en la posición de toma de 2,0 A.

Paso 3. Aplique 2,0 A 50 o 60 Hz, según corresponda al modelo, a la entrada 1 (terminales 11 y 13 en los modelos monofásico y trifásico), y a la Entrada 2 (terminales 12 y 13 en monofásicos y terminales 15 y 18 en trifásicos).

Paso 4. Realice un disparo restringido a 2 x Pickup aumentando la corriente de la Entrada 2 a 3,4 A. Observe el intervalo de tiempo entre el inicio de la falta simulada y el cierre del contacto de salida restringido. El tiempo de disparo debe ser inferior a lo mostrado en el Anexo T – Tabla 5-4 Verificación de recogida sin retención Manual de usuario BE1-87.

Paso 5. Repita el Paso 4 con IOP = 10 x Pickup. Observe que, con la Entrada 1 a 2.0 A, la corriente de la Entrada 2 debe ser de 9.0 A. El tiempo de disparo debe ser menor a lo mostrado en el Anexo T – Tabla 5-4 Verificación de recogida sin retención Manual de usuario BE1-87.



UNIVERSIDAD TÉCNICA DEL NORTE

Acreditada Resolución Nro. 173-SE-33-
CACES-2020



FACULTAD DE INGENIERÍA EN CIENCIAS APLICADAS

Paso 6. Sólo unidades trifásicas Sólo unidades trifásicas: Repita los Pasos 1 a 5 para las Fases B y C.

Paso 7. Coloque el interruptor de NIVEL DE RECOGIDA en la posición A (6 X TAP). Coloque todos los interruptores INPUT a la posición 2.0 A tap.

Paso 8. Con 0,0 A en la Entrada 1 (terminales 11 y 13), aplique 24 A (2 x Pickup) a la Entrada 2 (terminales 12 y 13 en monofásica y terminales 15 y 18 en trifásica). Observe el intervalo de tiempo entre inicio del fallo simulado y el cierre del contacto de salida no restringido. El intervalo debe ser menor a lo mostrado en el Anexo T – Tabla 5-4 Verificación de recogida sin retención Manual de usuario BE1-87.

Paso 9. Repita los Pasos 7 y 8 a 10 x Pickup. Observe que, con la Entrada 1 a 0.0 A, será necesario la corriente de la Entrada 2 a 120.0 A para un disparo sin restricción. El tiempo de disparo debe ser menor a lo mostrado en el Anexo T – Tabla 5-4 Verificación de recogida sin retención Manual de usuario BE1-87.

Paso 10. Sólo unidades trifásicas: Repita los pasos 8 y 9 para las fases B y C.

Tabla 15.

Tiempo: 5 A, 50 o 60 Hz (manual de usuario tabla 5-5, pág. 59 BE1-87)

Function	Differential current	Option 1-0 Timing Maximum		Option 1-1 Timing maximum
		50 Hz	60 Hz	50 or 60 Hz
Restrained Trip	2 x pickup	81 ms	70 ms	49 ms
Restrained Trip	10 x pickup	73 ms	67 ms	37 ms
Unrestrained Trip	2 x pickup	70 ms	57 ms	57 ms
Restrained Trip	10 x pickup	32 ms	28 ms	s



FACULTAD DE INGENIERÍA EN CIENCIAS
APLICADAS

En la Tabla 15 se puede observar los diferentes tiempos de respuesta del relé, el cual nos hace referencia hacia las dos respuestas de este tales como son el restrained trip, unrestrained trip, si la frecuencia es de 60Hz tendremos una respuesta si la corriente diferencial es de 2 x pickup en restrained el relé se activará a los 49 milisegundos, si la falla pasa en el unrestrained trip y este es a 10 x pickup tardara 57 milisegundos.

Paso 9. Repita los Pasos 7 y 8 a 10 x Pickup. Observe que, con la Entrada 1 a 0.0 A, será necesario la corriente de la Entrada 2 a 120.0 A para un disparo sin restricción. El tiempo de disparo debe ser menor al mostrado en el Anexo T – Tabla 5-4 Verificación de recogida sin retención Manual de usuario BE1-87.

4.1.4. Planeación de la medición de corriente y voltaje

Con una alimentación de 110 voltios y un consumo total de 3.900 watts distribuidos en seis resistencias conectadas en paralelo, se debe calcular la corriente total del circuito para garantizar que el relé opere correctamente. El diferencial 87 debe configurarse para detectar desbalances entre las corrientes de entrada y salida, asegurando una protección efectiva contra fallas internas. Es crucial verificar la sensibilidad y los umbrales de operación del relé, así como utilizar instrumentos de medición precisos para validar las lecturas de corriente y voltaje durante las pruebas de puesta en servicio.

4.1.4.1. Cálculo de potencia de consumo de las resistencias

Utilizando la fórmula:

$$P = V * I \quad (11)$$

Se obtiene la corriente total:

$$I = P / V = 4.200 \text{ W} / 110 \text{ V} \approx 38,18 \text{ A} \quad (12)$$

FACULTAD DE INGENIERÍA EN CIENCIAS APLICADAS

Cada resistencia, al estar en paralelo, tendrá el mismo voltaje de 110 V, pero la corriente se dividirá entre ellas, resultando en aproximadamente 6,36 A por resistencia ($38,18 \text{ A} / 6$) estos valores son cuando las 6 resistencias están conectadas, pero hemos dividido cada una de estas cargas dividiéndolas por circuitos que están conectados con los breakers de alimentación de cada una. Es importante verificar la sensibilidad y los umbrales de operación del relé, así como utilizar instrumentos de medición precisos para validar las lecturas de corriente y voltaje durante las pruebas de puesta en servicio.

4.2. Construcción de la estructura

Para la construcción del módulo se propuso realizar la estructura con un perfil de 10cm de acero inoxidable de forma cuadrada con las siguientes características 52cm de alto, 32cm de ancho y 30 cm de largo, con los cortes del perfil realizados se procedió a unir estos cortes con soldadura con electrodos 60/1.

Figura 22.

Estructura del modulo



Al finalizar la soldadura se procedió a pintar la estructura aplicando una primera capa de fondo blanco, al terminar el tiempo de secado de la primera capa, se aplicó una segunda y tercera capa de pintura negra de 400°C alta temperatura, aplicamos esta pintura ya que el

FACULTAD DE INGENIERÍA EN CIENCIAS APLICADAS

módulo va a estar sometido a temperaturas altas por las niquelinas, la pintura podrá soportar sin causar erosiones o agrietamientos.

4.2.1. Ubicación de los componentes en la estructura.

Finalizada la parte de construcción y pintura se procedió a ubicar los componentes que va a albergar la estructura, siendo estos el relé BE1-87, niquelinas, ventilador, estos componentes como van a quedar fijos se los ubico con distancias adecuadas para no afectar a cada una de ellas por cualquier circunstancia.

Las niquelinas de tipo plancha de 1500W se las fijo en las barras transversales de la parte inferior, el otro grupo de niquelinas de 750W se las fijo en la parte inferior trasera del gabinete, el tercer grupo de niquelinas de 600 W se las fijo en una barra transversal colocada en la mitad de la parte trasera del gabinete.

Figura 23.

Ubicación de los componentes



En la Figura 23 en la parte izquierda se puede ver que está ubicado en la parte frontal de la estructura el relé 87, este se ubicó en la parte superior izquierda, a una distancia considerable de las niquelinas distribuidas por el gabinete.

**FACULTAD DE INGENIERÍA EN CIENCIAS
APLICADAS**

4.2.2. Ubicación de las protecciones

Si nos ubicamos en la parte inferior derecha de la placa frontal del dispositivo encontraremos el cuadro rectangular en donde van ubicados los termomagnéticos que controlan la alimentación y las conexiones de cada una de las niquelinas, estas protecciones tienen en sus características que soportan una corriente de 16 amperios continuos.

Estos 6 breaker están conectados a las resistencias excepto uno de ellos que está directamente conectado a la alimentación del relé 87 este es el breaker marca Schneider el primero en la fila estos dispositivos están aferrados a un riel de tipo Din que este sujeto en la parte frontal inferior del módulo.

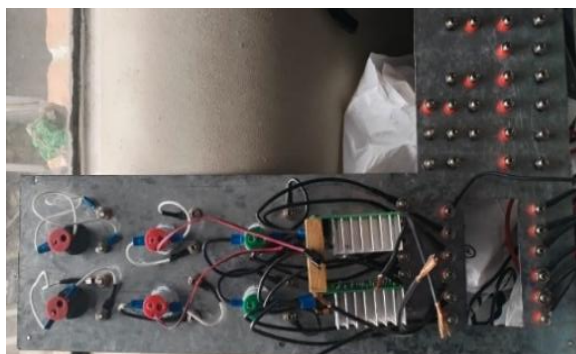
Figura 24.

Conexión de Protecciones del Sistema



4.2.3. Conexión interna del modulo

En esta parte de las conexiones internas del módulo, luego de leer cada una de las instrucciones del manual BE1-87T, se procede a realizar las conexiones necesarias con los elementos de fuerza y control que opera este dispositivo, en las imágenes siguientes se explicara cada uno de los elementos que constan en el gabinete en donde se alojan.

Figura 25.*Conexión interna del módulo BE1-87T*

En la Figura 25 se muestra gráficamente las conexiones realizadas internamente de la placa frontal del módulo, aquí podremos encontrar las conexiones de luces piloto con bocina, amperímetro, voltímetro, 2 dimmer de 4000W, breaker los cuales están conectados a los plugs hembras de tipo banana del módulo, adicionalmente podemos encontrar que los dimmer tienen 4 borneras de conexión etiquetadas con numeración del 1 al 4, siendo 1, 2 las entradas 3, 4 las salidas en estas conexiones encontraremos la parte frontal del módulo con conexiones hembra, diferenciadas con color negro Neutro, líneas de alimentación en color rojo.

En la Figura 26 se muestra gráficamente las conexiones tipo banana hembra que están listas para ser utilizadas en las diferentes conexiones que se realizarán para la alimentación de cada elemento del módulo experimental, en el lado derecho de la placa frontal evidenciamos los bloques de entrada 1 y entrada 2 del relé, donde constan luces piloto, amperímetro, voltímetro, y dimmer cada uno con sus conexiones.

Figura 26.

Parte frontal del módulo BE1-87T



4.3. Resultados

Para determinar los valores de voltaje, corriente y resistencia equivalente. Dado que las resistencias están en paralelo, el voltaje en cada una será el mismo, correspondiente al voltaje de alimentación del circuito.

Se tiene un voltaje de alimentación equivalente a:

$$V = 110 [V] \quad (13)$$

Por lo que la corriente en cada resistencia se calcula utilizando la fórmula:

$$I = P / V \quad (14)$$

Para las resistencias de 750 W se obtiene la corriente I_1 :

$$I_1 = 750 \text{ W} / 110 \text{ V} = 6.82 \text{ A} \quad (15)$$



Para las de 1500 W se obtiene la corriente I_2 :

$$I_2 = 1500 \text{ W} / 110 \text{ V} = 13.64 \text{ A} \quad (16)$$

Finalmente, para las de 600 W se obtiene la corriente I_3 :

$$I_3 = 600 \text{ W} / 110 \text{ V} = 5.45 \text{ A} \quad (17)$$

El relé con la configuración en las entradas 1 y 2 de 2.0 en ambas (valor de pickup), por lo que el dispositivo dispara la protección de la siguiente manera:

- 55 ms (con una entrada activa, corte a 14.8 A)
- 42 ms (con ambas entradas, corte a 19.8 A)

Al pasar 55 milisegundos, el corte se realiza a 14.8 A en la corriente restrained, solo conectando la entrada 1 y si conectamos las 2 entradas el corte se realiza cuando manipulamos los dimmer y giramos la perilla en un solo movimiento de menos a más se activa a los 19.8 A lo que produce la iluminación de los leds del relé en restrained y unrestrained pickup superando el corte de seteo el relé protegerá el sistema de fallas esto se realiza a 42 milisegundos.

La corriente total sin falla se calcula mediante:

$$I_{total} = I_1 + I_2 + I_3 = 6.82 + 13.64 + 5.45 = 25.91 \text{ A} \quad (18)$$

Obteniendo las resistencias equivalentes:

$$R_1 = \frac{V^2}{P_1} = \frac{110^2}{750} = 16.13 \Omega \quad (19)$$



FACULTAD DE INGENIERÍA EN CIENCIAS
APLICADAS

$$R2 = \frac{V^2}{P1} = \frac{110^2}{1500} = 8.07 \Omega \quad (20)$$

$$R3 = \frac{V^2}{P1} = \frac{110^2}{600} = 20.17 \Omega \quad (21)$$

Calculando la Resistencia Equivalente del sistema:

$$\left(\frac{1}{R1} + \frac{1}{R2} + \frac{1}{R3} \right)^{-1} = \left(\frac{1}{16.13} + \frac{1}{8.07} + \frac{1}{20.07} \right)^{-1} = 4.25 \Omega \quad (22)$$

Posteriormente se procede a comprobar los resultados del funcionamiento del relé diferencial, en donde se compara la corriente de entrada (I_{in}) y salida (I_{out}). Si hay un desbalance falla a tierra, dispara.

En cuanto a los ajustes del relé se coloca:

$$I_{restrained} = 14.8 A \text{ (1 entrada) o } 19.8 A \text{ (2 entradas).}$$

$$I_{unrestrained} = 2.0 \times I_{nominal}$$

Para obtener el tiempo de disparo con respecto a la corriente (1 entrada) se utiliza la siguiente expresión:

$$t = \frac{k}{I - I_0} + c \quad (23)$$

Donde k , I_0 y c son constantes del relé.

Con esto se obtienen las gráficas del comportamiento del tiempo de disparo con respecto a la corriente como se muestra en la Figura 27, apreciado que se tiene a los 55ms una

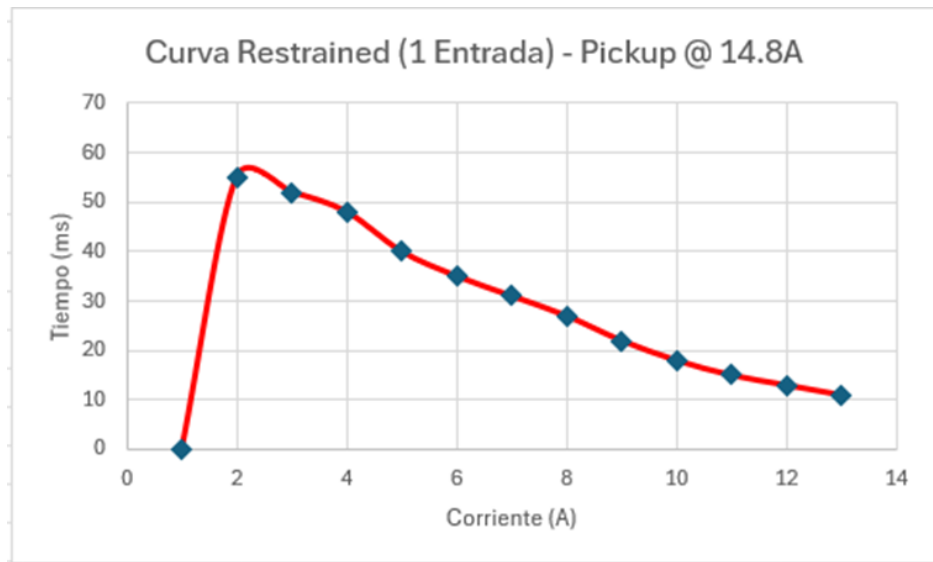
corriente de 14.8 A, y cuando incrementa esta corriente el tiempo va disminuyendo exponencialmente.

$$I = 14.8 A \rightarrow t = 55 ms \quad (24)$$

$$I > 14.8 A \text{ Tiempo disminuye exponencialmente} \quad (25)$$

Figura 27.

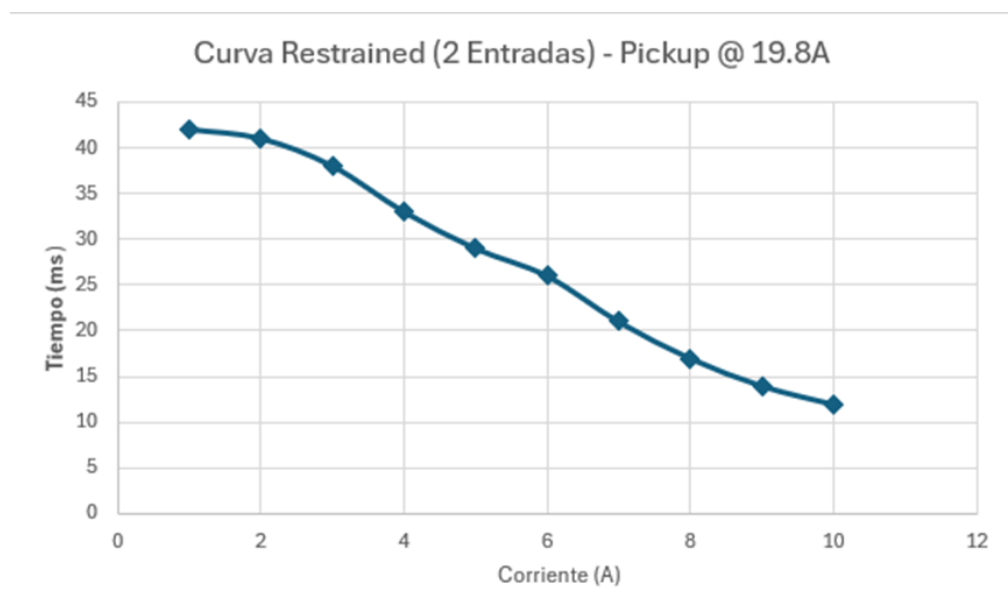
Curva Restrained (1 Entrada) - Pickup 14.8^a (Hoja de cálculo)



De igual manera se obtiene la gráfica del comportamiento del tiempo de disparo con respecto a la corriente, pero con 2 entradas como se muestra en la Figura 28, apreciado que se tiene a los 42ms una corriente de 19.8 A, y cuando incrementa esta corriente el tiempo va disminuyendo.

Figura 28.

Curva Restrained (2 Entradas) - Pickup @ 19.8A



Finalmente, se realiza el análisis del disparo con el dimmer, el cual funciona cuando se gira la perilla lo que produce que la corriente aumente bruscamente, ocasionando que el relé detecte lo siguiente:

- **Modo Restrained**

Si $I > 19.8$ A, dispara en 42 ms.

- **Modo Unrestrained**

Si $I \text{ diferencial} > 2.0 \times I \text{ nominal}$, dispara instantáneamente (ej., falla a tierra)

La protección restrained actúa contra sobrecargas > 14.8 A o > 19.8 A respectivamente, mientras que la protección unrestrained detecta fallas diferenciales como son cortocircuito a tierra. Para un ajuste recomendado hay que verificar, que $I_{\text{restrained}}$ sea mayor que la corriente nominal total (25.91 A) para evitar falsos disparos.



4.3.1. Operación del módulo experimental

Un relé de protección diferencial 87 monofásico debe comportarse de manera que detecte desbalances entre las corrientes de entrada y salida del sistema protegido, activando su disparo cuando la corriente diferencial supere un umbral preestablecido. En este caso, el relé está configurado para operar cuando la corriente diferencial excede 12 amperios, lo que indica una posible falla interna, como un cortocircuito o una fuga a tierra. El sistema se encuentra alimentado por 110 V y suministra una carga de 4200 W, misma que está distribuida en 6 resistencias divididas en dos sectores (entrada 1 y entrada 2), cada uno controlado por un dimmer que ajusta la carga. En condiciones normales, las corrientes de entrada y salida deben ser iguales, manteniendo la corriente diferencial en un valor cercano a cero. Sin embargo, al manipular los dimmer para desbalancear las cargas, se puede simular una condición de falla incrementando la corriente diferencial. Si este valor supera los 12 A, el relé debe actuar rápidamente, interrumpiendo el circuito para proteger el sistema de daños mayores.



Conclusiones

1. El desarrollo de sistemas de protección eléctrica, especialmente el relé diferencial 87, permite garantizar la seguridad y eficiencia en redes eléctricas. Estos dispositivos detectan desbalances entre corrientes de entrada y salida en equipos críticos (ej: transformadores, generadores), actuando ante fallas internas como cortocircuitos o fugas a tierra. Su configuración precisa, basada en parámetros como umbral de operación (ej: 12 A) y relación de transformación de TC, evita daños en infraestructuras y asegura la continuidad operativa. El diseño e implementación de esquemas de protección necesita de un análisis riguroso de los parámetros técnicos de los componentes.
2. Por medio del uso de herramientas como ATPDraw, se simulaban escenarios de falla y se validó la respuesta del relé diferencial 87 en condiciones controladas. Posteriormente, se realizaron pruebas experimentales en el módulo físico, midiendo corrientes y tiempos de operación para ajustar la sensibilidad del relé, mostrando que el sistema opera de manera eficiente ante desbalances, manteniendo la estabilidad de la red en donde se confirmó la efectividad del relé diferencial 87 en la detección de fallas.
3. Durante las simulaciones, el relé demostró una operación consistente al superar el umbral configurado (12 A), con tiempos de respuesta inferiores a 50 ms. En las pruebas prácticas, se verificó que la corriente diferencial se mantuvo cercana a cero en condiciones normales, mientras que, ante fallas internas, el disparo fue inmediato. Estos resultados muestran la importancia de integrar protecciones diferenciales en sistemas eléctricos para prevenir riesgos, optimizar la confiabilidad y garantizar la seguridad de personas y equipos.



Recomendaciones

1. Realice pruebas de inyección de corriente en múltiples puntos críticos de la curva característica del relé, especialmente cerca del valor de pickup, en la zona de operación rápida y en el límite de estabilidad, utilizando fuentes de alta precisión ($< \pm 0.5$ error). Esto garantizará que el módulo detecte falsos disparos causados por distorsiones no simuladas en modelos teóricos, así reduciendo los riesgos de desconexión innecesarias o fallas no detectadas en campo. La curva de operación del relé 87 es no lineal y sensible a transitorios (energización de transformadores), validando estas estrategias se asegura que el algoritmo de protección diferencial se comporte según estándares IEEE, ANSI, y se evite errores de saturación de T_c o un ruido electromagnético.
2. Integrar un sistema de adquisición de datos con muestreo ≥ 10 kHz y algoritmos de procesamiento de señales para correlacionar eventos de disparo de corriente diferencial y de restricción, diseñar secuencias automatizadas de inyección de corriente que cubran la zona de seguridad: $0.5-1.0 \times I$ pickup (no debe operar), punto pickup: $1.05-1.02 \times I$ pickup (tiempo mínimo de operación), alta corriente $> 5 \times I$ pickup (verificar una respuesta rápida si es menor a 20 ms (milisegundos)).



Referencias bibliográficas.

- [1] E. G. Barahona y G. A. Bonilla, «Evaluación del funcionamiento de la protección diferencial 87 en transformadores monofásicos ante presencia de fallas, mediante un prototipo didáctico,» Latacunga:, 2022.
- [2] M. Heredia y R. Intriago, «Análisis de sistemas trifásicos de transformadores conexión D - Y,» 2015.
- [3] R. I. Caiza y M. X. Ramos, «Análisis de la pendiente de operación del relé diferencial frente a fallas trifásicas en régimen permanente, aplicado a un banco de transformadores trifásicos Yd1,» 2019.
- [4] E. G. Delgado, «Diseño de protecciones eléctricas de la minicentral Espejo,» 2021.
- [5] S. K. Chattopadhyay y C. Chakraborty, «A New Asymmetric Multilevel Inverter Topology Suitable for Solar PV Applications With Varying Irradiance,» *IEEE Transactions on Sustainable Energy*, vol. 8, n° 4, p. 1496–1506, 2017.
- [6] I. R. Calero, «Protección de generadores eléctricos mediante relés microprocesados multifuncionales,» 2023.
- [7] J. Espinoza y P. Estupiñán, «Guía de selección de sistema de protección en subestaciones por medio de relés basados en microprocesadores aplicado en subestaciones de transmisión,» 2010.



- [8] A. m. y. s. e. m. d. l. p. d. e. t. d. potencia, «J. L. Rodríguez; G. D. Solís,» 2018.
- [9] M. Arana, M. Quiroz, C. González, C. Putlitz y A. Peña, «Estudio de cortocircuito mediante la simulación de sistemas eléctricos utilizando MATLAB, para mejorar la evaluación de impactos en la red. Una contribución al manual de prácticas de ingeniería eléctrica en el TECNIM,» *South Florida Journal of Development*, vol. 6, n° 3, pp. 01 - 21, 2025.
- [10] S. Das, S. Chanda, S. Chakraborty y S. Mitra, «Filling of charged cylindrical capillaries,» *Phys.*, 2014.
- [11] P. Vaca, «VERIFICACION DE LA COORDINACIÓN DE AISLAMIENTO DE LA SUBESTACION COTOCOLLAO DE LA EEQ.S.A.,» 2011.
- [12] H. Santiago y Á. Rodrigo, «Análisis del uso de la corriente de energización como método para la detección de fallas internas en transformadores,» 2017.
- [13] L. M. Dután, «Modelación y análisis del relee diferencial para transformadores de potencia con conexión YYd usando ATP-EMTP,» 2008.
- [14] J. A. Hidalgo y D. Benavides, «Diseño y automatización de una mesa para armado de núcleos de transformadores apilados llevando a cabo un correcto izaje en la empresa Tesla,» 2023.



UNIVERSIDAD TÉCNICA DEL NORTE

Acreditada Resolución Nro. 173-SE-33-
CACES-2020

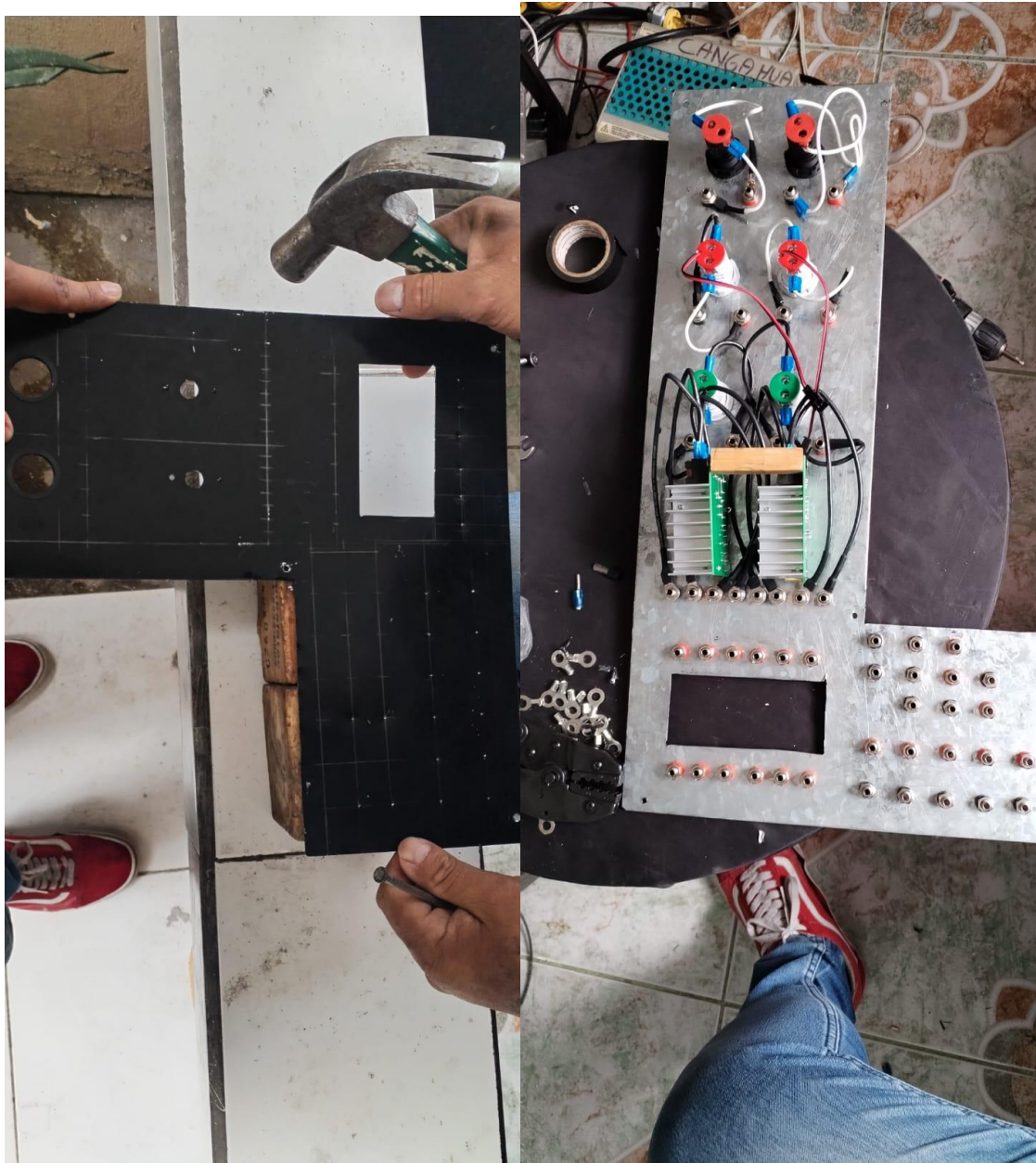


FACULTAD DE INGENIERÍA EN CIENCIAS APLICADAS

- [15] N. Fácil, «NEC Fácil.» 08 04 2024. [En línea]. Available: <https://necfacil.com/>.
- [16] A. D. Vizuite y J. F. Sares, «Diseño e implementación de un módulo didáctico de protecciones y sistemas eléctricos de potencia aplicado a sistemas de generación,» 2017.
- [17] A. D. Vizuite y J. F. Sares, «Diseño e implementación de un módulo didáctico de protecciones y sistemas eléctricos de potencia aplicado a sistemas de generación,» 2017.

Anexos

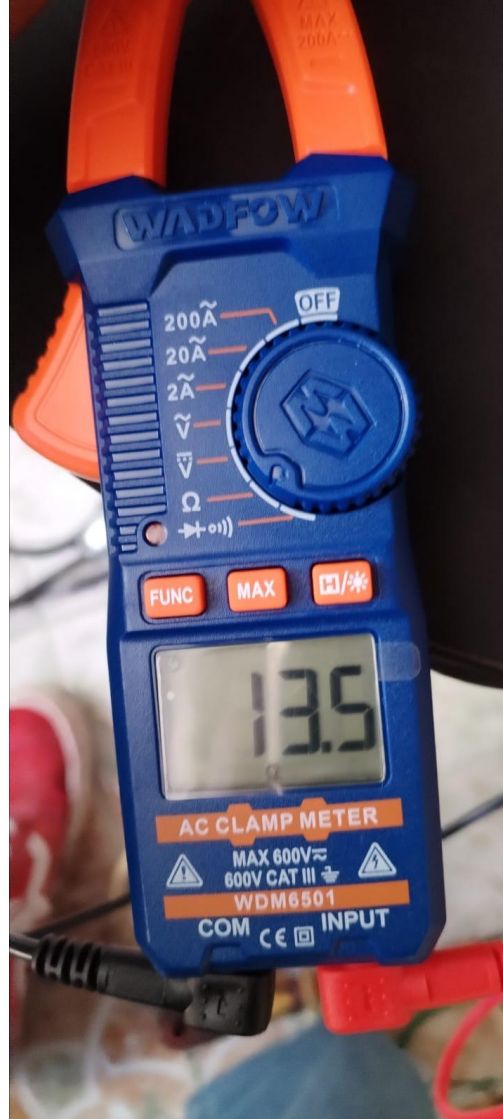
Anexo A – Marca para perforación de componentes módulo BE1 87T



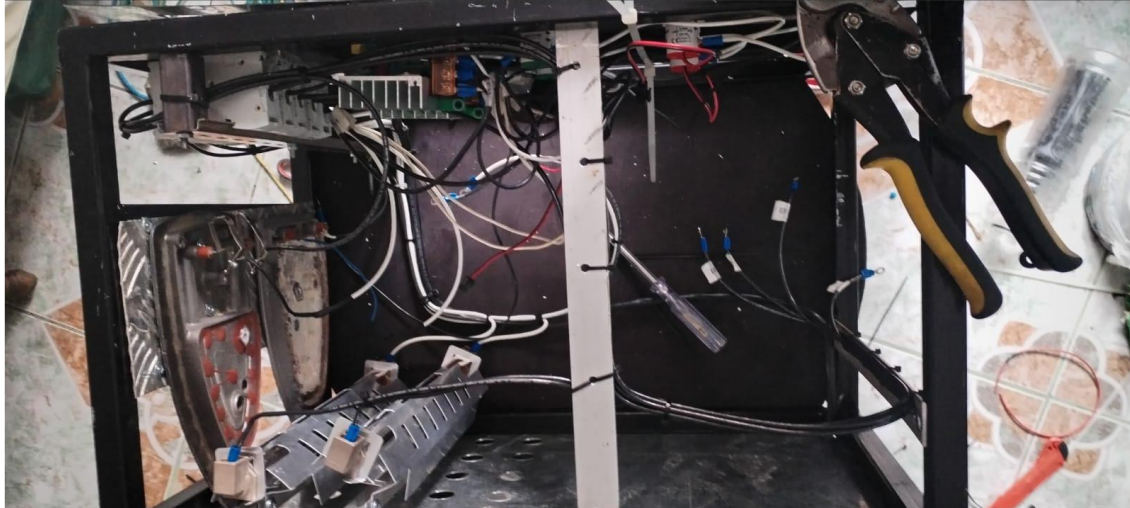
Anexo B – Ubicación de componentes módulo BE1 87T parte frontal



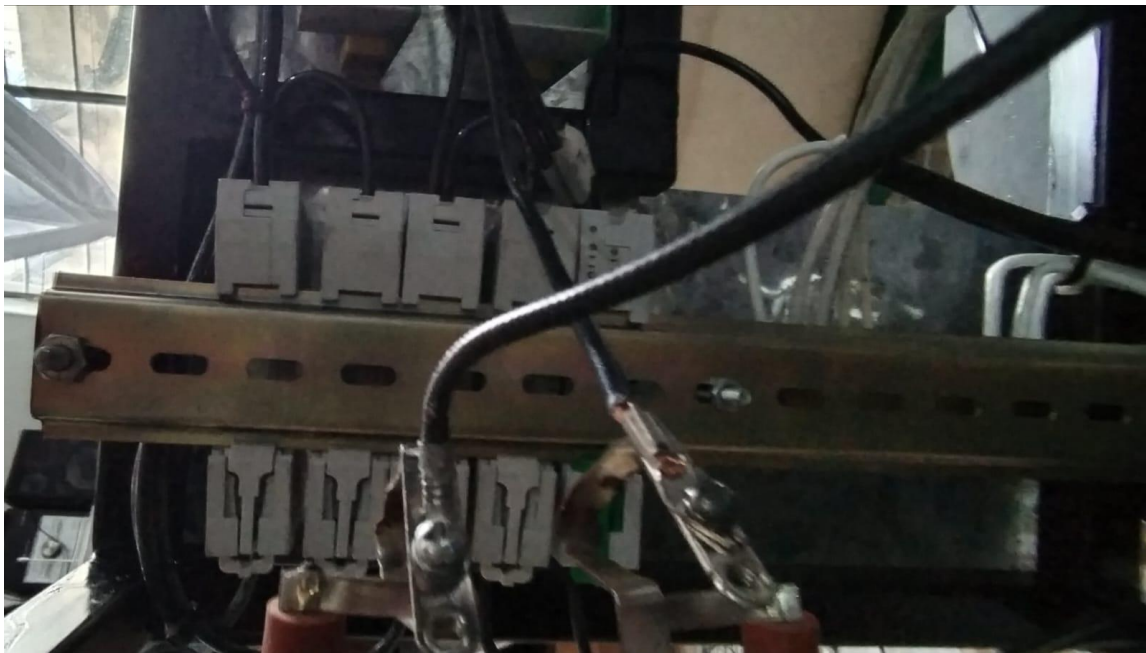
Anexo C – Medición de resistencia 13.5 Ohmios



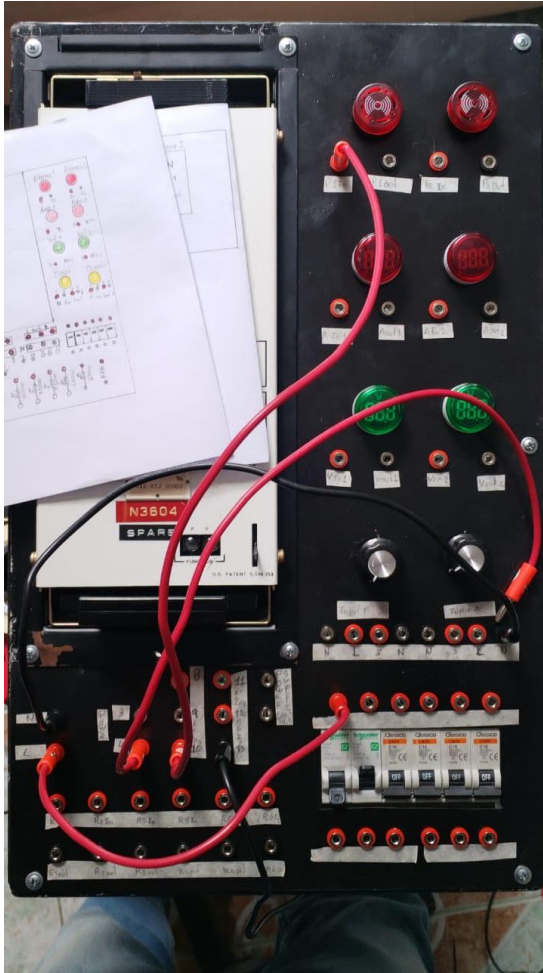
Anexo D – Vista lateral izquierda gabinete BE1-87



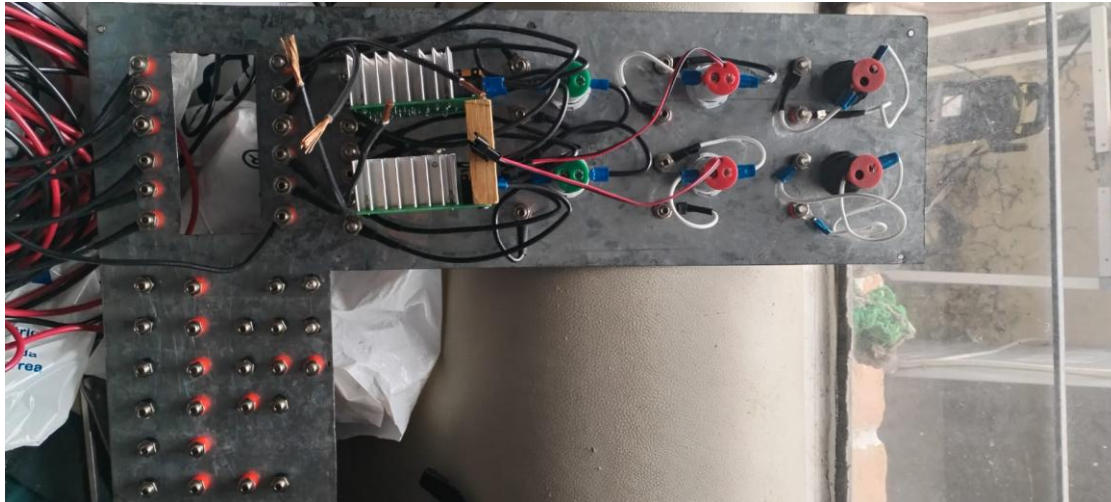
Anexo E – Vista posterior ubicación componentes de protección magnetotermico



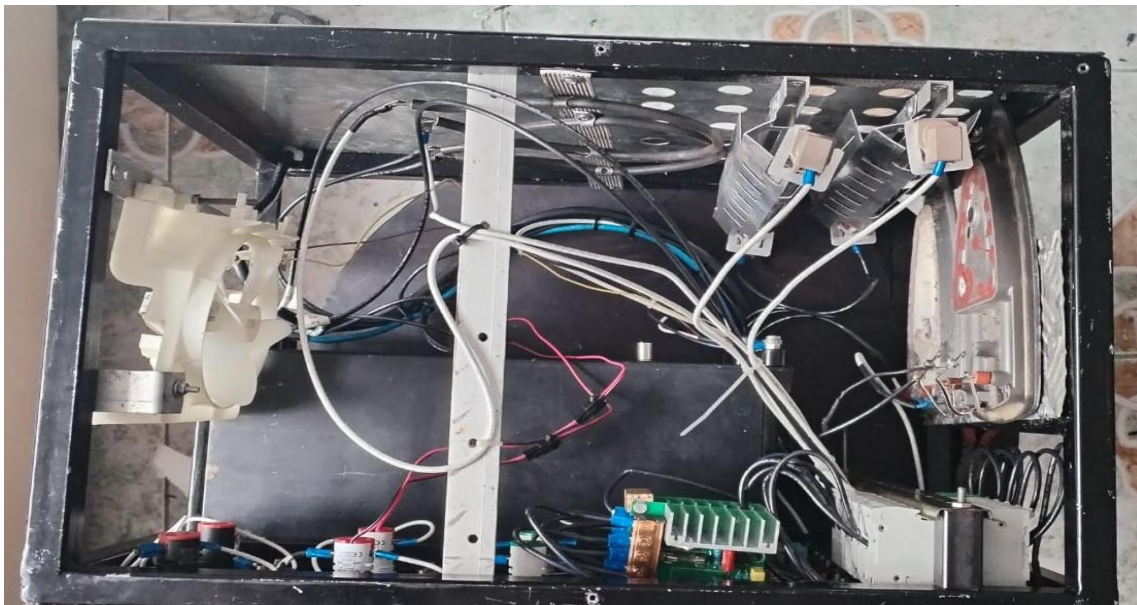
Anexo F – Medición resistencia conectada 12.3 Ohmios



Anexo G – Ubicación componentes vista trasera placa frontal modulo BE1- 87



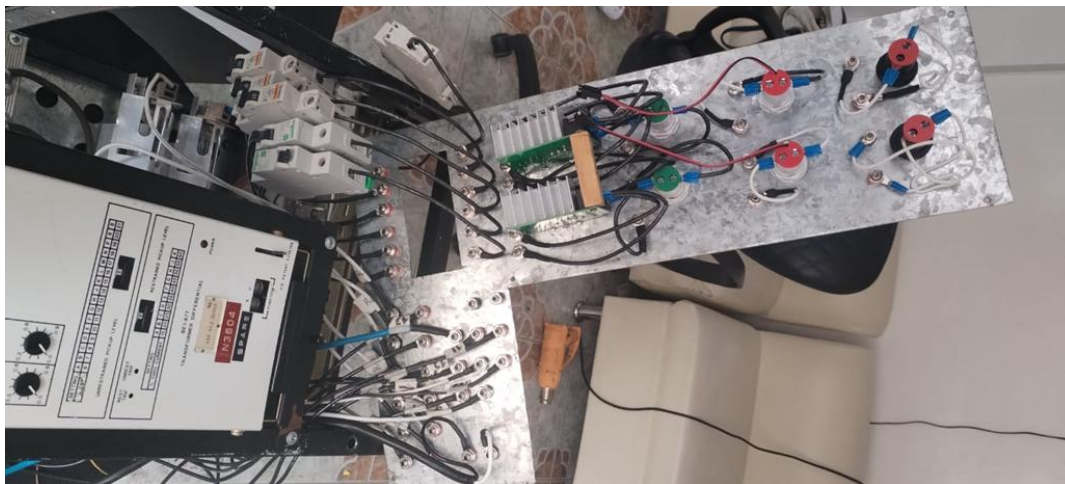
Anexo H – Ubicación de todos los componentes vista lateral derecha



Anexo I – Ubicación de todos los componentes vista trasera



Anexo J – Ubicación del cableado conectado al módulo BE1-87

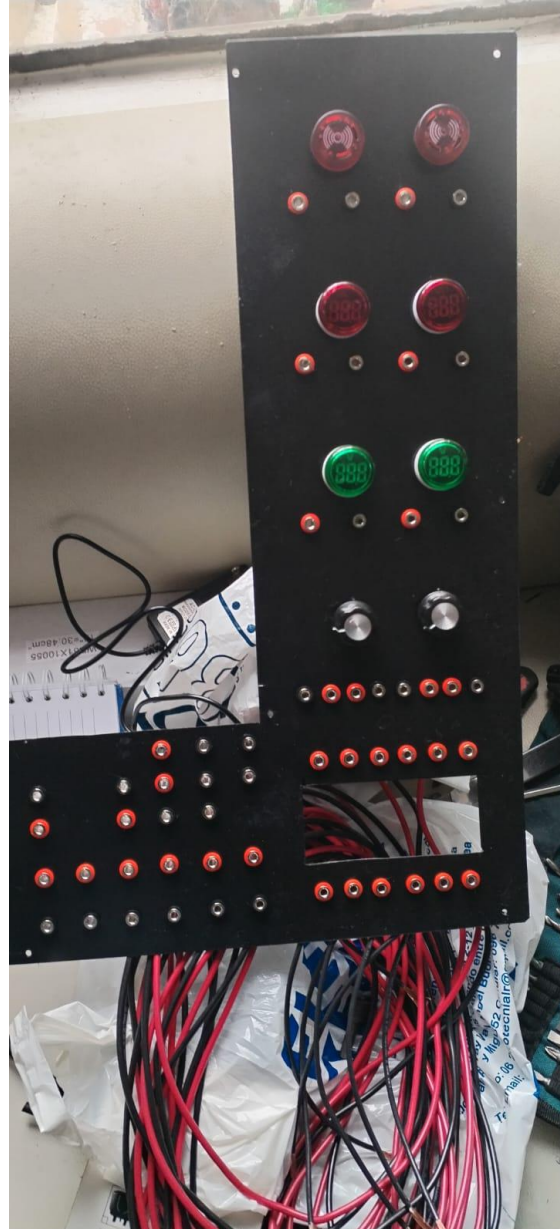
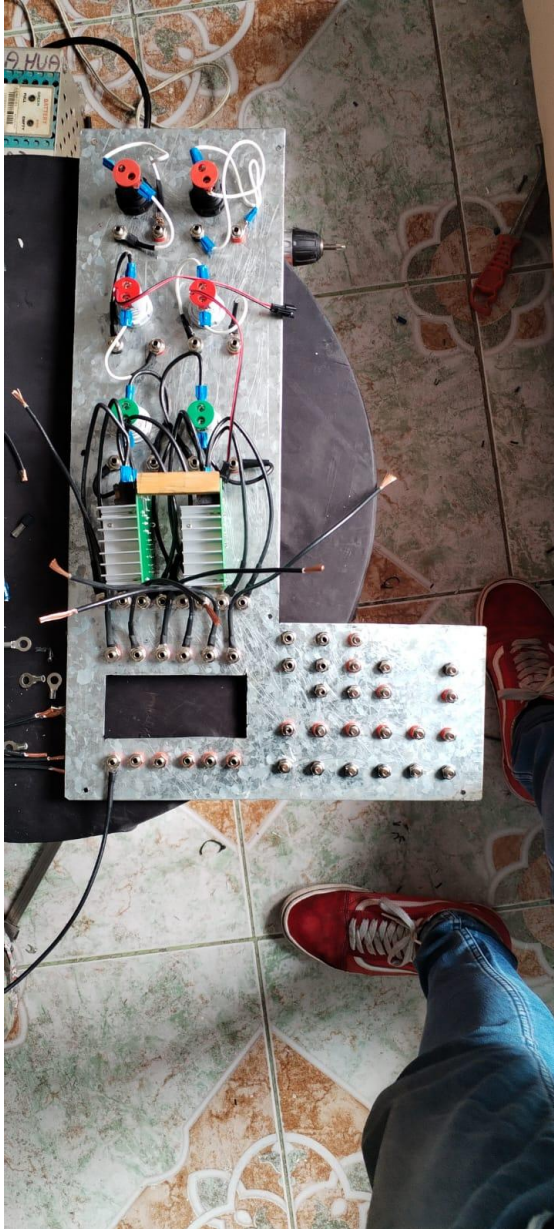


Anexo K – Ubicación de borneras tipo banana, luces piloto, dimmer

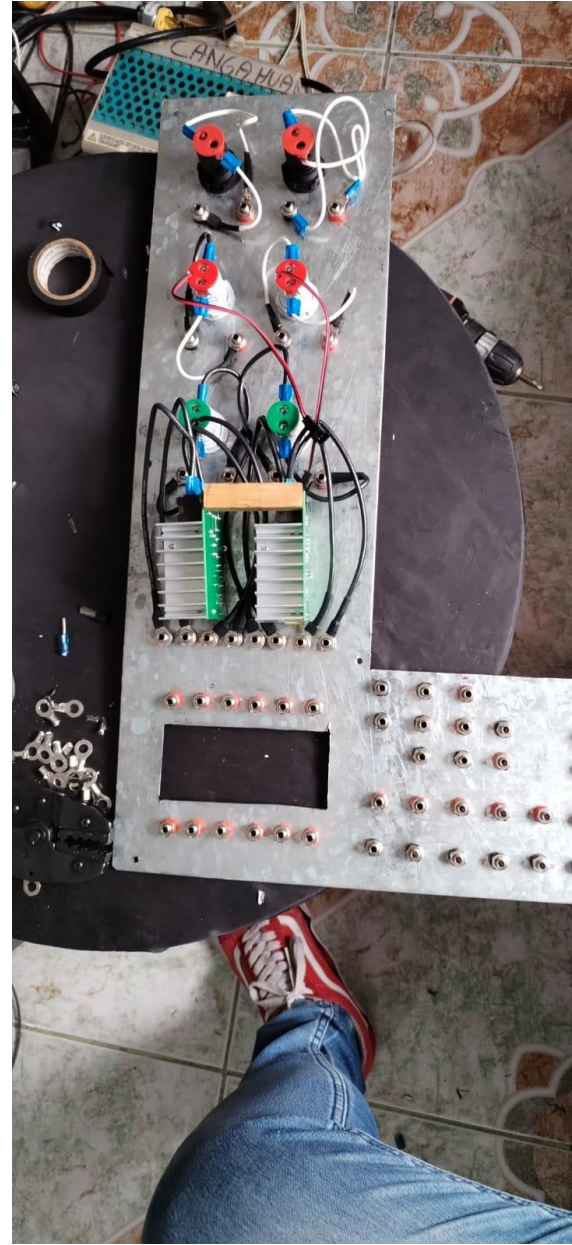


**FACULTAD DE INGENIERÍA EN CIENCIAS
APLICADAS**

Anexo L – Ubicación del cableado conectado voltímetro, amperímetro, dimmer



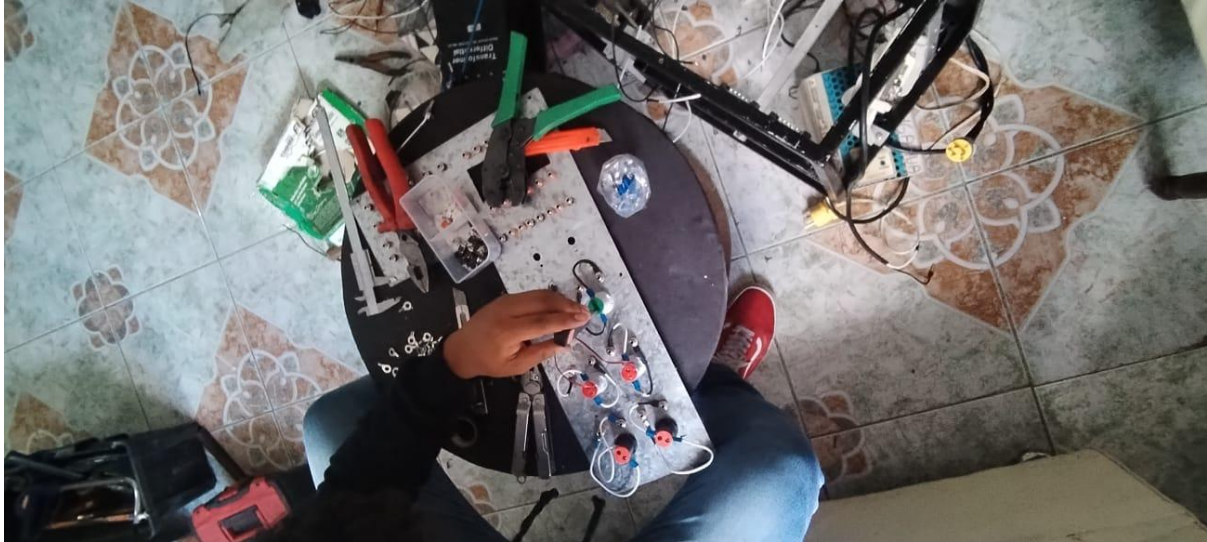
Anexo M – Ubicación borneras magnetotérmicos de resistencias, relé 87



Anexo N – Vista frontal modulo encajado en su estructura de almacenamiento



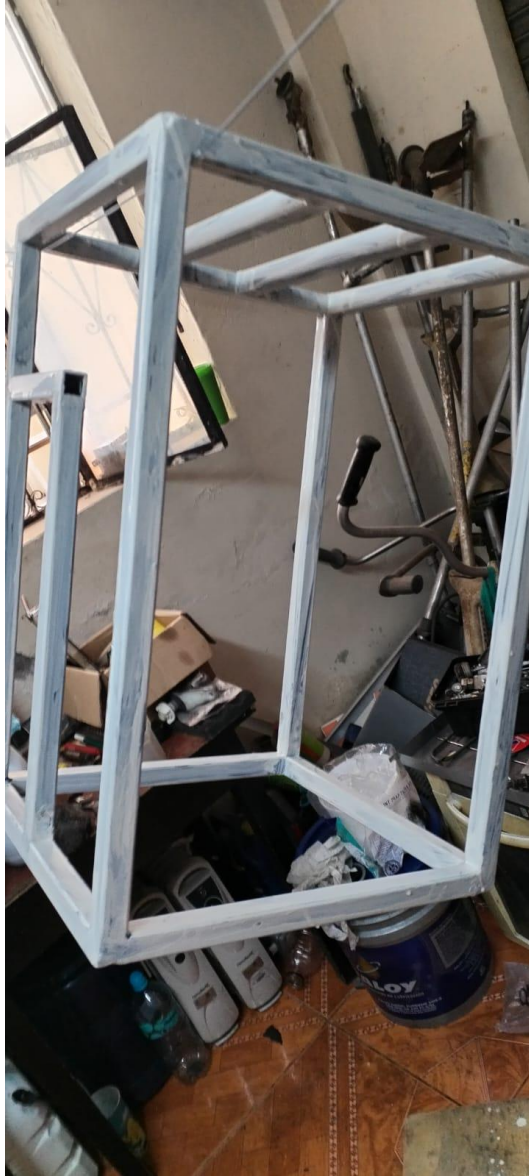
Anexo Ñ – Ubicación de las luces piloto con bocina placa frontal



Anexo O – Ubicación de todas las borneras en la placa frontal modulo BE1-87



Anexo P – Construcción gabinete en donde se alojarán todos los componentes del modulo



Anexo Q – Soldadura del gabinete en donde se alojará los componentes del modulo





UNIVERSIDAD TÉCNICA DEL NORTE

Acreditada Resolución Nro. 173-SE-33-
CACES-2020



FACULTAD DE INGENIERÍA EN CIENCIAS APLICADAS

Anexo R – Tabla 1-1 múltiplos del Tap Manual de usuario BE1-87

Table 1-1. Multiples of Tap

Front Panel Setting %	15	20	25	30	35	40	45	50	55	60
X Tap	2.33	1.75	1.40	1.17	1.00	0.875	0.778	0.700	0.636	0.583

Anexo S – Tabla 5-5 Tiempo Manual de usuario BE1-87

TABLE 5-5. TIMING

Function	Differential Current	Maximum Time
Restrained Trip	2 × tap	55 ms.
Restrained Trip	10 × tap	52 ms.
Unrestrained Trip	2 × pickup	44 ms.
Unrestrained Trip	10 × pickup	21 ms.

Anexo T – Tabla 5-4 Verificación de recogida sin retención Manual de usuario BE1-87

TABLE 5-4. UNRESTRAINED PICKUP VERIFICATION

Unrestrained Pickup Level	Input 1 Tap Position	Input Current at Pickup ±3%
A (6 × TAP)	2.0	12.0 A
J (14 × TAP)	2.0	28.0 A
S (21 × TAP)	2.0	42.0 A

FACULTAD DE INGENIERÍA EN CIENCIAS
APLICADAS

Anexo U – Tabla 5-1 Prueba de recogida con retención Manual de usuario BE1-87

TABLE 5-1. RESTRAINT PICKUP TESTS

Restrained Pickup Setting		Input 1			Input 2			Reduce Input 2 Current Until Pickup
Position	% Slope	Tap	I _{INPUT}	×Tap	Tap	I _{INPUT}	×Tap	
A	15	2.0	2.0	1	3.8	3.8 A	1	2.47 ± 0.15 A
A	15	2.0	4.0	2	3.8	7.6 A	2	4.94 ± 0.30 A
A	15	2.0	6.0	3	3.8	11.4 A	3	9.69 ± 0.58 A
A	15	2.0	10.0	5	3.8	19.0 A	5	16.15 ± 0.97 A
C	25	2.0	2.0	1	3.8	3.8 A	1	2.47 ± 0.15 A
C	25	2.0	4.0	2	3.8	7.6 A	2	5.70 ± 0.34 A
C	25	2.0	6.0	3	3.8	11.4 A	3	8.55 ± 0.51 A
C	25	2.0	10.0	5	3.8	19.0 A	5	14.25 ± 0.86 A
H	50	2.0	2.0	1	3.8	3.8 A	1	1.90 ± 0.11 A
H	50	2.0	4.0	2	3.8	7.6 A	2	3.80 ± 0.23 A
H	50	2.0	6.0	3	3.8	11.4 A	3	5.70 ± 0.34 A
H	50	2.0	10.0	5	3.8	19.0 A	5	9.50 ± 0.47 A
D	30	2.0	2.0	1	3.8	3.8	1	2.47 ± 0.15 A
D	30	2.0	6.0	3	3.8	11.4	3	7.98 ± 0.48 A
E	35	2.0	2.0	1	3.8	3.8	1	2.47 ± 0.15 A
E	35	2.0	6.0	3	3.8	11.4	3	7.41 ± 0.44 A
F	40	2.0	2.0	1	3.8	3.8	1	2.28 ± 0.14 A
F	40	2.0	6.0	3	3.8	11.4	3	6.84 ± 0.41 A
J	60	2.0	2.0	1	3.8	3.8	1	1.52 ± 0.09 A
J	60	2.0	6.0	3	3.8	11.4	3	4.56 ± 0.27 A

**FACULTAD DE INGENIERÍA EN CIENCIAS
 APLICADAS**

**Anexo V – Figura 2-2 Ubicación de controles e indicadores 1 fase del Manual de Usuario
 BE1-87**

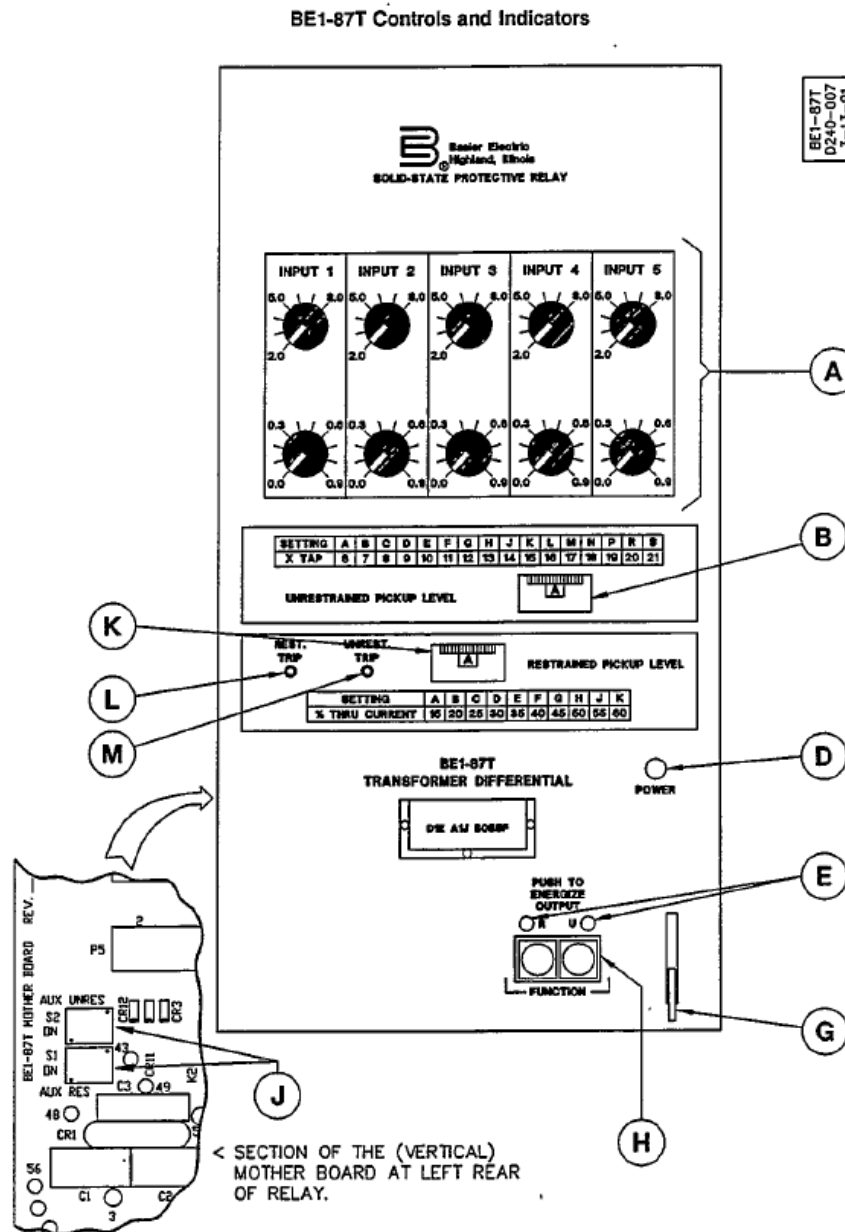


Figure 2-2. Location of Controls and Indicators for Single-Phase Unit

**FACULTAD DE INGENIERÍA EN CIENCIAS
 APLICADAS**

Anexo W – Figura 5-1 Ubicación de la placa extensora del Manual de Usuario BE1-87

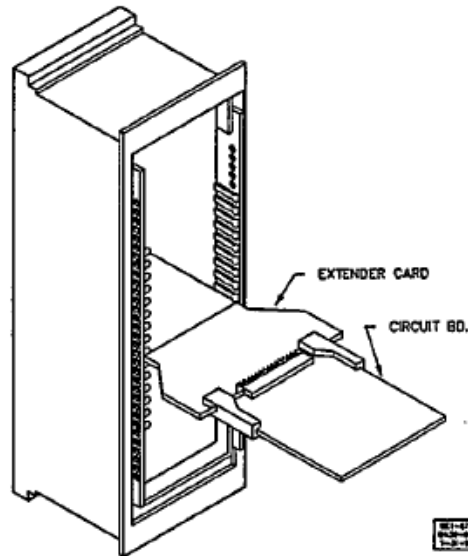


Figure 5-1. Illustrating Use of Extender Board

**Anexo X – Figura 5-2 Tabla de conexiones de entradas y salidas del Manual de Usuario
 BE1-87**

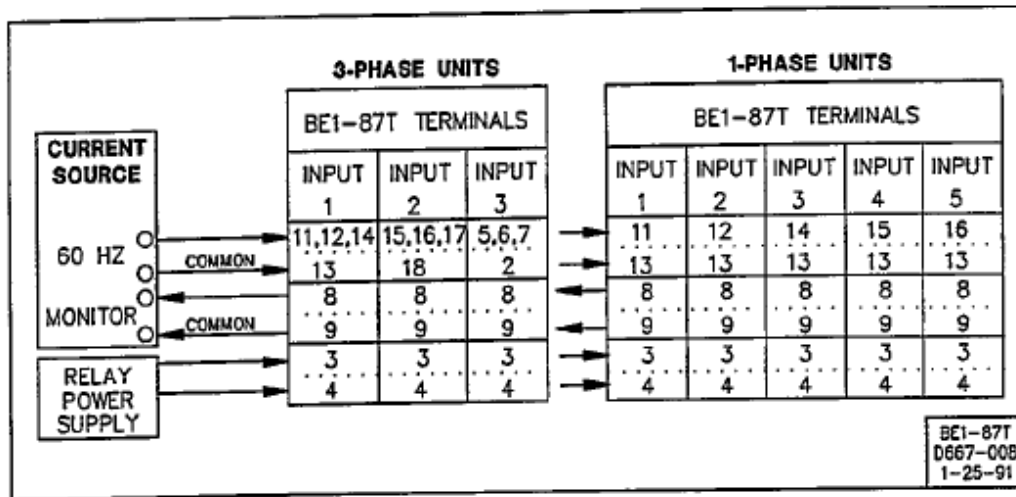
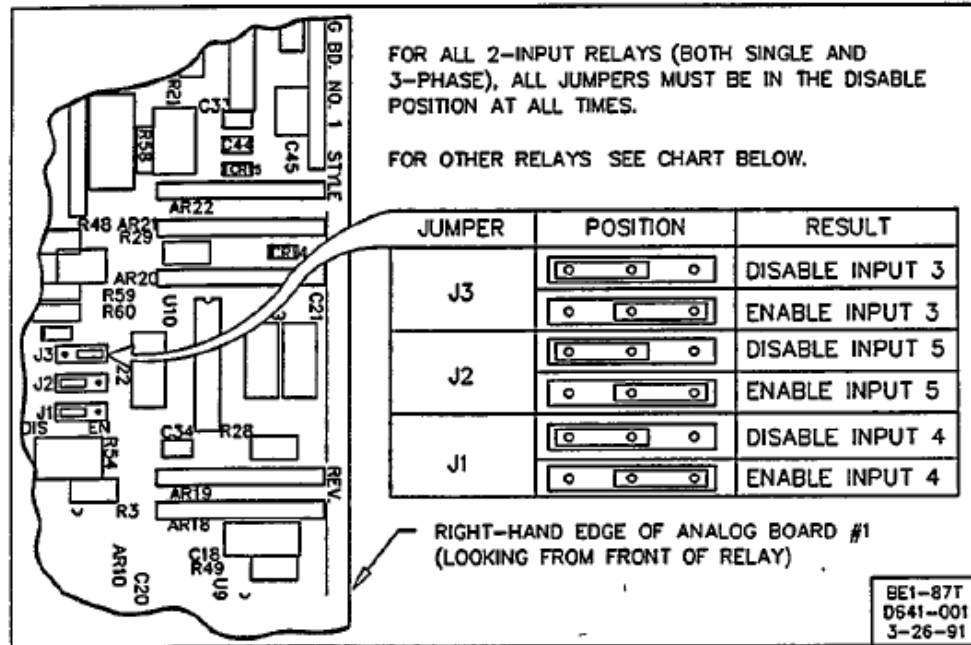


Figure 5-2. Test Setup

**FACULTAD DE INGENIERÍA EN CIENCIAS
 APLICADAS**

**Anexo Y – Figura 4-8 Los puentes de puesta a tierra de entrada no utilizados del Manual
 de Usuario BE1-87**



*Figure 4-8. The Unused-Input Grounding Jumpers
 (On Analog #1 printed circuit board.)*

Anexo Z – Figura 1-2 Tiempos de respuesta Manual de Usuario BE1-87

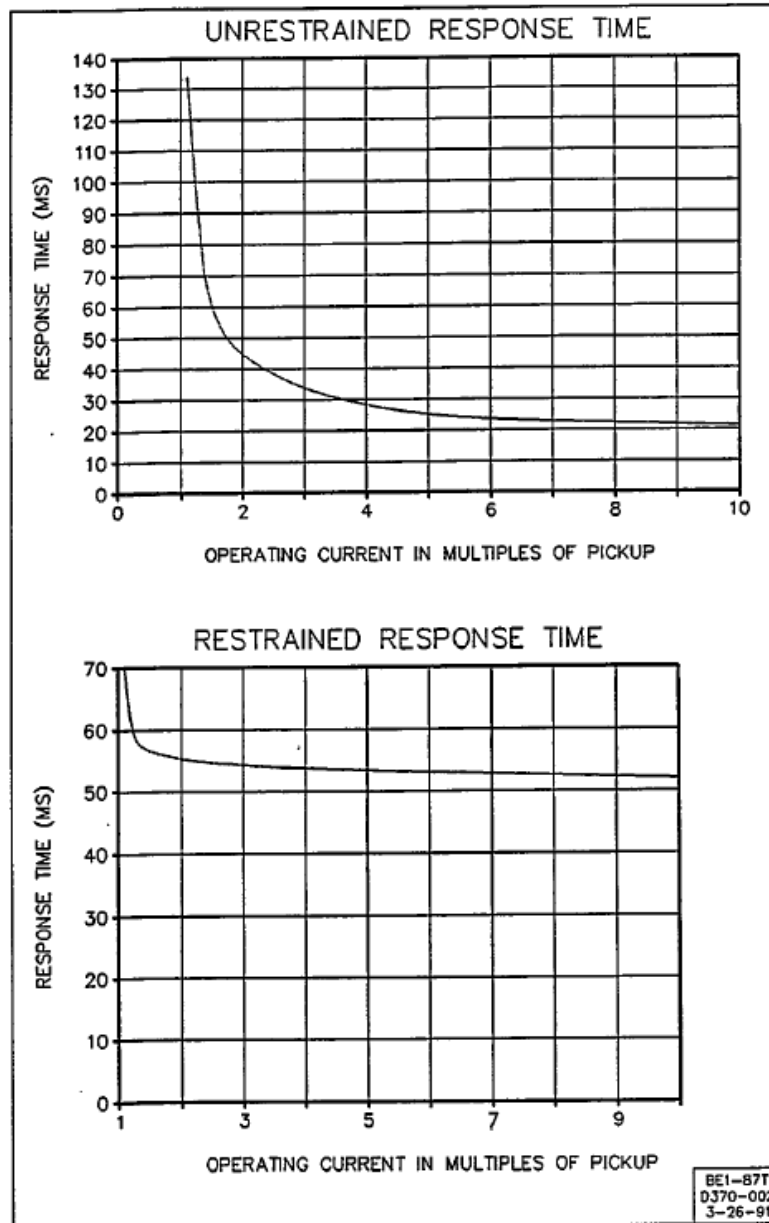


Figure 1-2. Response Times

**FACULTAD DE INGENIERÍA EN CIENCIAS
 APLICADAS**

Anexo AA – Figura 4-2 Terminales del modulo una fase del Manual de Usuario BE1-87

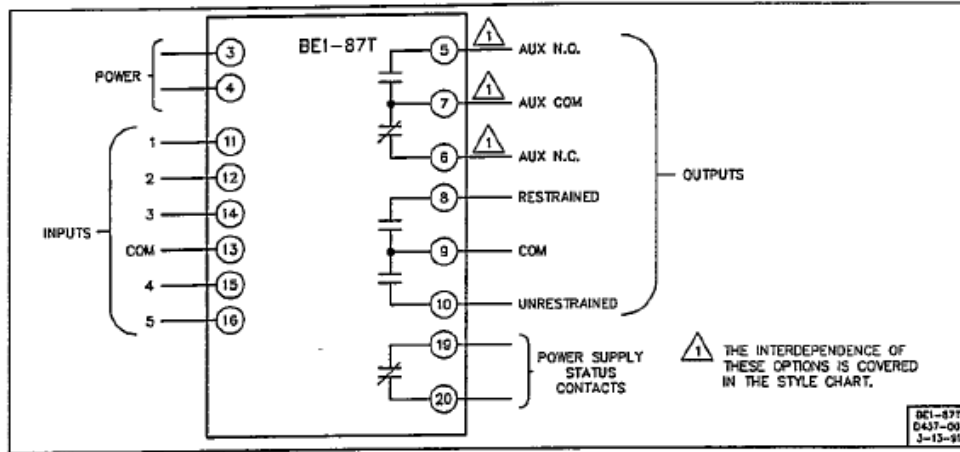


Figure 4-2. Case Terminals, Single-Phase

Anexo AB – Diagrama de conexiones Modulo BE1-87

