

Dirección Área de Conocimiento Industria y Producción

“Criterios y filosofía de protección de transformadores de potencia: aplicación a transformador 138/13.8 kv de 25 MVA”.

Trabajo monográfico para optar al título de Ingeniero Eléctrico

Br. Frederick Jose
Diaz Vallecillo.
Carnet: 2017-1085U.

Br. Manuel Adolfo
Aleman Boniche.
Carnet: 2017-0004U.

Tutor:
Ing. Carlos A. Pérez Méndez.

4 de febrero de 2026
Managua, Nicaragua



Dirección de Área
de Conocimiento
Industria y Producción

SECRETARIA DE ÁREA ACADÉMICA

F-8: CARTA DE FINALIZADO PLAN DE ASIGNATURA

El Suscrito Secretario del **AREA DE CONOCIMIENTO INDUSTRIA Y PRODUCCIÓN** hace constar que:

DIAZ VALLECILLO FREDERICK JOSÉ

Carné: 2017-1085U Turno: Diurno Plan de Asignatura: 2015 de conformidad con el Reglamento Académico vigente en la Universidad, ha aprobado todas las asignaturas correspondientes a la carrera de **INGENIERÍA ELECTRICA**, en el año 2022 y solo tiene pendiente la realización de una de las formas de culminación de estudio.

Se extiende la presente **CARTA DE FINALIZADO PLAN DE ASIGNATURA**, a solicitud del interesado en la ciudad de Managua, a los once días del mes de julio del año dos mil veinte y cinco.

Atentamente,

Msc. Arlen Patricia Reyes Gómez
SECRETARIO DE ÁREA ACADÉMICA





Dirección de Área
de Conocimiento
Industria y Producción

SECRETARIA DE ÁREA ACADÉMICA

F-8: CARTA DE FINALIZADO PLAN DE ASIGNATURA

El Suscrito Secretario del AREA DE CONOCIMIENTO INDUSTRIA Y PRODUCCIÓN hace constar que:

ALEMÁN BONICHE MANUEL ADOLFO

Carné: 2017-0004U Turno: Diurno Plan de Asignatura: 2015 de conformidad con el Reglamento Académico vigente en la Universidad, ha aprobado todas las asignaturas correspondientes a la carrera de INGENIERÍA ELECTRICA, en el año 2022 y solo tiene pendiente la realización de una de las formas de culminación de estudio.

Se extiende la presente CARTA DE FINALIZADO PLAN DE ASIGNATURA, a solicitud del interesado en la ciudad de Managua, a los once días del mes de julio del año dos mil veinte y cinco.

Atentamente,



Msc. Arlen Patricia Reyes Gomez
SECRETARIO DE ÁREA ACADÉMICA

☎ Móvil: (505) 22518276

📍 Recinto Universitario Pedro Arjuz Palacios
Costado Sur de Villa Progreso,
Managua, Nicaragua.

IMPRESO POR SISTEMA DE REGISTRO ACADEMICO EL 11-jul.-2025

🌐 www.unl.edu.ni



HOJA DE MATRICULA

AÑO ACADEMICO 2025

F:Frecuencia de Inscripciones de Asignatura R: Retiro de Asignatura.

GRABADOR

cc:ORIGINAL:ESTUDIANTE - COPIA:EXPEDIENTE.

IMPRESO POR SISTEMA DE REGISTRO ACADEMICO EL 21-nov.-2025



FIRMA Y SELLO DEL
FUNCIONARIO

V
J Frederick 1/7

FIRMA DEL
ESTUDIANTE



UNIVERSIDAD NACIONAL DE INGENIERÍA
DEPARTAMENTO DE REGISTRO ACADÉMICO

HOJA DE MATRICULA
AÑO ACADEMICO 2025

No. Recibo		No. Inscripción 4727				
NOMBRES Y APELLIDOS: Manuel Adolfo Alemán Boniche						
CARRERA: INGENIERÍA ELECTRICA		CARNET: 2017-0004U		TURNO: Diurno		
PLAN DE ESTUDIO: 2015		SEMESTRE: SEGUNDO SEMESTRE 2025		FECHA: 24/07/2025		
No.	ASIGNATURA	GRUPO	AULA	CRED.	F	R
1	_____					
	_____ ULTIMA LINEA					

F: Frecuencia de Inscripciones de Asignatura R: Retiro de Asignatura.

USER_ONLINE

GRABADOR

cc: ORIGINAL: ESTUDIANTE - COPIA: EXPEDIENTE.

IMPRESO POR SISTEMA DE REGISTRO ACADEMICO EL 21-nov.-2025



FIRMA DEL
 FUNCIONARIO

Manuel Adolfo Alemán Boniche
 FIRMA DEL
 ESTUDIANTE



Dirección de Área
de Conocimiento
Industria y Producción

Managua, 17 de julio de 2025

Bachilleres

Frederick José Díaz Vallecillo
Manuel Adolfo Alemán Boniche

Estimado Bachilleres:

Es de mi agrado informarles que el PROTOCOLO de su tema monográfico, titulado. **Criterios y filosofía de protección de transformadores de potencia: aplicación a transformador 138/13.8 kV de 25 MVA**, para optar al título de ingeniero Eléctrico. Ha sido aprobado por esta Dirección.

Asimismo, les comunico estar totalmente de acuerdo, con la tutoría del **MSc. Carlos Abraham Pérez Méndez**.

La fecha límite, para que presenten concluido su documento final, debidamente revisado por el tutor guía será el **16 de enero de 2026**.

Esperando puntualidad en la entrega de la Tesis, me despido.

Atentamente,

MSc. Augusto César Palacios Rodríguez
Director de Área de Conocimiento Industria
y Producción



CC: Protocolo
Archivo

Managua, 21 de noviembre de 2025

Msc. Augusto Palacios Rodríguez.
Director
Área de conocimiento Industria y Producción.
Su Oficina

Estimado Msc. Palacios:

En mi calidad de tutor de la Tesis monográfico titulado "**Criterios y filosofía de protección de transformadores de potencia: aplicación a transformador 138/13.8 kv de 25 MVA**", desarrollada por los Bachilleres:

Br. Frederick José Díaz Vallecillo.

Carnet: 2017-1085U.

Br. Manuel Adolfo Alemán Boniche.

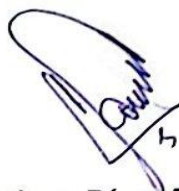
Carnet: 2017-0004U

Se encuentra lista para su predefensa, por lo cual,

Solicito a Usted, se programe la misma, según calendario.

Sin otro particular y en espera de su atención a la presente le saludo.

Atentamente,



Ing. Carlos Abraham Pérez Méndez
Tutor
85772777

C: Msc. Ing. Marlon Efrén Suárez Dávila.

Jefe Dpto. Mecánica- Eléctrica.

Archivo

Dedicatoria

Primeramente, le dedico esta tesis a Dios por haberme dado la fuerza y sabiduría para poder culminar con los estudios. Porque Dios siempre me escuchó cada día, es un Dios que con el todo es posible.

A mis padres Manuel Adolfo Alemán Matute y María Magdalena Boniche Ruiz que siempre han estado para nosotros en las buenas y en las malas, son personas que han hecho sacrificios para que hoy podamos llegar muy lejos y que podamos cumplir nuestros sueños.

También agradecemos a los maestros que estuvieron durante la formación universitaria cuya interacción hizo que aprendiéramos cada una de las materias que imparte la universidad las cuales nos enriqueció de conocimiento para la etapa profesional. Hay que destacar que gracias a ellos nos apasionamos por las materias de sistemas eléctricos de potencia y por protecciones de sistemas eléctricos de potencia.

Manuel Aleman

Primeramente, darles las infinitas gracias a Dios por todo lo vivido, aprendido en esta etapa universitaria donde cada vez que sentía caer el con su diestra me levantaba y me daba la sabiduría y fuerza para seguir adelante.

También mencionar y darle agradecimiento a mi papa José Alfredo Diaz López por su apoyo y sobre todo a mi mamá Lizbeth Argentina Vallecillo Membreño la persona mas importante en mi vida, quien siempre ha estado para mi brindándome su apoyo, quien me educó, que con sus fuerzas y sacrificio me ha ayudado a salir adelante, quien dejó todo atrás por darme lo mejor y ayudarme a seguir adelante por eso y mucho mas le pido a Dios que nos bendiga y le dedico este gran logro a ella.

También agradecimiento a todas aquellas personas que me brindaron su apoyo en el camino aquel amigo, primo, tío, abuelo, profesores que contribuyeron a mi formación y me brindaron de su experiencia, profesionalidad y conocimientos para ayudar en mi formación a todas esas personas por este medio le agradezco un monto y que Dios nos bendiga siempre.

Frederick Diaz

Resumen

Este proyecto de grado investigación sobre la Protección de transformadores de potencia, presenta el desarrollo de una guía de pasos y modelaje de la protección tanto de sobrecorriente como diferencial, en un programa especializado, Digsilent.

Primero, se propone el desarrollo de la teoría sobre los criterios y la filosofía para la protección de los transformadores de potencia, bajo los tipos de falla interno con relé diferencial y fallas externas de sobrecorriente con relé de sobrecorriente.

Se simulación las condiciones de falla y se analizan sus resultados, detallados en forma gráfica.

Al final se pudo verificar el correcto funcionamiento del modelo de protección a relé del transformador de potencia y del ajuste de los parámetros de protección tanto de sobrecorriente como diferencial.

Se presenta una guía básica de pasos para la protección de transformadores de potencia.

A la presente tesis se le adjunta disco CD-ROM, con archivos digitales que competen a este trabajo.

Índice de contenido

Introducción	1
Antecedentes	3
Justificación	5
Objetivos	6
I. Marco Teórico	7
CAPÍTULO 1.- CRITERIOS Y FILOSOFÍA DE PROTECCIÓN DE TRANSFORMADORES DE POTENCIA.....	12
1.1 Transformador de Potencia.	12
1.2 Criterios y Filosofía de protección de Transformadores de Potencia.	12
1.3 Objetivos de la protección de Transformadores de Potencia.	14
1.4 Filosofía de la protección de Transformadores de Potencia.....	14
CAPÍTULO 2.- DISPOSITIVOS DE PROTECCIÓN PARA TRANSFORMADORES DE POTENCIA.	16
2.1 Las Protecciones para un transformador de potencia.	16
2.2 Relé de Protección contra sobrecarga de transformadores.....	19
2.3 Curvas de operación del relé:	21
2.4 Característica de tiempo inverso:	22
2.5 La protección diferencial del transformador:.....	23
CAPÍTULO 3.- MODELO PARA LA PROTECCIÓN DE TRANSFORMADORES DE POTENCIA CON CAPACIDAD DE 25 MVA, 138/13.8 kV Y PARÁMETROS PARA EL AJUSTE DE LAS PROTECCIONES.	26
3.1 Modelo de protección del transformador de potencia.	26
3.2 Componentes del Modelo de protección del transformador de potencia.	27
3.3 Relés de protección del transformador de potencia.	27
3.4 Parámetros para el ajuste de la protección de transformadores de potencia.	28

CAPÍTULO 4.- APLICACIÓN DE LA FILOSOFÍA DE LA PROTECCIÓN DE SOBRECORRIENTE Y DIFERENCIAL A UN TRANSFORMADOR DE POTENCIA.

30

- 4.1 Protección de sobrecorriente y cálculo de los parámetros. 30
- 4.2 Protección diferencial y cálculo de los parámetros..... 40

CAPÍTULO 5.- MODELADO DE LA PROTECCIÓN POR SOBRECORRIENTE Y DIFERENCIAL DEL TRANSFORMADOR DE POTENCIA DE 25 MVA, CON EL SOFTWARE DIGSILENT-POWER FACTOR V 15.1..... 45

- 5.1 Digsilent Power Factory. 45
- 5.2 Desarrollo de la Aplicación para la Protección por sobrecorriente en el programa Digsilent Power Factory, para el transformado de potencia de 25 MVA, 138/13.8 kV.. 47
- 5.3 Desarrollo de la Aplicación para la Protección diferencial en el programa Digsilent Power Factory, para el transformado de potencia de 25 MVA, 138/13.8 kV..... 63

CAPÍTULO 6.- ANÁLISIS DE LOS RESULTADOS DEL MODELAJE DE LA PROTECCIÓN APLICABLE A LOS TRANSFORMADORES DE POTENCIA DE 25 MVA, 138/13.8 KV..... 72

CAPÍTULO 7.- PROPUESTA METODOLÓGICA DE CRITERIOS Y FILOSOFÍA DE PROTECCIÓN APLICABLES A LOS TRANSFORMADORES DE POTENCIA DE 25 MVA, 138/13.8 KV..... 74

. 74

- 6.1 Propuesta Metodológica. 74

CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES..... 77

- Conclusiones..... 77
- RECOMENDACIONES 78

Bibliografía..... 79

ANEXO 81

Índice de Figuras

<i>Figura 1 Transformador</i>	7
<i>Figura 2</i>	21
<i>Figura 3</i>	24
<i>Figura 4</i>	26
<i>Figura 5</i>	34
<i>Figura 7</i>	43
<i>Figura 8</i>	70
<i>Figura 9</i>	46
<i>Figura 10</i>	49
<i>Figura 11</i>	50
<i>Figura 12</i>	52
<i>Figura 13</i>	54
<i>Figura 14</i>	55
<i>Figura 15</i>	56
<i>Figura 16</i>	57
<i>Figura 17</i>	58
<i>Figura 18</i>	59
<i>Figura 19</i>	60
<i>Figura 20</i>	61
<i>Figura 21</i>	62
<i>Figura 22</i>	63
<i>Figura 23</i>	64
<i>Figura 24</i>	65
<i>Figura 25</i>	65
<i>Figura 26</i>	66
<i>Figura 27</i>	66
<i>Figura 28</i>	67
<i>Figura 29</i>	68
<i>Figura 30</i>	68
<i>Figura 31</i>	69
<i>Figura 32</i>	70
<i>Figura 33</i>	71

Indice de Tablas

Tabla 1 17

Tabla 2 35

Tabla 3 38

Introducción

Mediante esta investigación establecemos la importancia de aplicar el sistema de protección asociado a un transformador de potencia de 138/13.8 kV con capacidad específica de 25MVA, aunque dichos criterios y filosofía para su protección pueden ser extendidos a otros transformadores de diferentes capacidades de potencia. Para su análisis nos basamos en los criterios y filosofía de esquemas de protección para los sistemas eléctricos ya sea en media o alta tensión de los sistemas eléctricos de potencia.

Una de las bases fundamentales para establecer los criterios esenciales de protección, se basa en el estudio del principio de funcionamiento y constitución física del transformador, para posteriormente analizar los diferentes fallos que pueden darse en el mismo y seleccionar las funciones del sistema de protección más idóneas para este. En este caso analizamos una sección particular de una red eléctrica donde se encuentre conectado el transformador de potencia, para analizar sus condiciones de falla. Como propuesta analizamos la subestación San Juan del Sur, con un transformador de potencia en media tensión de 25 MVA.

Una vez estudiadas las funciones del sistema de protección, se determinaron los criterios de ajuste aplicable al transformador 138/13.8 kV DE 25 MVA y se realizarán los cálculos necesarios para la realización de los ajustes de las protecciones del mismo.

En ingeniería eléctrica, las protecciones de sistemas de potencia se utilizan para evitar la destrucción de equipos o instalaciones por causa de una falla que podría iniciarse de manera simple y después extenderse sin control en forma encadenada. Los sistemas de protección deben aislar la parte donde se ha producido la falla buscando perturbar lo menos posible la red, limitar el daño al equipo fallado, minimizar la posibilidad de un incendio, minimizar el peligro para las personas, minimizar el riesgo de daños de equipos eléctricos adyacentes.

Como sabemos, el transformador es un elemento particularmente importante en una red eléctrica. Es necesario protegerlo eficazmente contra todos los defectos susceptibles de dañarlo ya sean de origen interno o externo. Los principales defectos que pueden afectar a un transformador son:

- sobrecargas,
- cortocircuitos (internos o externos),
- defectos a tierra
- sobreflujo

La sobrecarga: Las sobrecargas pueden ser debidas al aumento del numero de cargas alimentadas simultáneamente o al aumento de la potencia absorbida por una o varias cargas. Se traduce por una sobre intensidad de larga duración que provoca una elevación de la temperatura perjudicial para la estabilidad de los aislantes y la longevidad del transformador (Schneider, 2024).

El cortocircuito: Según (Granero,2015) el cortocircuito puede ser de origen interno al transformador o externo. - interno se trata de un defecto entre conductores de fases diferentes o de un defecto entre espiras de un mismo arrollamiento. El arco de defecto degrada el arrollamiento del transformador y puede conducir a su destrucción. Un cortocircuito violento provoca daños muy importantes que pueden destruir el arrollamiento. - externo se trata de un defecto entre fases en las conexiones externas al transformador. La corriente de cortocircuito provoca dentro del transformador esfuerzos electrodinámicos y sollicitaciones térmicas susceptibles de afectar a los arrollamientos y de evolucionar después en forma de defecto interno.

Los defectos a tierra: Los defectos a la tierra pueden producirse entre partes bajo tensión y masas cercanas (la envolvente, trenzas de masa de los cables MT, etc...) o entre arrollamiento y núcleo magnético. Como todo cortocircuito, puede causar la destrucción del transformador. La amplitud de la corriente de defecto depende del régimen de neutro de las redes aguas arriba y abajo. En caso de defecto entre arrollamiento y masa, su amplitud depende también de su posición dentro del arrollamiento en un acoplamiento en estrella, la corriente a tierra varia entre 0 y el valor máximo según que el defecto se produzca en la extremidad del neutro o en las fases del arrollamiento. en un acoplamiento en triángulo, la corriente a tierra varia entre el 50 % y 100 % del valor máximo según que el defecto se produzca en el centro o en una extremidad del arrollamiento (Schneider, 2024).

El sobreflujo: El sobreflujo corresponde a la explotación del transformador a una tensión anormalmente elevada que genera pérdidas excesivas en el hierro causando calentamientos importantes y armónicos que presuponen riegos de resonancia (Schneider,2024).

Antecedentes

Los transformadores de potencia constituyen un componente esencial en los sistemas de energía eléctrica moderna, y por tanto, su protección es muy importante y fundamental para el desarrollo de nuevas técnicas que son más eficientes con el fin de protegerlos. Si se produce una falta en un transformador de potencia es necesario aislar el transformador con la mayor brevedad posible, de modo que el daño que pueda sufrir el transformador sea mínimo. Los transformadores de potencia están sujetos a muchos tipos de faltas internas y externas. Por otra parte, la corriente de conexión generada en el momento de la energización del transformador se asemeja a la condición de una falta interna. Este fenómeno de irrupción dispara el transformador de potencia si el sistema de protección utilizado no está diseñado para contener este tipo de falsos disparos. El método más eficaz utilizado para proteger los transformadores de potencia es la técnica de protección diferencial.

Los relés diferenciales se podrían clasificar en tres tipos principales: relés electromecánicos, relés electrónicos analógicos y relés digitales. Hoy en día, los ordenadores hacen que el diseño de los relés digitales sea más fácil y cómodo (Marto,2017).

Las estadísticas de fallas en transformadores de potencia pueden variar según la región y las condiciones de operación. Algunas estadísticas generales incluyen (GEBCO, 2024):

Fallas de Aislamiento: Según el IEEE (Institute of Electrical and Electronics Engineers), las fallas de aislamiento representan aproximadamente el 30% al 50% de todas las fallas en transformadores de potencia. Estas fallas pueden ser causadas por envejecimiento, sobrecalentamiento, contaminación o defectos de fabricación (GEBCO,2024).

Sobrecarga: Las sobrecargas, que ocurren cuando un transformador opera por encima de su capacidad nominal, son una causa común de fallas. Según la IEEE, las sobrecargas prolongadas pueden dañar el aislamiento y los devanados del transformador, contribuyendo significativamente a las fallas(GEBCO,2024).

Cortocircuitos: Los cortocircuitos, ya sea debido a un fallo interno o condiciones externas como rayos o sobretensiones, son eventos críticos que pueden provocar daños graves en el transformador. Aproximadamente el 5% al 10% de las fallas en transformadores se atribuyen a cortocircuitos(GEBCO,2024).

De manera específica sobre el tema de esta investigación no contamos con estudios previos de temas monográficos de investigación, existe una tesis monográfica que trata sobre gases disueltos en transformadores de potencia, realizada por Jenny Flóres Busto en el año 2010.

El 5 de agosto de 2010, se produjo un fallo en el transformador de potencia de la subestación Granada, que dejó por 20 horas sin servicio eléctrico a la población de ese municipio y sectores aledaños(La Prensa,2010).

Justificación

La finalidad de este trabajo de investigación es establecer los criterios básicos y la selección apropiada para la protección aplicada a un transformador de potencia de 25 MVA, 138/13.8 kV correspondiente a la subestación San Juan del Sur, de acuerdo a la filosofía de ingeniería para la protección de sistemas eléctricos de potencia.

Como parte fundamental de esta investigación, además minimizar el daño que pueda sufrir el transformador, minimizar la posibilidad de un incendio, minimizar el peligro para las personas, minimizar el riesgo de daños de equipos eléctricos adyacentes; queremos poner a disposición de los estudiantes de ingeniería eléctrica de la Universidad Nacional de Ingeniería, UNI y profesionales del área de ingeniería eléctrica una referencia de estudio para la protección de transformadores de potencia.

Consideramos que mediante el estudio de las posibles condiciones de falla que puede sufrir el transformador y realizando el estudio de los diferentes tipos de cortocircuitos se podrá determinar la protección apropiada del transformador de potencia, para ello utilizaremos como medio de estudio ya sea el programa computacional Digsilent, Power World o Etap.

Objetivos

Objetivo General:

- Establecer una guía de pasos y criterios para la protección de transformadores de potencia, con aplicación a un transformador de potencia de 25 MVA, 138/13.8 kV basados en la filosofía de ingeniería para protección de sistemas eléctricos de potencia.

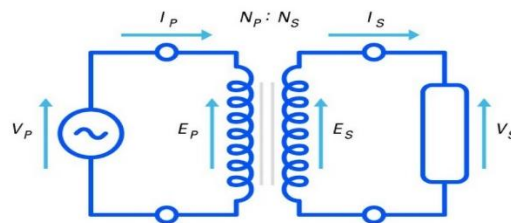
Objetivos específicos:

- ✓ Definir el concepto de los diferentes tipos de protecciones, sus configuraciones y avances tecnológicos aplicables a transformadores de potencia desde 25 MVA o más.
- ✓ Establecer los parámetros generales de protección de transformadores de potencia.
- ✓ Aplicar los criterios y filosofía de protección eléctricas a los transformadores de potencia, para analizar los tipos de fallas (cortocircuito y sobrecarga) que afectan a los transformadores de potencia, para posteriormente seleccionar las funciones del sistema de protección más idóneas para cada uno de ellos y analizar su incidencia modelando las fallas con el software Digsilent.
- ✓ Analizar los resultados obtenidos del modelaje de la protección de los transformadores de potencia de 25 MVA, 138/13.8 kV y establecer en base a los resultados criterios y filosofía para la protección del transformador de potencia.
- ✓ Desarrollar la propuesta metodológica de los criterios y filosofía de protección, aplicables a los transformadores de potencia de 25 MVA, 138/13.8 kV.

I. Marco Teórico

El principio de funcionamiento de un transformador se basa en la Ley de inducción electromagnética, definida por Faraday en el siglo XIX; esta ley consiste en generar una diferencia de potencial de corriente alterna sobre una bobina, para producir un campo electromagnético en un núcleo ferromagnético; a su vez, si se adiciona otra bobina se producirá una inducción de tensión en la segunda bobina (ENDESA, 2024).

Figura 1 Transformador



Nota: Figura obtenida de (Endesa,2024)

La relación de transformación del transformador la definimos con la siguiente ecuación:

$\frac{N_p}{N_s} = \frac{V_p}{V_s} = \frac{I_s}{I_p} = a$	(1)
---	--------------

Ecuación 1:Relacion de transformación.Fuente:Endesa(2024)

Donde (N_p) es el número de vueltas del devanado del primario, (N_s) el número de vueltas del secundario, (V_p) la tensión aplicada en el primario, (V_s) la obtenida en el secundario, (I_s) la intensidad que llega al primario, (I_p) la generada por el secundario y (a) la relación de transformación (Endesa,2024).

Partes fundamentales de un transformador de potencia:

Núcleo: es el centro del transformador. En él circula el campo electromagnético producido por los devanados y su función es mantener ese flujo magnético contenido para evitar las pérdidas producidas por las corrientes de Foucault. Normalmente está hecho de láminas de metal apiladas,

pero según el tipo de transformador, puede estar hecho de distintos materiales y con distintas formas; por ejemplo: acorazado, en columnas, toroidal, etc. Algunos transformadores especiales pueden no tener núcleo; a estos se les conoce como transformadores sin núcleo o de núcleo de aire (Ferrovial, 2024).

Bobinas: normalmente están compuestas por hilos de cobre enrollados alrededor del núcleo. Son las que producen el cambio de voltaje. El número de vueltas (*espiras*) de cada bobina tiene relación directa con el voltaje; mientras más espiras, más voltaje(AUDAX,2023).

Un transformador tiene, por lo menos, dos bobinas: una primaria, por donde entra la corriente, conocida como devanado primario; y una secundaria, por donde sale la corriente, conocida como devanado secundario. La cantidad de espiras de la bobina primaria corresponde al voltaje de entrada, y la cantidad de espiras de la bobina secundaria corresponde al voltaje de salida del transformador(Studocu,2023).

Aislantes: los elementos de un transformador (núcleo, devanado primario y devanado secundario, y cada espira) se encuentran separados entre sí por un aislante, debido a que cada uno de ellos tiene tensiones diferentes(Ferrovial,2024).

Tanque De Aislamiento: El tanque de aislamiento es la carcasa externa del transformador de potencia. Está diseñado para contener el núcleo magnético, los devanados y el aceite aislante. Además de proteger las partes internas, el tanque de aislamiento también proporciona aislamiento eléctrico y protección contra factores ambientales adversos, como la humedad y el polvo(AUDAX,2023).

Sistema De Refrigeración: El sistema de refrigeración es esencial para mantener la temperatura adecuada del transformador de potencia. El aceite aislante que circula a través del núcleo de enfriamiento puede ser enfriado mediante radiadores de aceite, intercambiadores de calor o incluso utilizando sistemas de refrigeración por aire o agua. Este sistema garantiza un funcionamiento óptimo y evita daños en el transformador debido al sobrecalentamiento(AUDAX,2023).

Protección de transformadores de potencia:

El transformador de potencia es uno de los elementos más importantes del sistema de transmisión y distribución. La elección de la protección apropiada puede estar condicionada tanto por consideraciones económicas como por el tamaño del transformador (Gutierrez ,2023).

De acuerdo con (Anonymous,2020) no hay una forma normalizada para proteger todos los transformadores. La mayoría de las instalaciones requieren análisis individuales para determinar el esquema de protección mejor, más efectivo y menos costoso. Normalmente, es técnicamente factible más de un esquema y las alternativas pueden ofrecer diferentes grados de sensibilidad, velocidad y selectividad. El esquema seleccionado será el que permita un buen balance y combinación de esos tres elementos, así como un costo razonable.

En la protección de transformadores se debe considerar una protección de respaldo, dado que la falla de un relé o interruptor asociado con el transformador durante una falla en él, puede causar tal daño al transformador, que su reparación no sea económicamente rentable (Gutierrez,2023).

El estudio e implementación de las protecciones ha evolucionado en la misma proporción que la tecnología lo ha hecho. Mientras que antes se usaban protecciones a base de dispositivos electromecánicos, ahora se emplean en conjunto con dispositivos electrónicos microprocesados, haciendo protecciones más eficientes que permiten reducir el tiempo de detección (Fregoso, 2000).

Es de gran importancia tener un sistema de protecciones adecuado para los transformadores de potencia, los cuales, son el enlace de un Sistema Eléctrico de Potencia (SEP). Teniendo un buen esquema de protección de transformadores, se garantiza en gran medida la confiabilidad, calidad, continuidad y seguridad en cada una de las etapas de un SEP como lo es la generación, transmisión y distribución de energía eléctrica (Fregoso, 2000).

Esquemas de protección de transformadores de potencia:

Según (Santoyo,2022)un esquema de protección, es un grupo o arreglo de dispositivos que se interconectan o interrelacionan para proteger a los equipos eléctricos primarios, detectando condiciones anormales de operación para evitar o reducir daños mayores al elemento primario en

éste caso el transformador donde estos conjuntos de elementos u dispositivos permiten monitorear la corriente y el voltaje que son clave para habilitar las protecciones adecuadas en los relé de protección siendo las protecciones mas comunes para transformadores según números ANSI las siguientes:

- 21. Relé de protección de distancia.
- 27. Relé de protección de bajo voltaje.
- 50. Relé de protección instantáneo de sobrecorriente.
- 51. Relé de protección instantáneo de sobrecorriente temporizada.
- 87. Relé de protección diferencial.

Protección contra fallas internas

Las fallas internas a la zona de protección del transformador pueden ser fallas en los terminales mismos o fallas en los enrollados. En ambos casos es necesaria la más rápida desconexión, debido a que los esfuerzos resultantes son destructivos y existe el peligro de incendio. La mayoría de las fallas internas que tienen lugar dentro de los enrollados son fallas a tierra o fallas entre espiras, cuya severidad depende del diseño del transformador y el tipo de puesta a tierra del neutro del sistema eléctrico al que está conectado (Santoyo, 2022).

Las fallas externas se refieren a fallas causadas por factores ambientales externos en los transformadores, y las fallas externas comunes incluyen:

1. Caída o colisión: la situación en la que el transformador se golpea o cae debido a un funcionamiento inadecuado, negligencia humana y otras razones (Huazheng,2023).
2. Alta humedad: cuando la humedad en el entorno operativo del transformador es demasiado alta, puede provocar que los materiales aislantes se humedezcan y provoquen fallas (Huazheng,2023).
3. Temperatura excesiva: cuando la temperatura en el entorno operativo del transformador es demasiado alta, puede provocar el envejecimiento del devanado del transformador o del material aislante, agravando las fallas internas (Huazheng,2023).

Tipos de fallas comunes

Tambien (Huazheng ,2023) define los tipos de fallas comunes:

1. Falla de cortocircuito: La falla de cortocircuito se refiere al fenómeno de falla de los conductores que entran en contacto con diferentes fases, entre las mismas fases o dentro del mismo devanado. Comúnmente es causado por razones como el envejecimiento del aislamiento del transformador y el mantenimiento del equipo donde la falla en cuestión debe ser despejada por el relé de protección de cortocircuito o falla instantánea (50)

2. Falla por sobrecarga: La sobrecarga se refiere al funcionamiento prolongado de un transformador bajo una carga que excede su capacidad nominal, lo que resulta en un aumento excesivo de temperatura del devanado y provoca una falla. Donde la falla en cuestión debe ser despejada por el relé de protección de cortocircuito o falla de sobrecorriente temporizada (51)

3. Falla de aislamiento: se refiere a una falla causada por daños al material de aislamiento de un transformador, comúnmente causado por humedad excesiva, operación no estándar y otras razones. Donde la falla en cuestión debe ser despejada por el relé de protección de cortocircuito o falla de corriente diferencial (87).

4. Falla a tierra: Se refiere a cualquier punto del transformador que se encuentra puesto a tierra, provocando una disminución instantánea en el voltaje de aislamiento del transformador. Donde la falla en cuestión debe ser despejada por el relé de protección de cortocircuito o falla a tierra (50T).

CAPÍTULO 1.- CRITERIOS Y FILOSOFÍA DE PROTECCIÓN DE TRANSFORMADORES DE POTENCIA.

1.1 Transformador de Potencia.

Los transformadores de potencia son máquinas estáticas de corriente alterna (ca) que transforman energía eléctrica de ca de unas características de tensión (V_1) y corriente (I_1) en energía eléctrica de ca con otras características de tensión (V_2) y corriente (I_2) diferente.

1.2 Criterios y Filosofía de protección de Transformadores de Potencia.

En el caso particular de esta investigación, la palabra criterio está referida a las normas aplicables para la protección de los transformadores de potencia (CONCEPTO, 2025).

Los criterios de protección de transformadores de potencia se centran en dispositivos para detectar y reaccionar a fallas internas y externas mediante la protección diferencial y de sobrecorriente, además de la protección térmica para detectar sobrecargas. La protección diferencial es la primaria para grandes transformadores y detecta corrientes que no se anulan entre sí dentro del transformador. La protección de sobrecorriente (relevadores 50/51) sirve de respaldo, mientras que los relés y sensores térmicos protegen contra el calor excesivo de las sobrecargas, y los dispositivos de alivio de presión detectan fallas con la generación de gases (Universidad del Cono Sur de las Américas, 2023).

Las tres protecciones de un transformador de potencia son:

Protección Diferencial (Principal)

- **Función:**

Detecta fallas internas del transformador, como cortocircuitos, al comparar la corriente que entra con la que sale.

- **Principio:**

En condiciones normales, la suma de las corrientes en los extremos de los devanados del transformador debería ser cero; si hay una diferencia significativa, el relé actúa.

- **Relevancia:**

Es la protección principal de los transformadores de potencia y se complementa con otras protecciones para aumentar la seguridad.

Protección de Sobrecarga (Térmica)

- **Función:**

Protege el transformador del calor excesivo causado por el funcionamiento prolongado con corrientes por encima de su capacidad.

- **Dispositivos:**

- **Relés térmicos:** Simulan la temperatura de los devanados del transformador basándose en la corriente y su constante de tiempo térmica.
- **Sensores de temperatura:** Monitorizan directamente la temperatura del aceite (en transformadores con aceite) o los devanados (en transformadores de tipo seco).

- **Actuación:**

Suelen tener dos niveles: una alarma para avisar al personal y un nivel alto para desenergizar el transformador y evitar daños.

Protección de Sobrecarga (sobrecorriente)

- **Función:**

Reacciona a corrientes elevadas que superan la capacidad nominal del transformador, detectando fallas externas.

- **Tipos:**

- **Relé 51 (Tiempo Inverso):** El tiempo de operación disminuye a medida que aumenta la corriente.
- **Relé 50 (Instantánea):** Detecta aumentos bruscos de corriente y desconecta el transformador en caso de cortocircuito.

Los transformadores de potencia son los equipos vitales para el normal funcionamiento del sistema eléctrico de potencia. Cuando ocurre una falla en un transformador, el daño es

normalmente severo. Operar un sistema eléctrico con un transformador fuera de servicio es siempre muy complicado.

1.3 Objetivos de la protección de Transformadores de Potencia.

- Proteger el sistema eléctrico de las fallas en el transformador.
- Proteger el transformador debido a las perturbaciones que ocurren en el sistema eléctrico.
- Proteger al transformador de fallas incipientes dentro del mismo.

1.4 Filosofía de la protección de Transformadores de Potencia.

La filosofía de protección de transformadores de potencia se enfoca en dividir el sistema en zonas traslapadas para asegurar la detección de todas las fallas, utilizando protecciones eléctricas (como la diferencial y de sobrecorriente) para fallas internas y externas, y protecciones mecánicas (como las de gas, nivel de aceite y temperatura) para fallas internas o condiciones operativas anormales, todo para aislar selectivamente y rápidamente la falla del sistema eléctrico (DAELIM, 2025).

Tipos de Protecciones

- **Protección Eléctrica:**
 - **Protección Diferencial:** Compara la corriente de entrada y salida. Si hay una diferencia (ajustada por la relación de transformación), se considera una falla interna y el relé dispara los interruptores.
 - **Protección de Sobrecorriente:** Basada en la detección de corrientes excesivas, se ajusta el nivel de disparo para actuar ante cortocircuitos.
 - **Protección de Sobre/Baja Tensión y Frecuencia:** Detección de cambios en el voltaje y la frecuencia del sistema.
- **Protección Mecánica:**
 - **Protección de Gas (Buchholz):** Detecta el gas producido por fallas internas y, en caso de un volumen significativo, actúa para aislar el transformador.
 - **Protección de Nivel de Aceite:** Monitoriza el nivel del aceite para evitar daños por falta de refrigeración.

- **Protección de Temperatura:** Mide la temperatura del aceite y los bobinados para detectar sobrecalentamiento.

CAPÍTULO 2.- DISPOSITIVOS DE PROTECCIÓN PARA TRANSFORMADORES DE POTENCIA.

2.1 Las Protecciones para un transformador de potencia.

Los transformadores en instalaciones eléctricas necesitan protección constante para evitar daños por sobrecargas, cortocircuitos o condiciones de sobrecalentamiento. Las protecciones de transformadores incluyen dispositivos y sistemas que detectan y responden a condiciones de riesgo antes de que estas afecten la operación del equipo. Los dispositivos más comunes para proteger los transformadores y cómo estos ayudan a evitar fallas costosas, se mencionan a continuación (TRAFOMEX, 2025).:

Existen diferentes dispositivos de protección que los transformadores deben incluir para garantizar su seguridad y funcionamiento. Estos son algunos de los dispositivos básicos que pueden encontrarse en transformadores de distribución e industriales:

- **Fusibles de protección**
- **Dispositivos de alivio de presión**
- **Interruptores automáticos**
- **Relevadores de protección.**

A continuación, presentamos una tabla de referencia del tipo de protección según la potencia del Transformador:

Tabla 1

TIPO DE PROTECCIÓN TRANSF. DE POTENCIA

POTENCIA	TIPO DE PROTECCIÓN
$S < 2500 \text{ KVA}$	FUSIBLE
$2500 < S < 5000 \text{ KVA}$	RELÉ DE SOBRECORRIENTE
$5000 < S < 10000 \text{ KVA}$	RELÉ DE SOBRECORRIENTE CON CONEXIÓN RESIDUAL
$S > 10 \text{ MVA}$	RELÉ DIFERENCIAL PORCENTUAL

Fuente: <https://inv.ucsa-ct.edu.py/geidise/wp-content/uploads/sites/4/2019/10/PPT2.-Protecciones-el%C3%A9ctricas-de-Transformadores-de-Potencia.pdf>

Fusibles de Protección

Los fusibles se queman o funden cuando la corriente supera el nivel de operación segura del transformador. Son efectivos para proteger el transformador de sobrecargas y cortocircuitos, interrumpiendo el paso de corriente en caso de problemas.

Dispositivos de Alivio de Presión

Cuando se produce un aumento excesivo de presión en el interior del transformador, el dispositivo de alivio de presión libera ese exceso. Esto es especialmente útil en transformadores sumergidos en aceite, donde el sobrecalentamiento puede generar gases que elevan la presión interna.

Interruptores Automáticos

Los interruptores automáticos actúan como barreras de protección que desconectan automáticamente el suministro de corriente cuando detectan condiciones de sobrecarga o cortocircuito. Son una de las protecciones más versátiles, ya que pueden ajustarse para diferentes condiciones de operación.

Relevadores de Protección

Los relevadores de protección son dispositivos que monitorean las condiciones eléctricas del transformador y envían señales para activar las protecciones cuando detectan problemas, como corrientes de sobrecarga, cortocircuitos, sobre voltajes o protecciones diferenciales. Estos relevadores son necesarios en sistemas eléctricos industriales, sobre todo en equipos con potencias superiores, ya que, garantizan que el transformador opere dentro de sus límites seguros.

¿Qué es la Protección 50/51? Relevador de Sobrecorriente Instantánea y de Tiempo Inverso

La protección 50/51 utiliza relevadores de sobrecorriente para detectar niveles elevados de corriente que podrían dañar el transformador. Esta protección se divide en dos tipos de relevadores:

51 (Sobrecorriente de Tiempo Inverso): Este relevador monitorea corrientes que superan el valor nominal pero no requieren una acción inmediata. Funciona con una característica de tiempo inverso, lo que significa que el tiempo de actuación disminuye a medida que la corriente aumenta. Esto permite una desconexión segura y controlada en situaciones de sobrecarga prolongada, evitando el desgaste excesivo y el sobrecalentamiento del transformador.

50 (Sobrecorriente Instantánea): Detecta aumentos bruscos en la corriente y actúa de forma instantánea para desconectar el transformador en situaciones de cortocircuito. Esta acción rápida protege al transformador de daños graves debido a corrientes intensas que podrían dañar los devanados y otros componentes internos.

¿Qué es la Protección Diferencial 87? Relevador Diferencial de Alta Sensibilidad

El relevador diferencial es una protección avanzada diseñada para detectar fallas internas en el transformador. Esta protección compara las corrientes de entrada y salida del transformador: si hay una diferencia significativa entre ambas, el relé interpreta esto como una posible falla interna.

- **Funcionamiento del Relevador Diferencial:** La protección diferencial es altamente sensible y se activa solo en caso de fallas internas, como cortocircuitos entre los devanados o fallas en el aislamiento. Esto permite una actuación precisa y rápida, desconectando el transformador para evitar daños severos y preservar su integridad.

La combinación de la protección 50/51 y la protección diferencial permite una respuesta integral ante fallas internas y externas, protegiendo el transformador en una amplia gama de condiciones.

2.2 Relé de Protección contra sobrecarga de transformadores.

Una sobrecarga ocurre cuando el transformador maneja más corriente de la que fue diseñado para soportar de forma continua. Aunque puede soportar sobrecargas temporales, una sobrecarga prolongada daña los devanados internos. Para evitarlo, algunos transformadores cuentan con:

Relevadores de sobrecorriente: Detectan el exceso de corriente y desconectan el transformador.

Se utiliza un relé de monitoreo de corriente para el tipo de relé que protegerá contra corriente excesiva, ya sea causada por una falla eléctrica o algún otro tipo de condición de sobrecorriente.

Pero las fallas pueden ser de alta o baja corriente. Y aunque muchos relés de monitoreo de corriente pueden detectar ambos, algunos solo detectarán un tipo de corriente u otro.

Un relé de monitoreo de sobrecorriente se coloca en línea con el circuito que debe proteger. Si la corriente en el circuito que se está monitoreando supera el umbral establecido en el relé de sobrecorriente, entonces el relé se "disparará" y abrirá el circuito. Esto evita daños al equipo o lesiones a las personas (GEYA, 2025).

Hay varios tipos diferentes de relés de sobrecorriente disponibles en el mercado actual. Estos diferirán principalmente en sus características y funciones, pero algunos también difieren en términos de cómo están diseñados y contra qué tipo de sobrecorriente están destinados a proteger. Los tipos de relés de sobrecorriente son:

2.2.1 Relé de sobrecorriente instantáneo

El primer tipo de relé de sobrecorriente es el relé de sobrecorriente instantáneo. Este tipo de relé está diseñado para proteger contra niveles muy altos de corriente durante un período de tiempo muy corto (menos de 0.1 segundos). Este tipo de corrientes pueden ser causadas por fallas en el sistema, como un cortocircuito.

El relé de sobrecorriente instantáneo tendrá un retardo de tiempo muy bajo, lo que significa que disparará o abrirá el circuito tan pronto como se detecte la corriente. Esto es importante, ya que puede ayudar a prevenir daños al sistema eléctrico al eliminar rápidamente la fuente de la sobrecorriente.

Las aplicaciones para estos tipos de relés de sobrecorriente incluyen alimentadores salientes, barras colectoras y transformadores. En estas aplicaciones, el relé de sobrecorriente instantáneo puede brindar protección contra fallas que de otro modo podrían causar daños extensos.

2.2.2 Relé de sobrecorriente de tiempo inverso

El segundo tipo de relé de sobrecorriente es el relé de sobrecorriente de tiempo inverso. A diferencia del relé de sobrecorriente instantáneo, el tiempo de operación es, como su nombre indica, inversamente proporcional a la magnitud de la corriente.

Eso significa que una corriente alta reducirá la cantidad de tiempo que tarda el relé en funcionar, mientras que una corriente más baja dará como resultado un tiempo de funcionamiento más prolongado, de hasta 10 segundos. Esto es importante, ya que puede ayudar a evitar disparos falsos cuando solo hay un aumento momentáneo de corriente.

Cuando se trata de aplicaciones, estos tipos de relés de sobrecorriente se utilizan principalmente en líneas de distribución. Los relés de sobrecorriente de tiempo inverso se clasifican además como relés de tiempo definido inverso, relés muy inversos y relés inversos extremos en función de sus características de retardo de tiempo.

2.2.3 Relé de sobrecorriente de tiempo inverso normal

Estos tipos de relés de sobrecorriente ofrecen un cambio menor o menor en el tiempo de operación a medida que cambia la magnitud de la corriente. Son, por lo tanto, de uso frecuente en situaciones industriales y sistemas de servicios públicos.

2.2.4 Relé de sobrecorriente de tiempo muy inverso

Un relé de sobrecorriente de tiempo muy inverso tendrá un cambio mucho mayor en el tiempo de operación a medida que cambia la magnitud de la corriente que el relé de sobrecorriente de tiempo inverso normal. Por lo tanto, son adecuados para su uso en aplicaciones donde se espera que la corriente de falla sea menor.

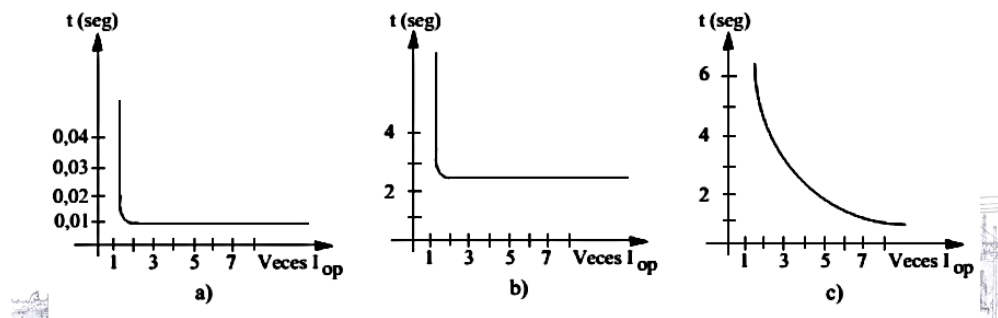
2.2.5 Relé de sobrecorriente de tiempo extremadamente inverso

Un relé de sobrecorriente de tiempo extremadamente inverso tiene el mayor cambio en el tiempo de operación a medida que cambia la magnitud de la corriente de todos los relés de sobrecorriente de tiempo inverso. Son, por lo tanto, mucho más rápidos para responder a situaciones de falla. Estos tipos de relés de sobrecorriente se usan comúnmente para evitar el sobrecalentamiento de cables, motores, transformadores y otros equipos, como calentadores y bombas.

2.3 Curvas de operación del relé:

Figura 2

Curvas de Operación del Relé



Fuente:

<https://www.electrogenesis.com/WebGenesisBiblio/Literatura/Articulos/Operacion%20Control%20y%20Proteccion/Proteccion/Dispositivos%20de%20Proteccion/Reles/Web/RELEVADOR-SOBRECORRIENTE.pdf>

- a: Curva de tiempo instantáneo.
- b: Curva de tiempo definido.
- c: Curva de tiempo inverso.

En el eje y de estas curvas tenemos el tiempo de operación del relé y en eje x, el valor en veces de la corriente de operación.

2.4 Característica de tiempo inverso:

El tiempo de operación del relevador de sobrecorriente temporizado varía con la magnitud de la corriente. Existen dos ajustes para este tipo de relevadores (COTOPAXI-Ecuador, 2025):

1. **Corriente de puesta en marcha (Pickup Current)**. Valor de corriente que activa o pone en funcionamiento un sistema de protección. La corriente de puesta en marcha es la corriente que causa que el relevador opere y cierre sus contactos. s la corriente mínima que un relé necesita recibir para comenzar su operación y puede ser instantánea o referirse a la operación normal del relé

2. **Dial de tiempo (Time Dial)**. El dial del relé, conocido también como Time Dial o ajuste de tiempo (TMS), es un control en relés de protección, especialmente los de sobrecorriente, que permite ajustar el tiempo de actuación de la curva característica del relé para un nivel de corriente específico. Representa una escala de valores, que pueden ser numéricos o un factor multiplicador de un tiempo de referencia, usado para coordinar y asegurar que solo el relé más cercano a la falla actúe, evitando así daños en el sistema.

El funcionamiento de un relé de sobrecorriente es simple ya que su operación depende de dos variables básicas:

- El nivel de corriente mínima de operación (o corriente de pick-up), que es aquel valor que produce el cambio de estado del relé.
- La característica de tiempo de operación, es decir la forma en que el relé responde en cuanto al tiempo.

2.5 La protección diferencial del transformador:

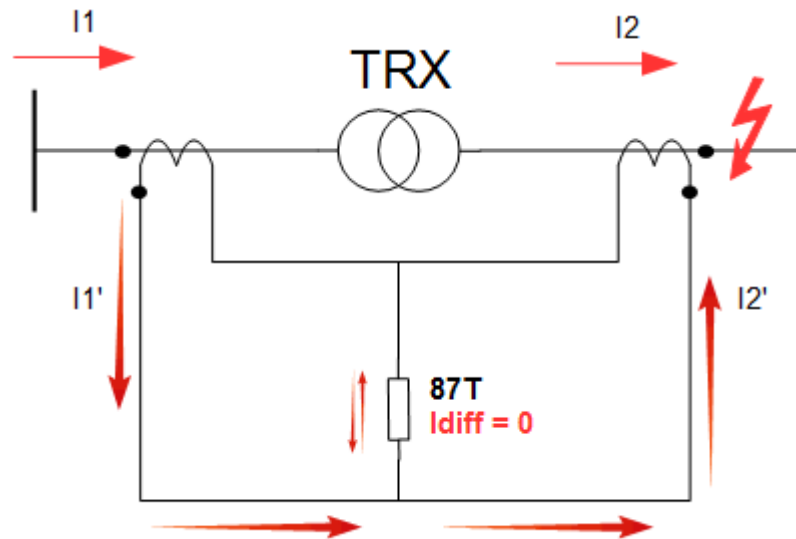
La protección diferencial en transformadores, conocida como 87T en referencia a su función dentro del esquema de protección, es una de las metodologías más efectivas para salvaguardar la integridad operativa de estos equipos. Este sistema está diseñado específicamente para detectar fallas internas en el transformador, como cortocircuitos o defectos en el aislamiento, que podrían comprometer seriamente su funcionamiento y causar daños graves si no se abordan de manera oportuna (ELECTROENERGY, 2024).

El funcionamiento del esquema de protección diferencial de transformadores se basa en la comparación entre la corriente que ingresa al transformador (en su lado primario) y la corriente que sale (en su lado secundario). Bajo condiciones normales, el principio de conservación de la energía asegura que la corriente de entrada debe ser igual a la corriente de salida, considerando un pequeño margen debido a las pérdidas internas del transformador. Cualquier diferencia significativa en estas corrientes (proporcionalmente) es una indicación de una posible falla interna en el transformador, lo que activa el relé de protección diferencial.

El relé diferencial 87T actúa emitiendo una señal de apertura hacia los disyuntores asociados cuando detecta una anomalía. De esta manera, el transformador se aísla inmediatamente del sistema de potencia, protegiéndolo de daños adicionales y evitando interrupciones prolongadas en el suministro eléctrico.

Figura 3

Protección Diferencial



Fuente: [linkedin.com/pulse/protección-diferencial-en-transformadores-de-potencia-john-alejandro?originalSubdomain=es](https://www.linkedin.com/pulse/protección-diferencial-en-transformadores-de-potencia-john-alejandro?originalSubdomain=es)

Como actúa la protección diferencial:

- 1 Actúa ante pequeños valores de cortocircuito dentro de la zona comprendida entre ambos TC.
- 2 No actúa ante cortocircuitos fuera de la zona comprendida entre ambos TC
- 3 No actúa en condiciones normales de carga

Con el fin de que el relé no se dispare a causa de estos errores, la corriente diferencial se compara con una corriente de restricción. Este valor representa la cantidad de corriente que pasa a través del transformador. Cuando esta corriente aumenta, los errores en la corriente diferencial también aumentan. Esto se utiliza para reducir la sensibilidad del relé durante situaciones con altos valores de corriente, como podría ser durante una falla externa. Con el fin de que el relé no se dispare a causa de estos errores, la corriente diferencial se compara con una corriente de restricción. Este valor representa la cantidad de corriente que pasa a través del transformador. Cuando esta corriente aumenta, los errores

en la corriente diferencial también aumentan. Esto se utiliza para reducir la sensibilidad del relé durante situaciones con altos valores de corriente, como podría ser durante una falla externa. Existen varias alternativas para calcular esta corriente:

Corriente de restricción I_R :

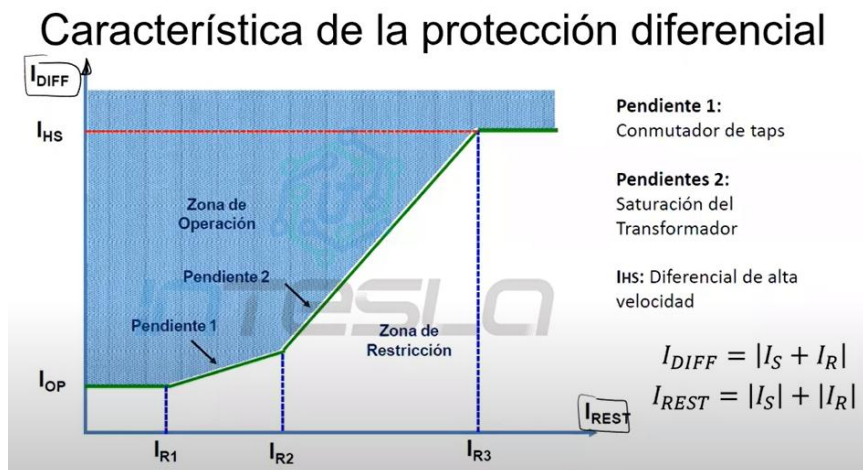
$$I_R = k[I1 + I2].$$

$$I_R = k([I1] + [I2]).$$

$$I_R = \max([I1], [I2])$$

Curva de disparo de la protección diferencial:

La curva de disparo de una protección diferencial de transformadores es un gráfico que muestra el tiempo necesario para que la protección opere en función de la magnitud de la corriente diferencial, la cual es la diferencia entre las corrientes de entrada y salida del transformador, detectando así fallas internas. Esta curva incluye zonas de operación (donde la protección no dispara) y zonas de no operación (donde sí dispara). La protección diferencial usa la señal de los transformadores de corriente (TCs) para compararlas y, si la diferencia supera un umbral preestablecido (que puede ser un valor fijo o un porcentaje de la corriente nominal), se genera una señal de disparo para desconectar el transformador.



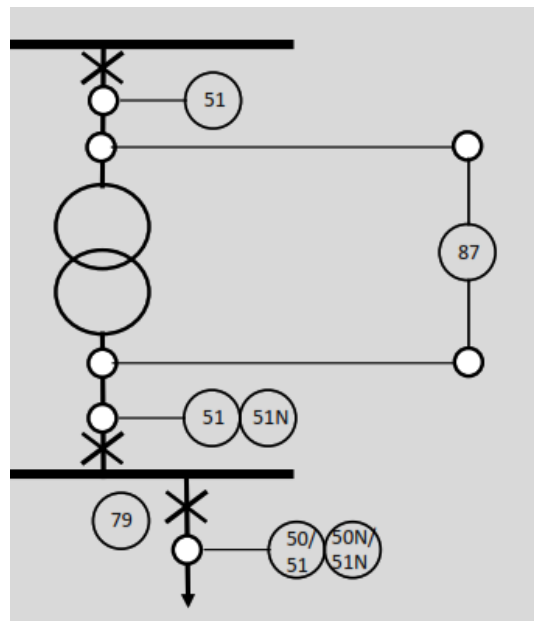
CAPÍTULO 3.- MODELO PARA LA PROTECCIÓN DE TRANSFORMADORES DE POTENCIA CON CAPACIDAD DE 25 MVA, 138/13.8 kV Y PARÁMETROS PARA EL AJUSTE DE LAS PROTECCIONES.

3.1 Modelo de protección del transformador de potencia.

El modelo principal para la protección de transformadores de potencia es la protección diferencial (ANSI 87T), complementada con protecciones de sobrecorriente (ANSI 51 y 51N) para fallas externas, y el uso de un relé de gas o relé Buchholz para detectar fallas internas. Esta estrategia se basa en la norma IEC 60076 y utiliza dispositivos como el conservador de aceite, la válvula de alivio de presión y medidores de temperatura para monitorear el estado operativo del transformador.

Figura 4

Modelo de Protección del Transformador de potencia



Fuente: [https://www.electro-genesis.com/WebGenesisBiblio/Literatura/Articulos/Operacion%20Control%20y%20Proteccion/Proteccion/Proteccion%20de%20Componentes/Transformadores/Web/Proteccion%20de%20Tr ansformador.pdf](https://www.electro-genesis.com/WebGenesisBiblio/Literatura/Articulos/Operacion%20Control%20y%20Proteccion/Proteccion/Proteccion%20de%20Componentes/Transformadores/Web/Proteccion%20de%20Transformador.pdf)

3.2 Componentes del Modelo de protección del transformador de potencia.

- **Protección diferencial (ANSI 87T):**

Supervisa la corriente entre los lados de alta y baja tensión del transformador. Si la corriente diferencial excede un umbral preestablecido, se dispara una señal de falla, indicando un problema interno (Vásquez, 2000).

- **Protección de sobrecorriente (ANSI 51 y 51N):**

Estos relés de tiempo inverso actúan como protección de respaldo, protegiendo contra cortocircuitos externos que pudieran afectar al transformador.

- **Relé de gas (Buchholz):**

Un dispositivo que detecta gases generados por el arco eléctrico dentro del transformador, lo que indica una falla y dispara la protección. Se utiliza comúnmente en transformadores de 0.5 MVA o más.

3.3 Relés de protección del transformador de potencia.

Un relé de protección es un dispositivo eléctrico que detecta fallas y condiciones anormales en un sistema eléctrico, como sobrecargas o cortocircuitos, y actúa para aislar la sección afectada y proteger equipos críticos de daños. Su función principal es garantizar la seguridad y estabilidad de la red eléctrica mediante la detección oportuna de anomalías y la activación de un disyuntor para desconectar el circuito con problemas (Electric, 2025).

Como funciona un relé:

Un relé de protección funciona monitoreando parámetros eléctricos como corriente, voltaje o temperatura y actuando para desconectar un circuito defectuoso cuando estos parámetros se desvían de un rango seguro. Al detectar una falla, el relé cierra un circuito para enviar una señal a un interruptor o disyuntor, el cual aísla la parte afectada del sistema eléctrico para prevenir daños mayores, proteger equipos y garantizar la seguridad (KELTOUR, 2025).

Tipos de relés de protección:

Existen diversos tipos de relés diseñados para diferentes aplicaciones y fallas específicas:

- **Relés de sobrecorriente:** Detectan y actúan ante corrientes excesivas.
- **Relés diferenciales:** Protegen equipos críticos mediante la detección de fallas internas al comparar corrientes.
- **Relés de distancia:** Se utilizan para la protección de líneas eléctricas, detectando fallas en la línea según la distancia donde ocurren.
- **Relés de arco eléctrico:** Detectan arcos eléctricos peligrosos para prevenirlos y mitigarlos.

Las marcas principales de relés de protección para transformadores incluyen SEL, Schneider Electric, Eaton, ABB, etc.

3.4 Parámetros para el ajuste de la protección de transformadores de potencia.

Parámetros de ajuste de la protección de sobrecorriente:

- 1 La capacidad de potencia del transformador en MVA.
- 2 Los voltajes primario y secundario del transformador.
- 3 El valor de la corriente de falla en el lado a proteger.
- 4 El valor del Dial.
- 5 La selección de la marca y modelo del relé.
- 6 El tipo de curva de relé a seleccionar (Instantánea, Tiempo definido, Tiempo Inverso)
- 7 El cálculo de la corriente de arranque (Pickup del relé).
- 8 La relación de transformación del transformador de corriente RTC.

Parámetros de ajuste de la protección diferencial:

- 1 La capacidad de potencia del transformador en MVA.
- 2 La selección de la marca y modelo del relé diferencial.
- 3 La relación de transformación de los transformadores de corriente primario y secundario RTC.
- 4 La corriente diferencial mínima, 0.1
- 5 El valor de arranque de la corriente de la primera pendiente, normalmente de 1.
- 6 El valor de arranque de la segunda pendiente, normalmente 3.
- 7 El porcentaje de la primera pendiente un ajuste del 20%.
- 8 El porcentaje de la segunda pendiente un ajuste del 40%.
- 9 La función no restringida o instantánea de 10 por la corriente nominal.

CAPÍTULO 4.- APLICACIÓN DE LA FILOSOFÍA DE LA PROTECCIÓN DE SOBRECORRIENTE Y DIFERENCIAL A UN TRANSFORMADOR DE POTENCIA.

4.1 Protección de sobrecorriente y cálculo de los parámetros.

Potencia del transformador trifásico $S = 25 \text{ MVA}$

Voltajes del transformador 138/13.8 kV.

Impedancia del transformador $Z = 8\%$

Voltaje Primario 138 kV

Voltaje Secundario 13.8 k

Para un transformador de 25 MVA según la norma IEC 60076-5:2000 Power transformers, la impedancia típica suele estar en el rango de 4% a 12.5%, en nuestro caso utilizaremos el valor del 8%, referido en esta norma.

Table 1 – Recognized minimum values of short-circuit impedance for transformers with two separate windings

Short-circuit impedance at rated current	
Rated power kVA	Minimum short-circuit impedance %
Up to 630	4,0
631 to 1 250	5,0
1 251 to 2 500	6,0
2 501 to 6 300	7,0
6 301 to 25 000	8,0
25 001 to 40 000	10,0
40 001 to 63 000	11,0
63 001 to 100 000	12,5
Above 100 000	>12,5
NOTE 1 Values for rated power greater than 100 000 kVA are generally subjected to agreement between manufacturer and purchaser.	
NOTE 2 In case of single-phase units connected to form a three-phase bank, the value of rated power applies to three-phase bank rating.	

Ecuación de corriente nominal:

$I_n = \frac{S \text{ (kVA)}}{\sqrt{3} \text{ kV}}$	(1)
---	--------------

En el caso particular para la protección de sobrecorriente realizamos los cálculos para el devanado secundario, sin embargo de igual forma utilizando los valores por primario se realiza bajo la misma metodología la protección de sobrecorriente.

Cálculo de la corriente nominal por secundario:

$$I_n = \frac{25,000 \text{ (kVA)}}{\sqrt{3} \times 13.8 \text{ kV}} = 1,047.16 \text{ A}$$

Considerando un 25% de sobrecarga la corriente máxima sería de:

$$I_{\text{máxima}} = 1.25 \times 1,047.16 \text{ A} = 1,309 \text{ A}$$

Con este valor de corriente máxima de 1,309 A y utilizando la siguiente referencia para transformadores de corriente de la norma IEEE, conforme la tabla ABB, seleccionamos el transformador de corriente para la protección de sobrecorriente, 1500/5 A.



INSTRUMENT TRANSFORMERS

IEEE Standard Ratings

Current and voltage transformers (CTs and VTs)

IEEE C57.13-2016, Table 11: Standard multi-ratio current transformer taps*											
600:5		1200:5		2000:5		3000:5		4000:5		5000:5	
Ratio	Tap	Ratio	Tap	Ratio	Tap	Ratio	Tap	Ratio	Tap	Ratio	Tap
50:5	X2-X3	100:5	X2-X3	300:5	X3-X4	300:5	X3-X4	500:5	X1-X2	500:5	X2-X3
100:5	X1-X2	200:5	X1-X2	400:5	X1-X2	500:5	X4-X5	1000:5	X3-X4	1000:5	X4-X5
150:5	X1-X3	300:5	X1-X3	500:5	X4-X5	800:5	X3-X5	1500:5	X2-X3	1500:5	X1-X2
200:5	X4-X5	400:5	X4-X5	800:5	X2-X3	1000:5	X1-X2	2000:5	X1-X3	2000:5	X3-X4
250:5	X3-X4	500:5	X3-X4	1100:5	X2-X4	1200:5	X2-X3	2500:5	X2-X4	2500:5	X2-X4
300:5	X2-X4	600:5	X2-X4	1200:5	X1-X3	1500:5	X2-X4	3000:5	X1-X4	3000:5	X3-X5
400:5	X1-X4	800:5	X1-X4	1500:5	X1-X4	2000:5	X2-X5	3500:5	X2-X5	3500:5	X2-X5
450:5	X3-X5	900:5	X3-X5	1600:5	X2-X5	2200:5	X1-X3	4000:5	X1-X5	4000:5	X1-X4
500:5	X2-X5	1000:5	X2-X5	2000:5	X1-X5	2500:5	X1-X4			5000:5	X1-X5
600:5	X1-X5	1200:5	X1-X5			3000:5	X1-X5				

Que nos dá una relación de transformación $CTR = 1500/5 = 300$.

De acuerdo a la corriente máxima calculada de 1,309 A y la selección de transformador de corriente de 1500/5 A, la corriente de arranque o pickup del relé sería en por unidad de:

$$I_{pickup} = \frac{I_{m\acute{a}x}}{1,500} = \frac{1,309 \text{ A}}{1,500 \text{ A}} = 0.873 \text{ pu}$$

Como estamos protegiendo por el lado secundario, el valor en amperios de la corriente de arranque sería de:

$$I_{pickup} = 0.873 \text{ pu} \times 5 \text{ A} = 4.4 \text{ A}.$$

Como el tiempo de disparo tiene que se coordinado con el resto de los equipos conectados con el transformador, en este caso supondremos un valor máximo de tres ciclos, es decir 150 milisegundos (0.15 segundos).

$$t_{disparo} = T_p = 0.15 \text{ s}.$$

Vamos a calcular ahora la corriente de falla o cortocircuito por secundario, utilizando la siguiente ecuación:

$$I_{falla} = \frac{I_{nominal \text{ secundario}}}{Z\%} = \frac{1,047.16 \text{ A}}{8\%} = 13,089.6 \text{ A}$$

En Nuestro caso particular estamos utilizando una curva inversa de sobrecorriente, modelado con la ecuación:

$$T_p = TD \left(0.180 + \frac{5.95}{M^2 - 1} \right)$$

Donde:

T_p : Tiempo de Disparo.

TD : Valor del Dial.

M : Es igual a la relación de la corriente de falla entre la corriente pickup.

$$M = \frac{I_{falla}}{I_{pickup}} = \frac{13,089.6 \text{ A}}{4.4 \text{ A}} = 3,000$$

Table 5.71 Equations Associated With U.S. Curves

Curve Type	Operating Time	Reset Time	Figure
U1 (Moderately Inverse)	$T_p = TD \cdot \left(0.0226 + \frac{0.0104}{M^{0.02} - 1} \right)$	$T_r = TD \cdot \left(\frac{1.08}{1 - M^2} \right)$	Figure 5.80
U2 (Inverse)	$T_p = TD \cdot \left(0.180 + \frac{5.95}{M^2 - 1} \right)$	$T_r = TD \cdot \left(\frac{5.95}{1 - M^2} \right)$	Figure 5.81
U3 (Very Inverse)	$T_p = TD \cdot \left(0.0963 + \frac{3.88}{M^2 - 1} \right)$	$T_r = TD \cdot \left(\frac{3.88}{1 - M^2} \right)$	Figure 5.82
U4 (Extremely Inverse)	$T_p = TD \cdot \left(0.02434 + \frac{5.64}{M^2 - 1} \right)$	$T_r = TD \cdot \left(\frac{5.64}{1 - M^2} \right)$	Figure 5.83
U5 (Short-Time Inverse)	$T_p = TD \cdot \left(0.00262 + \frac{0.00342}{M^{0.02} - 1} \right)$	$T_r = TD \cdot \left(\frac{0.323}{1 - M^2} \right)$	Figure 5.84

Utilizando la ecuación de corriente inversa del relé:

$$T_p = TD \left(0.180 + \frac{5.95}{M^2 - 1} \right)$$

Podemos calcular el valor del Dial TD del relé para el ajuste de la corriente de disparo:

$$0.150 \text{ s} = TD \left(0.180 + \frac{5.95}{3,000^2 - 1} \right)$$

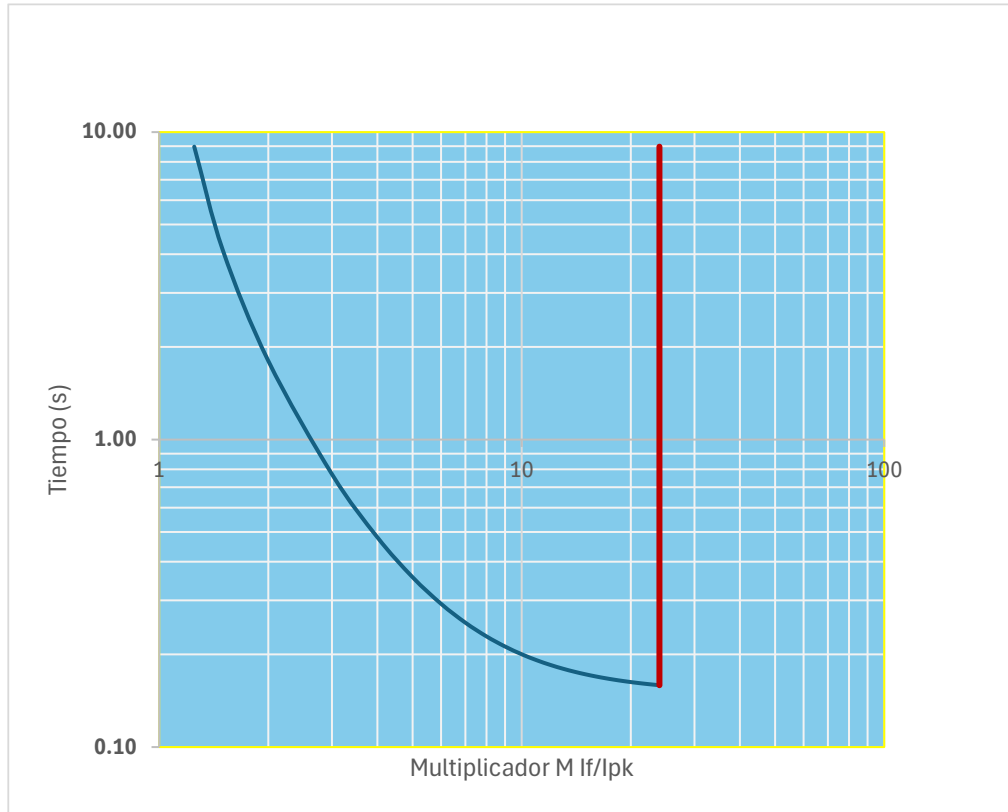
Se obtiene el valor del dial TD = 0.83

Estos valores son los ajustes del relé necesarios para la protección de sobrecorriente del transformador por el lado secundario de media tensión en 13.8 kV, de acuerdo con los valores de calculados previamente.

Simulación en una hoja EXCEL de la curva inversa del relé y de la corriente de falla:

Figura 5

Modelo de curva Inversa-lado secundario



Fuente: Propia

Tabla 2*Valores de la curva de Disparo Inversa del Relé*

				Eje X	Eje Y
lfalla	lpickup	M = lfalla/lpk	TDS	Multiplicador	tiempo (s)
5.5	4.4	1.25	0.83	1.25	8.94
6.6	4.4	1.5	0.83	1.5	4.11
8.8	4.4	2	0.83	2	1.80
13.2	4.4	3	0.83	3	0.77
17.6	4.4	4	0.83	4	0.48
22.0	4.4	5	0.83	5	0.36
26.4	4.4	6	0.83	6	0.29
30.8	4.4	7	0.83	7	0.25
35.2	4.4	8	0.83	8	0.23
39.6	4.4	9	0.83	9	0.21
44.0	4.4	10	0.83	10	0.20
48.4	4.4	11	0.83	11	0.19
52.8	4.4	12	0.83	12	0.18
57.2	4.4	13	0.83	13	0.18
61.6	4.4	14	0.83	14	0.17
66.0	4.4	15	0.83	15	0.17
70.4	4.4	16	0.83	16	0.17
74.8	4.4	17	0.83	17	0.17
79.2	4.4	18	0.83	18	0.16
83.6	4.4	19	0.83	19	0.16
88.0	4.4	20	0.83	20	0.16
92.4	4.4	21	0.83	21	0.16
96.8	4.4	22	0.83	22	0.16
101.2	4.4	23	0.83	23	0.16
105.6	4.4	24	0.83	24	0.16

Fuente: Propia

Aplicando la misma metodología para el lado primario

Impedancia del transformador $Z = 8\%$

Voltaje Primario 138 kV

Cálculo de la corriente nominal por primario:

$$I_n = \frac{25,000 (kVA)}{\sqrt{3} \times 138kV} = 104.72 A$$

Considerando un 25% de sobrecarga la corriente máxima sería de:

$$I_{\text{máxima}} = 1.25 \times 104.72 A = 130.9 A$$

Con este valor de corriente máxima de 130.9A y utilizando la siguiente referencia para transformadores de corriente de la norma IEEE, conforme la tabla ABB, seleccionamos el transformador de corriente para la protección de sobrecorriente, 150/5 A.

TC para el primario 150/5. CTR = 30

$$I_{\text{pickup}} = \frac{I_{\text{máx}}}{150} = \frac{130.9 A}{150 A} = 0.8726 pu$$

$$I_{\text{pickup}} = 0.8726 pu \times 5 A = 4.36 A.$$

supondremos un valor máximo de tres ciclos, es decir 150 milisegundos (0.15 segundos).

$$t_{\text{disparo}} = T_p = 0.15 s.$$

Vamos a calcular ahora la corriente de falla o cortocircuito por primario, utilizando la siguiente ecuación:

$$I_{\text{falla}} = \frac{I_{\text{nominal primario}}}{Z\%} = \frac{104.72}{8\%} = 1309$$

En Nuestro caso particular estamos utilizando una curva inversa de sobrecorriente, modelado con la ecuación:

$$T_p = TD \left(0.180 + \frac{5.95}{M^2 - 1} \right)$$

Donde:

T_p : Tiempo de Disparo.

TD: Valor del Dial.

M: Es igual a la relación de la corriente de falla entre la corriente pickup.

$$M = \frac{I_{falla}}{I_{pickup}} = \frac{1309 A}{4.36 A} = 300.22$$

Utilizando la ecuación de corriente inversa del relé:

$$Tp = TD \left(0.180 + \frac{5.95}{M^2 - 1} \right)$$

Podemos calcular el valor del Dial TD del relé para el ajuste de la corriente de disparo:

$$0.150 s = TD \left(0.180 + \frac{5.95}{300.22^2 - 1} \right)$$

Se obtiene el valor del dial TD = 0.8330

Tabla 3

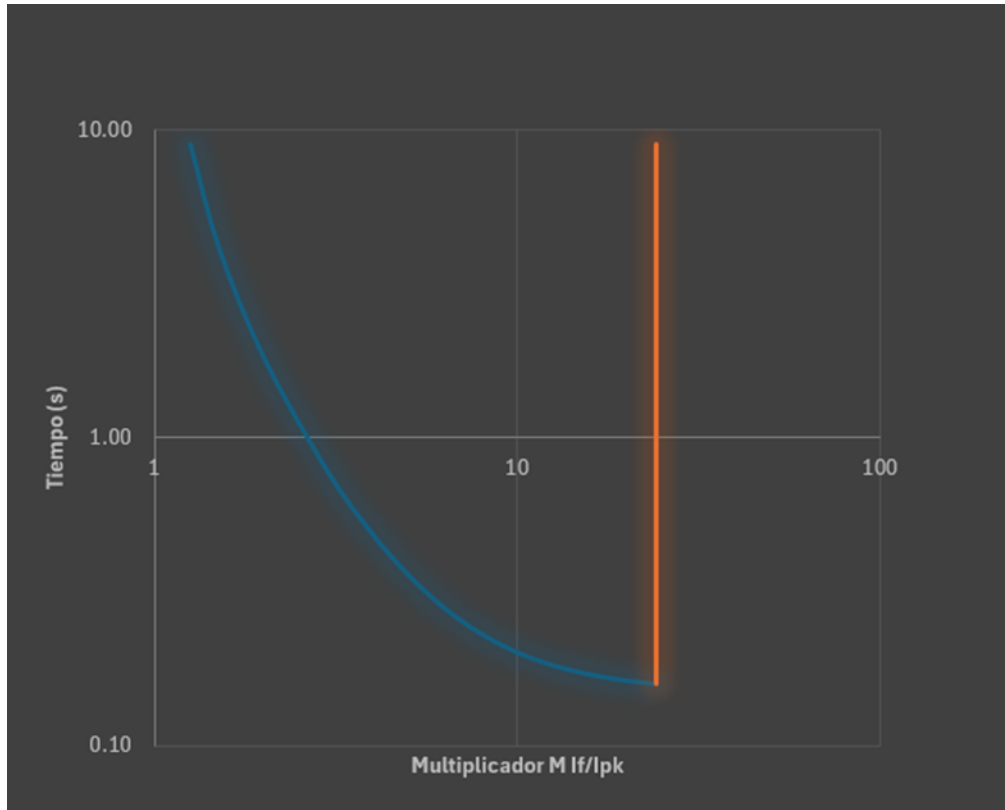
Valores de la curva de Disparo Inversa del Relé

				Eje X	Eje Y
Ifalla	Ipickup	$M = I_{falla}/I_{pk}$	TDS	Multiplicador	tiempo (s)
5.5	4.36	1.25	0.83	1.25	8.94
6.5	4.36	1.5	0.83	1.5	4.11
8.7	4.36	2	0.83	2	1.80
13.1	4.36	3	0.83	3	0.77
17.4	4.36	4	0.83	4	0.48
21.8	4.36	5	0.83	5	0.36
26.2	4.36	6	0.83	6	0.29
30.5	4.36	7	0.83	7	0.25
34.9	4.36	8	0.83	8	0.23
39.2	4.36	9	0.83	9	0.21
43.6	4.36	10	0.83	10	0.20
48.0	4.36	11	0.83	11	0.19
52.3	4.36	12	0.83	12	0.18
56.7	4.36	13	0.83	13	0.18
61.0	4.36	14	0.83	14	0.17
65.4	4.36	15	0.83	15	0.17
69.8	4.36	16	0.83	16	0.17
74.1	4.36	17	0.83	17	0.17
78.5	4.36	18	0.83	18	0.16
82.8	4.36	19	0.83	19	0.16
87.2	4.36	20	0.83	20	0.16
91.6	4.36	21	0.83	21	0.16
95.9	4.36	22	0.83	22	0.16
100.3	4.36	23	0.83	23	0.16
104.6	4.36	24	0.83	24	0.16

Fuente:propia

Figura 6

Modelo de curva Inversa-lado primario



4.2 Protección diferencial y cálculo de los parámetros.

En este caso para esta protección, tomamos en consideración la potencia del transformador y calculamos los transformadores de corriente tanto para el lado primario como secundario del transformador. Como ya calculamos para el lado secundario el valor comercial del transformador de corriente, que nos dio un valor de 1500/5, sólo calcularemos el del lado primario:

Cálculo de la corriente nominal por primario:

$$I_n = \frac{25,000 (kVA)}{\sqrt{3} \times 138kV} = 104.72 A$$

Considerando un 25% de sobrecarga la corriente máxima sería de:

$$I_{\text{máxima}} = 1.25 \times 104.72 A = 130.9 A$$

Con este valor de corriente máxima de 130.9 A y utilizando la siguiente referencia para transformadores de corriente de la norma IEEE, conforme la tabla ABB, seleccionamos el transformador de corriente 150/5 A.

En resumen, tenemos:

TC para el primario 150/5. CTR = 30

TC para el secundario 1500/5. CTR = 300

Con estos valores estamos listo para los parámetros de ajuste del relé diferencial:

Utilizaremos un modelo de relé diferencial SEL-487-3

SEL-487E-3, -4 Transformer Protection Relay

Instruction Manual



Y calculamos los tap's de ajuste primario y secundario con la ecuación:

Por primario

$$S = 25,000 \text{ kVA}$$

$$V_{\text{primario}} = 138 \text{ kV}$$

$$CTR = 150/5 = 30$$

$$Tap1 = \frac{S \text{ kVA}}{\sqrt{3} \times kV \times CTR}$$

$$Tap1 = \frac{25,000 \text{ kVA}}{\sqrt{3} \times 138 \text{ kV} \times 30} = 3.491 pu$$

Por secundario

$$S = 25,000 \text{ kVA}$$

$$V_{\text{primario}} = 13.8 \text{ kV}$$

$$CTR = 1500/5 = 300$$

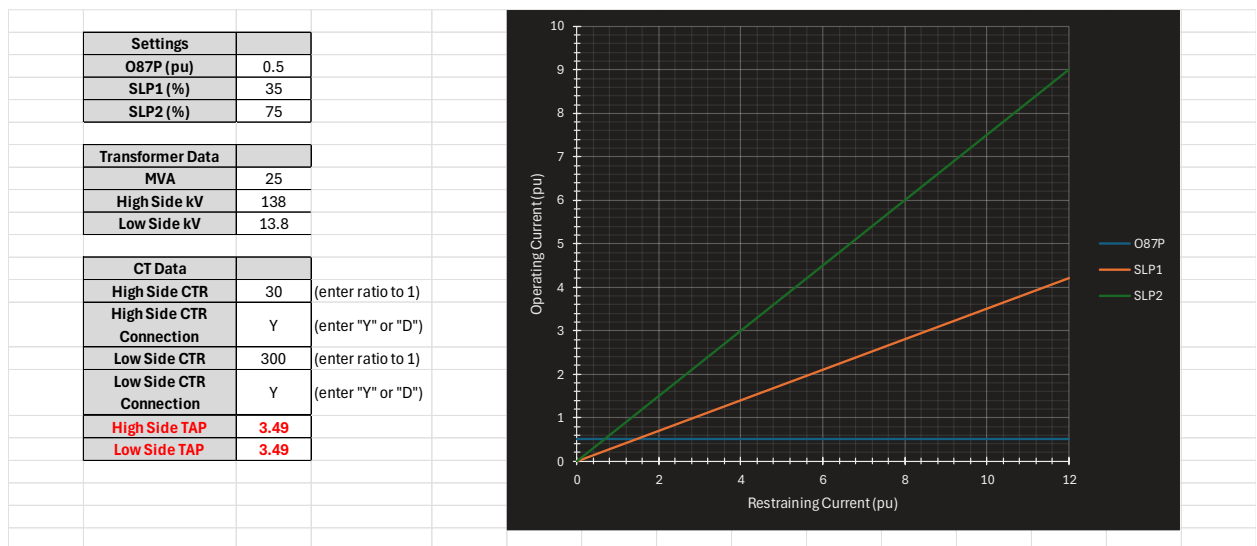
$$Tap2 = \frac{S \text{ kVA}}{\sqrt{3} \times kV \times CTR}$$

$$Tap2 = \frac{25,000 \text{ kVA}}{\sqrt{3} \times 13.8 \text{ kV} \times 300} = 3.491 pu$$

Que podemos apreciar gráficamente a continuación, obtenida de (<https://www.romeroengineering.co/downloads-87t-tap-calculator>).

Figura 7

Ajustes de tap del relé diferencial



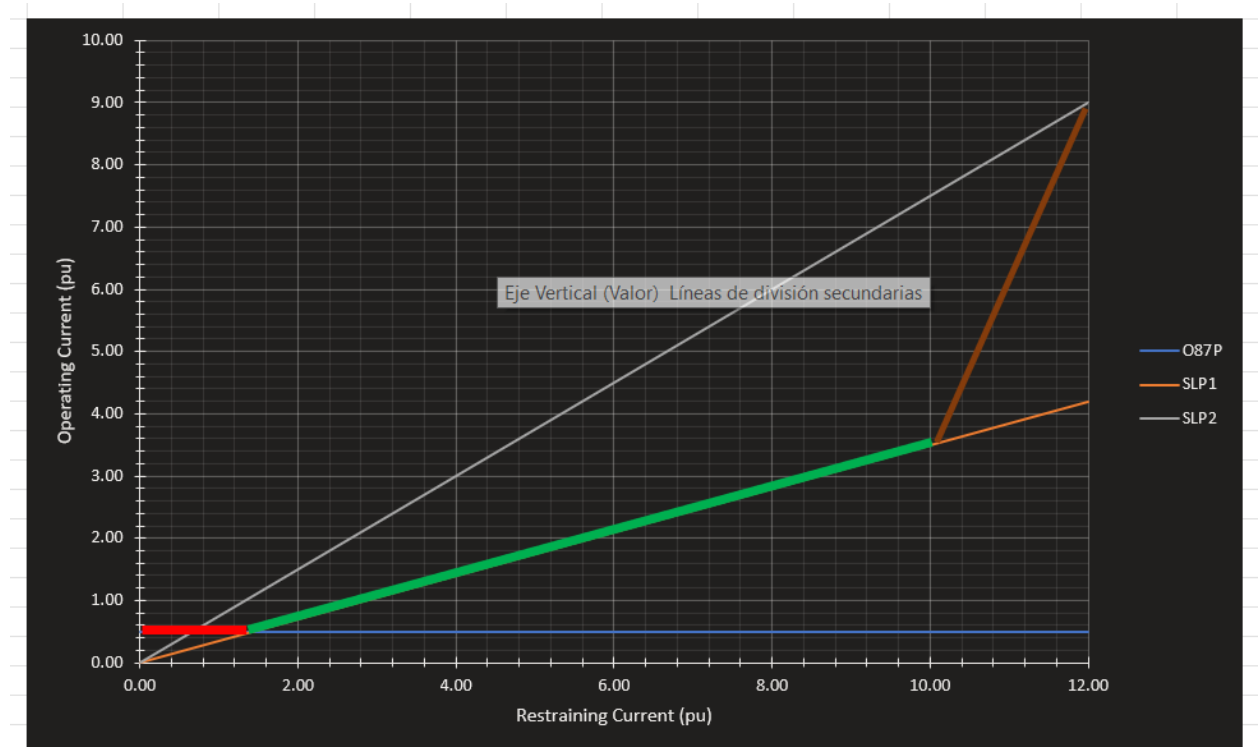
Fuente: Propia

Donde la corriente de restricción tendrá un valor de 0.5 pu. Siendo la curva de disparo el color verde y la curva de operación normal (No disparo) el color naranja.

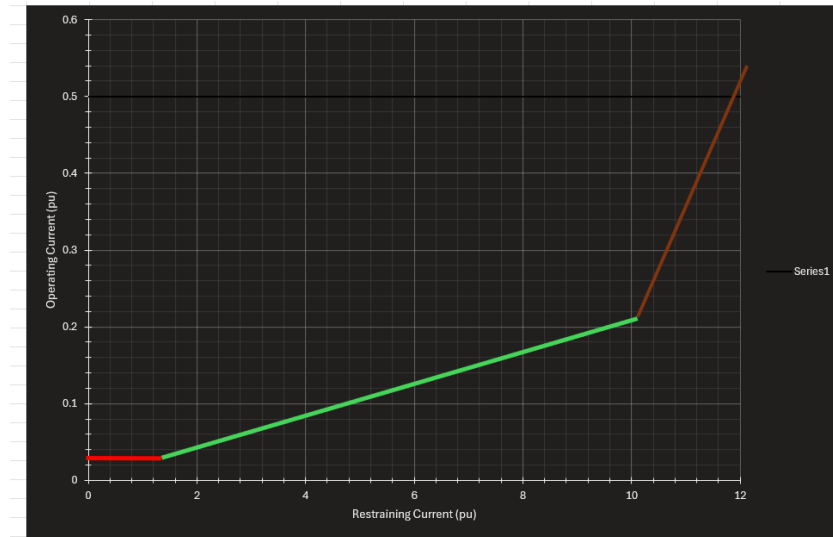
Vemos ahora la curva diferencia en nuestra hoja de cálculo EXCEL uniendo el valor mínimo de 0.5 pu hasta intercepta la curva de No disparo y luego sobre esta curva de No disparo tenemos la pendiente No.1 hasta un valor de corriente de restricción de 10 pu luego la segunda pendiente, que se muestra en el siguiente gráfico:

Figura 6

Gráfico del ajuste diferencial



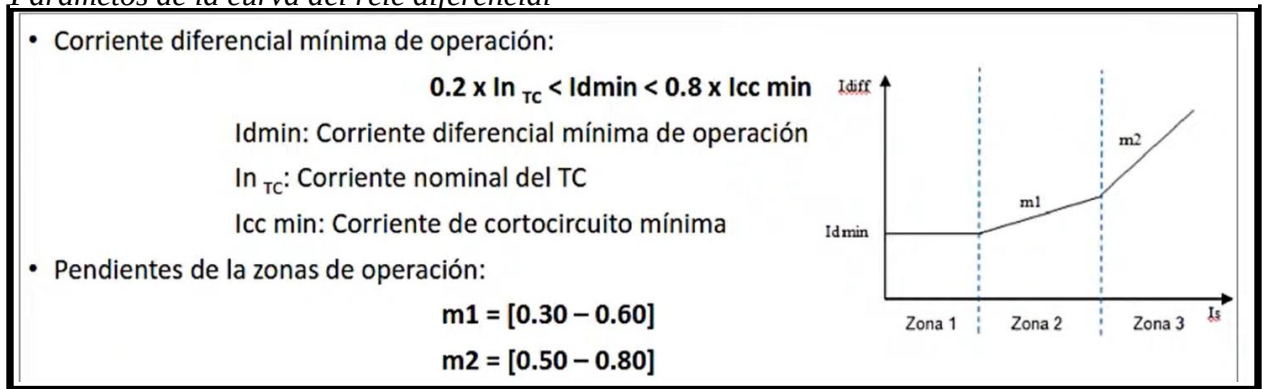
Fuente: Propia



Corriente mínima de trabajo del relé:

Figura 7

Parámetros de la curva del relé diferencial



Fuente: Protección de Transformadores de Potencia (AT/MT) - YouTube

Consideramos las ecuaciones para la pendiente:

$$Idifrencial = [I_p - I_s]$$

$$Irestricción = \frac{[I_p + I_s]}{2}$$

Donde:

I_p : Corriente por primario del transformador de potencia en por unidad pu,

I_s : Corriente por secundario del transformador de potencia en por unidad pu.

Para las pendientes SL1 y SL2:

$$\% \text{ de la pendiente} = \frac{Idiferencial}{Irestricción} \times 100$$

Pendiente SL1: Típicamente entre 20% y 40% en nuestro caso nosotros consideramos el 35%.

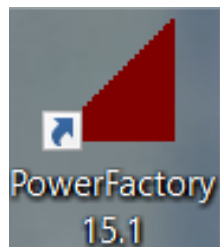
Pendiente SL2: Típicamente entre 50% y 100% en nuestro caso nosotros consideramos el 75%.

La corriente de arranque está entre 0.2 y 0.5 pu nosotros consideramos 0.5 pu.

CAPÍTULO 5.- MODELADO DE LA PROTECCIÓN POR SOBRECORRIENTE Y DIFERENCIAL DEL TRANSFORMADOR DE POTENCIA DE 25 MVA, CON EL SOFTWARE DIGSILENT-POWER FACTOR V 15.1.

5.1 Digsilent Power Factory.

El programa de cálculo DIGSILENT es una herramienta computarizada avanzada para el diseño asistido de ingeniería para el análisis de sistemas eléctricos de potencia comerciales, industriales y a gran escala. Este paquete computacional ha sido diseñado como un avanzado, integrado e interactivo, dedicado a los sistemas de potencia para lograr los objetivos principales de planificación y operación (Longantt, 2023).



Ofrece una solución integral orientada a objetos, con capacidades de modelado flexibles y herramientas para la automatización y el trabajo en equipo.

Funciones y capacidades clave:

- **Análisis de sistemas de potencia:**

Cubre el análisis de sistemas de generación, transmisión, distribución e industriales.

- **Funciones analíticas:**

Incluye cálculos de flujo de carga, cortocircuitos, armónicos, transitorios electromecánicos y electromagnéticos, así como análisis de protección y confiabilidad.

- **Modelado avanzado:**

Ofrece capacidades de modelado extensas y flexibles con una rica biblioteca de modelos para equipos de red, para todo tipo de representaciones de red y tecnologías de fase.

- **Visualización y gráficos:**

Cuenta con potentes diagramas de red y funciones de visualización gráfica.

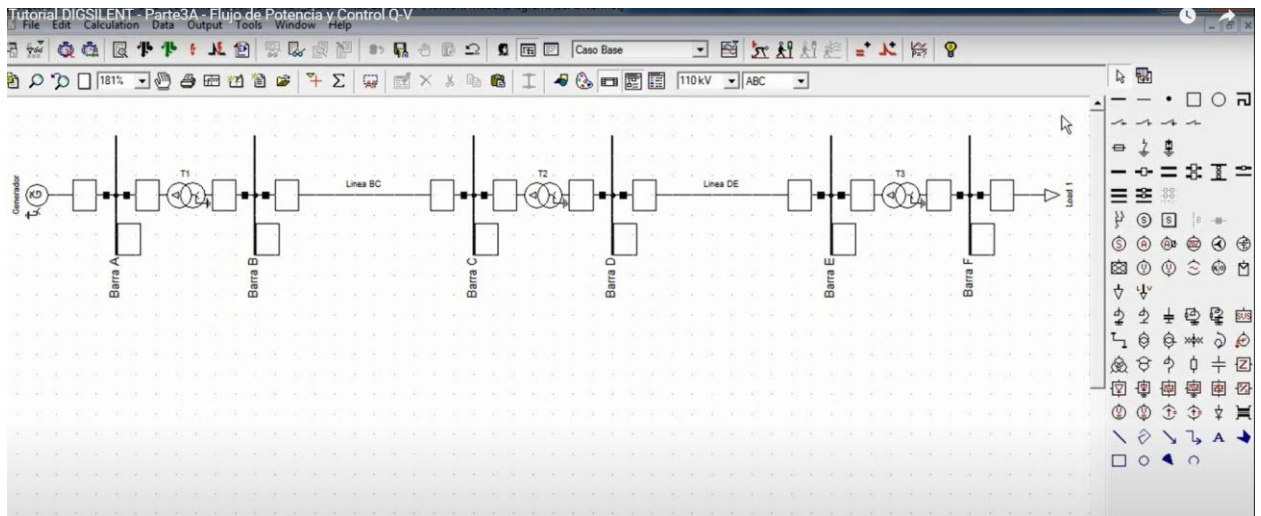
- **Integración y automatización:**

Permite la automatización de tareas mediante scripting ([Python](#) o [DPL](#)) y la extensión de funcionalidades con Add-on Modules y APIs.

Pantalla de edición de Digsilent:

Figura 8

Pantalla de Edición de Digsilent



Fuente: <https://www.youtube.com/watch?v=MKTHfK0g0kM>

5.2 Desarrollo de la Aplicación para la Protección por sobrecorriente en el programa Digsilent Power Factory, para el transformado de potencia de 25 MVA, 138/13.8 kV.

Para desarrollar la aplicación de la protección de sobrecorriente en un transformador de potencia de 25 MVA, 138/13.8 kV, modelamos su diagrama unifilar en el programa computacional DIGSILENT, donde integramos el transformador de potencia con sus parámetros:

Potencia del transformador trifásico $S = 25$ MVA

Voltajes del transformador 138/13.8 kV.

Impedancia del transformador $Z = 8\%$

Voltaje Primario 138 kV

Voltaje Secundario 13.8 kV

En este análisis realizamos la protección de sobrecorriente por el lado secundario del transformador, pero de igual forma se realiza bajo la misma filosofía la protección de sobrecorriente por el lado primario. El relé de sobrecorriente de referencia que utilizamos para este análisis es un relé de la marca SIEMENS, modelo SIPROTEC 7SJ6 Los parámetros de ajuste del relé fueron:



$$I_{pickup} = 0.873 \text{ pu}$$

$$I_{pickup} = 0.873 \text{ pu} \times 5 \text{ A} = 4.4 \text{ A.}$$

$$t_{disparo} = T_p = 0.15 \text{ s.}$$

$$I_{falla} = 13,089.6 \text{ A}$$

$$I_{falla \text{ pu}} = 13,089.6 \text{ A}$$

$$\text{Dial TD} = 0.83$$

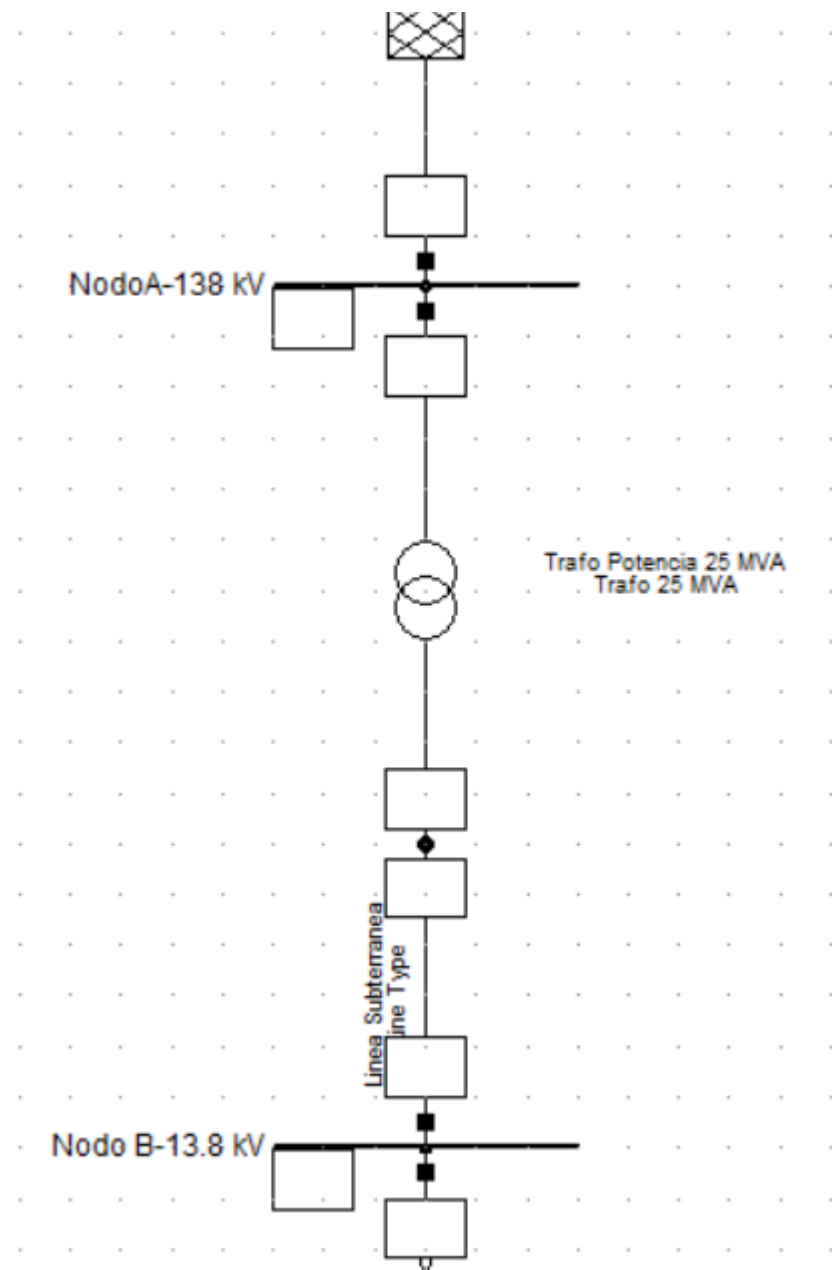
Relación de transformación del transformador de corriente por secundario:

$$1500/5 \text{ A, CTR} = 300$$

Creamos el diagrama unifilar en la pantalla gráfica de Digsilent:

Figura 9

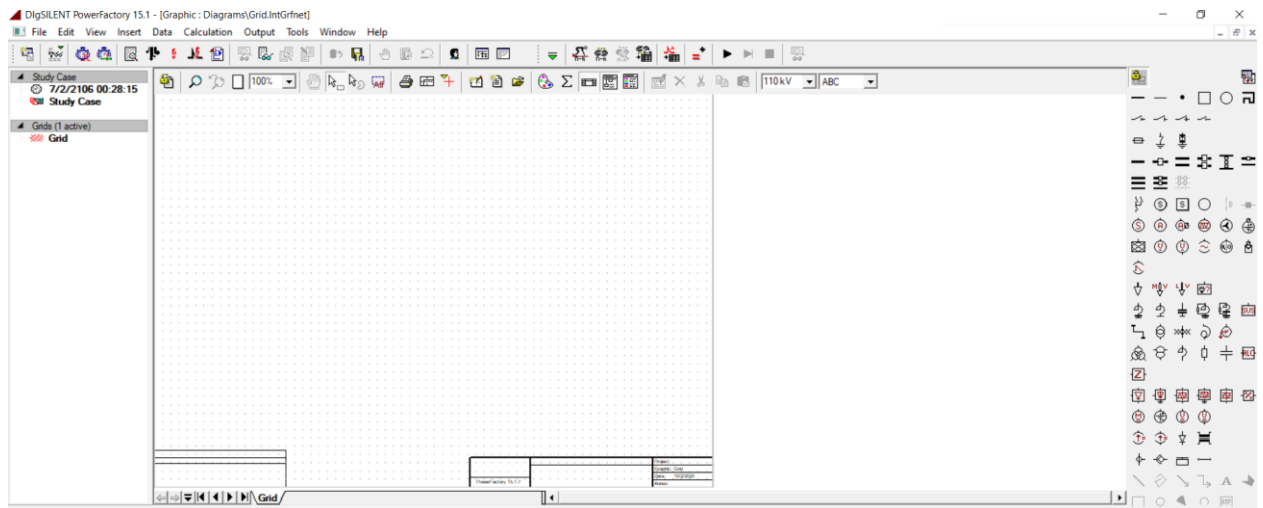
Diagrama Unfilar en Digsilent



Fuente: Propia

Figura 10

Pantalla Gráfica de Digsilent



Fuente: Propia

Parámetros del transformador

2-Winding Transformer Type - Equipment Type Library\Trafo 25 MVA.TypTr2

Basic Data	Name	Trafo 25 MVA
Load Flow	Technology	Three Phase Transformer
VDE/IEC Short-Circuit	Rated Power	25. MVA
Complete Short-Circuit	Nominal Frequency	60. Hz
ANSI Short-Circuit	Rated Voltage	
IEC 61363	HV-Side	138. kV
DC Short-Circuit	LV-Side	13.8 kV
RMS-Simulation	Vector Group	
EMT-Simulation	HV-Side	D
Harmonics/Power Quality	LV-Side	YN
Protection	Phase Shift	0. °30deg
Optimal Power Flow	Name	Dyn0
Reliability	Positive Sequence Impedance	
Generation Adequacy	Short-Circuit Voltage uk	8. %
Description	Copper Losses	0. kW
	Zero Sequence Impedance	
	Short-Circuit Voltage uk0	8. %
	SHC-Voltage (Re(uk0)) uk0r	0. %

OK Cancel

Parámetros del tramo subterráneo

Longitud 10 mts

Line - Grid\Linea Subterranea.Elmlne *

Basic Data

Load Flow

VDE/IEC Short-Circuit

Complete Short-Circuit

ANSI Short-Circuit

IEC 61363

DC Short-Circuit

RMS-Simulation

EMT-Simulation

Harmonics/Power Quality

Optimal Power Flow

Reliability

Generation Adequacy

Tie Open Point Opt.

Cable Sizing

Description

Name: Linea Subterranea

Type: Equipment Type Library\Line Type

Terminal i: Grid\Terminal\Cub_2

Terminal j: Grid\Nodo 2\Cub_1

Zone: Terminal i

Area: Terminal i

☐ Out of Service

Number of parallel Lines: 1

Parameters

Thermal Rating: ...

Length of Line: 0.01 km

Derating Factor: 1

Laying: Ground

Resulting Values

Rated Current (act.)	2 kA
Pos. Seq. Impedance, Z1	0.00533445 Ohm
Pos. Seq. Impedance, Angle	71.54128 deg
Pos. Seq. Resistance, R1	0.001689 Ohm
Pos. Seq. Reactance, X1	0.00506 Ohm
Zero Seq. Resistance, R0	0 Ohm
Zero Seq. Reactance, X0	0 Ohm
Earth-Fault Current, Ice	0 A
Earth Factor, Magnitude	0.333333
Earth Factor, Angle	180. deg

Type of Line: Cable

Line Model

☒ Lumped Parameter (PI)

☐ Distributed Parameter

Sections/Line Loads

OK

Cancel

Figure >>

Jump to ...

Tipo de cable XLPE 15 kV

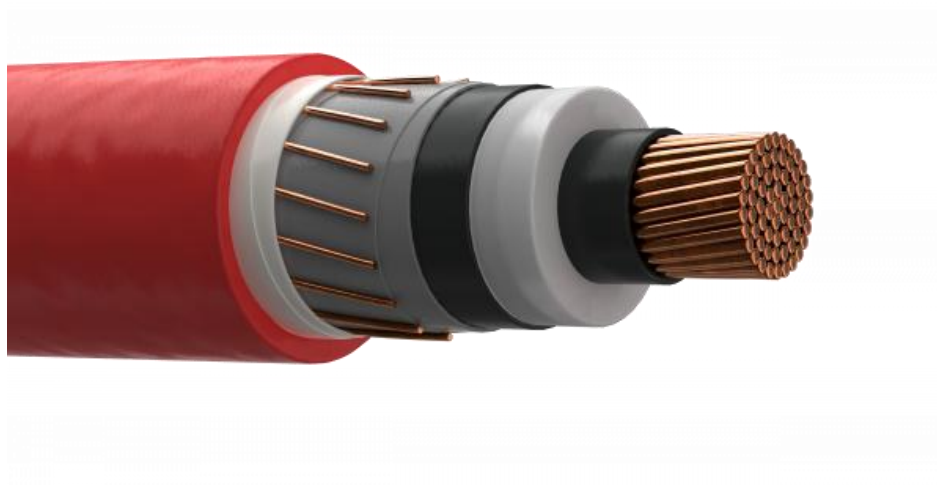


Figura 13

Ventana Digsilent parámetros del transformador

The screenshot shows the '2-Winding Transformer Type - Equipment Type Library\Trafo 25 MVA.TypTr2 *' window in Digsilent software. The window is divided into a left sidebar with a tree view and a main parameter configuration area. The tree view includes categories like Basic Data, Load Flow, Short-Circuit, RMS-Simulation, EMT-Simulation, Protection, and Reliability. The main area is currently displaying the 'Basic Data' tab, which contains the following parameters:

- Name:** Trafo 25 MVA
- Technology:** Three Phase Transformer
- Rated Power:** 25. MVA
- Nominal Frequency:** 60. Hz
- Rated Voltage:**
 - HV-Side: 138. kV
 - LV-Side: 13.8 kV
- Vector Group:**
 - HV-Side: D
 - LV-Side: YN
- Phase Shift:** 0. °30deg
- Name:** Dyn0
- Positive Sequence Impedance:**
 - Short-Circuit Voltage uk: 8. %
 - Copper Losses: 0. kW
- Zero Sequence Impedance:**
 - Short-Circuit Voltage uk0: 8. %
 - SHC-Voltage (Re(uk0)) uk0r: 0. %

Buttons for 'OK' and 'Cancel' are located in the top right corner of the window.

Fuente: Propia

Parámetros del Transformador de corriente por secundario para el relé:

Relación de transformación del transformador de corriente por secundario:

$$1500/5 \text{ A, CTR} = 300$$

Figura 14
Parametros de la red externa

Red Externa - Grid\External Grid.ElmXnet

General Avanzado Despacho Automático

Usar para el cálculo: Valores Máx.

Valores Máximos		Valores Mínimos	
Potencia c.c. Sk ² -máx	10000. MVA	Potencia c.c. Sk ² -mín	8000. MVA
Corriente c.c. Ik ² -máx	41.83698 kA	Corriente de Cortocircuito Ik ² -mín	33.46958 kA
Factor c (máx.)	1.1	Factor c (mín.)	1.
Relación R/X (máx.)	0.1	Relación R/X (mín.)	0.1
Relación de Impedancia		Relación de Impedancia	
ZZ/Z1 máx.	1.	ZZ/Z1 mín.	1.
X0/X1 máx.	1.	X0/X1 mín.	1.
R0/X0 máx.	0.1	R0/X0 mín.	0.1

☐ Considerar para la región de la reserva rodante

Claves de cambio de la gener: 100. %

OK
Cancelar
Figura
Ir a ...

Datos Básicos
Descripción
Flujo de Carga
Cortocircuito VDE/IEC
Cortocircuito Completo
Cortocircuito ANSI
Cortocircuito IEC 61363
Cortocircuito DC
Simulación Cuasi Dinámica
Simulación RMS
Simulación EMT
Calidad de Energía/Armónicos
Confiabilidad
Análisis de la Capacidad de Integración
Flujo Óptimo de Potencia
Planificación del Despacho
Colocación Óptima de Equipos

Figura 15

Parámetros del TC

Current Transformer - Grid\Terminal\Cub_1\TC1Sobrecorriente.StaCt

Basic Data

Additional Data

Description

Name

TC1Sobrecorriente

Type

Equipment Type Library\Current Transformer Type

☐ Out of Service

Cubicle

...

Location

Busbar

Grid\Terminal

Branch

Grid\Trafo Potencia 25 MVA

Orientation

--> Branch

Primary

Tap

1500.

A

Set

Secondary

Tap

5.

A

Connection

Y

Ratio:

1500A/5A

Complete Ratio:

1500A/5A

No. Phases

3

Phase Rotation

a-b-c

OK

Cancel

Fuente: Propia

Parámetros del relé de sobrecorriente:

Figura 16

Parámetros del Relé

Relay Model - Grid\Terminal\Cub_1\Relé Sobrecorriente Trafo.ElmRelay

Basic Data

Current/Voltage Transformer

Max./Min. Fault Currents

Description

Category: Overcurrent

Name: Relé Sobrecorriente Trafo

Relay Type: ... s\7SJ600\7SJ6001-xxAx0-0DA0

Application: Main Protection **Device Number:** 1

Location:

Reference: ...

Busbar: Grid\Terminal

Remote End: Grid\NodoA-138 kV

Connected Branch: Grid\Trafo Potencia 25 MVA

☐ Out of Service

Slot Definition:

	Net Elements Rel*,Elm*,Sta*,IntRef	
▶Ct-3p	✓ TC1 Sobrecorriente	
Measure	Measure	
Measure I2	Measure I2	
I>>>	~ I>>>	
I>>	~ I>>	
I>	~ I>	
Ip	✓ Ip	
Ie>>	~ Ie>>	
Ie>	~ Ie>	

Slot Update

OK

Cancel

Contents

Fuente: Propia

Ajustes del relé:

Figura 17

Ajuste del relé

Time Overcurrent - Grid\Terminal\Cub_1\Relé Sobrecorriente Trafo\Ip.RelToc

Basic Data

Tripping Times

Blocking

Description

IEC Symbol: I>t ANSI Symbol: 51

Measure Type: Phase Current (1ph)

Name: Ip

Type: ... s\7SJ600\7SJ6001-xxAx0-0DA0\Toc Phase

☐ Out of Service

Tripping Direction: None

Characteristic: ANSI/IEEE inverse

Current Setting: 4.0 sec.A 4 p.u. 1200 pri.A

Time Dial: 0.5

OK

Cancel

Relay

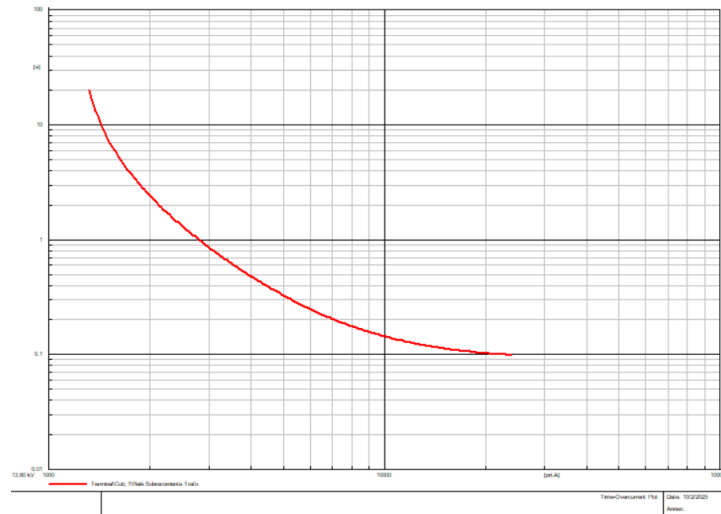
Calculate

Fuente: Propia

Curva de Disparo del relé

Figura 18

Curva de Disparo del Relé



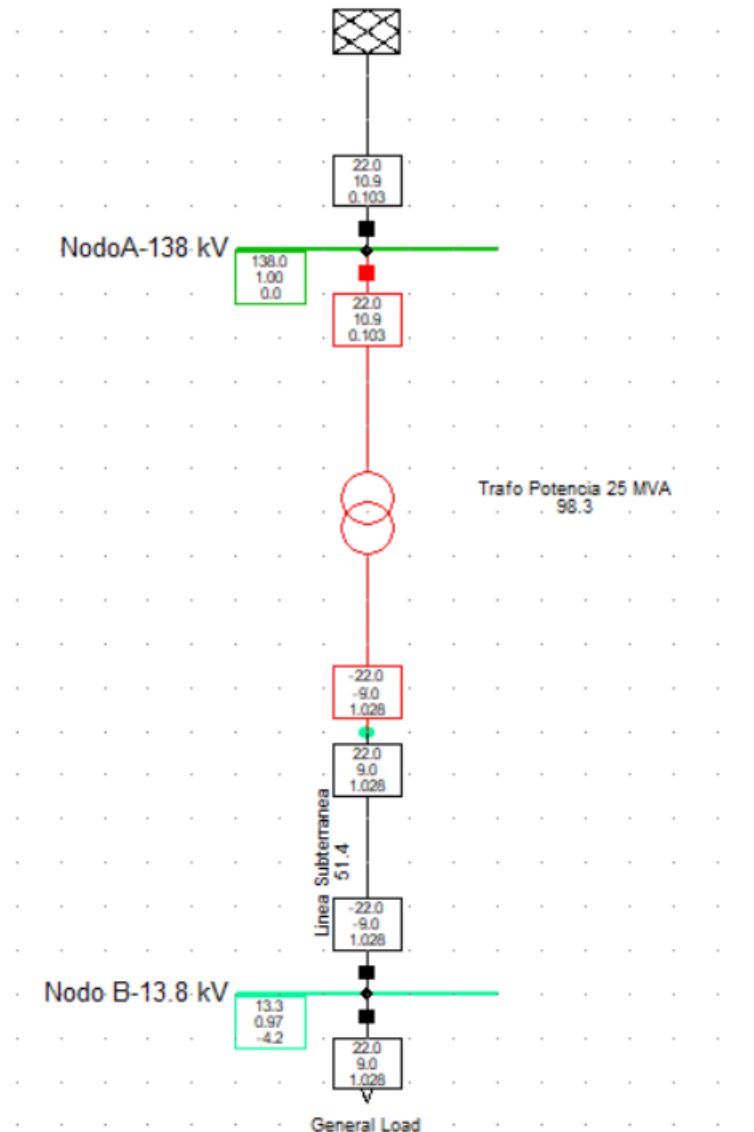
Fuente: Propia

Ahora simulamos una corrida de flujo de potencia para observar el funcionamiento del relé dentro de su zona de operación normal.

Valores obtenidos de la corrida de flujo de potencia:

Figura 19

Corrida de flujo de potencia

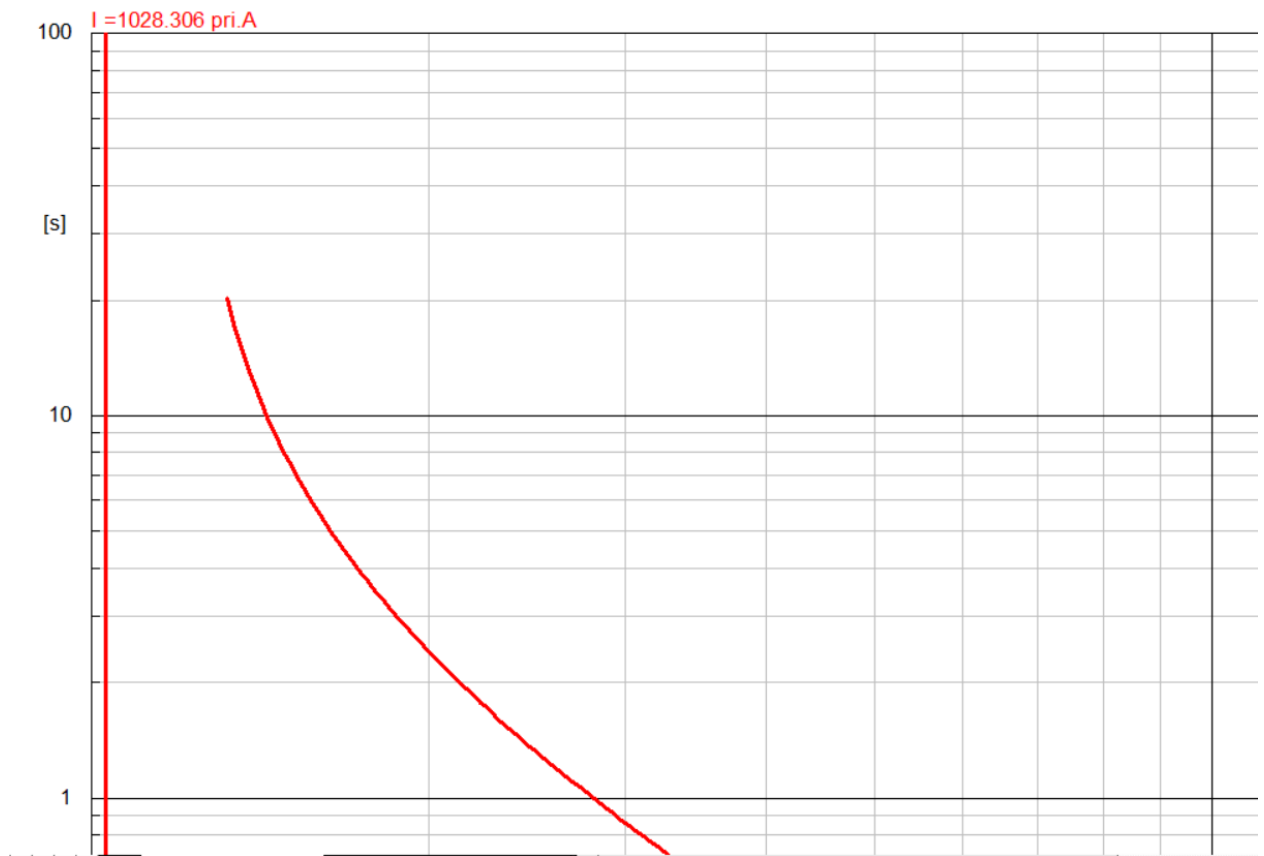


Fuente: Propia

De acuerdo con los resultados obtenidos de la corrida de flujo se obtiene una corriente por secundario 1,028 Amperios, vemos en la curva del relé que está en su operación normal de No Disparo.

Figura 20

Curva de Operación Normal del Relé

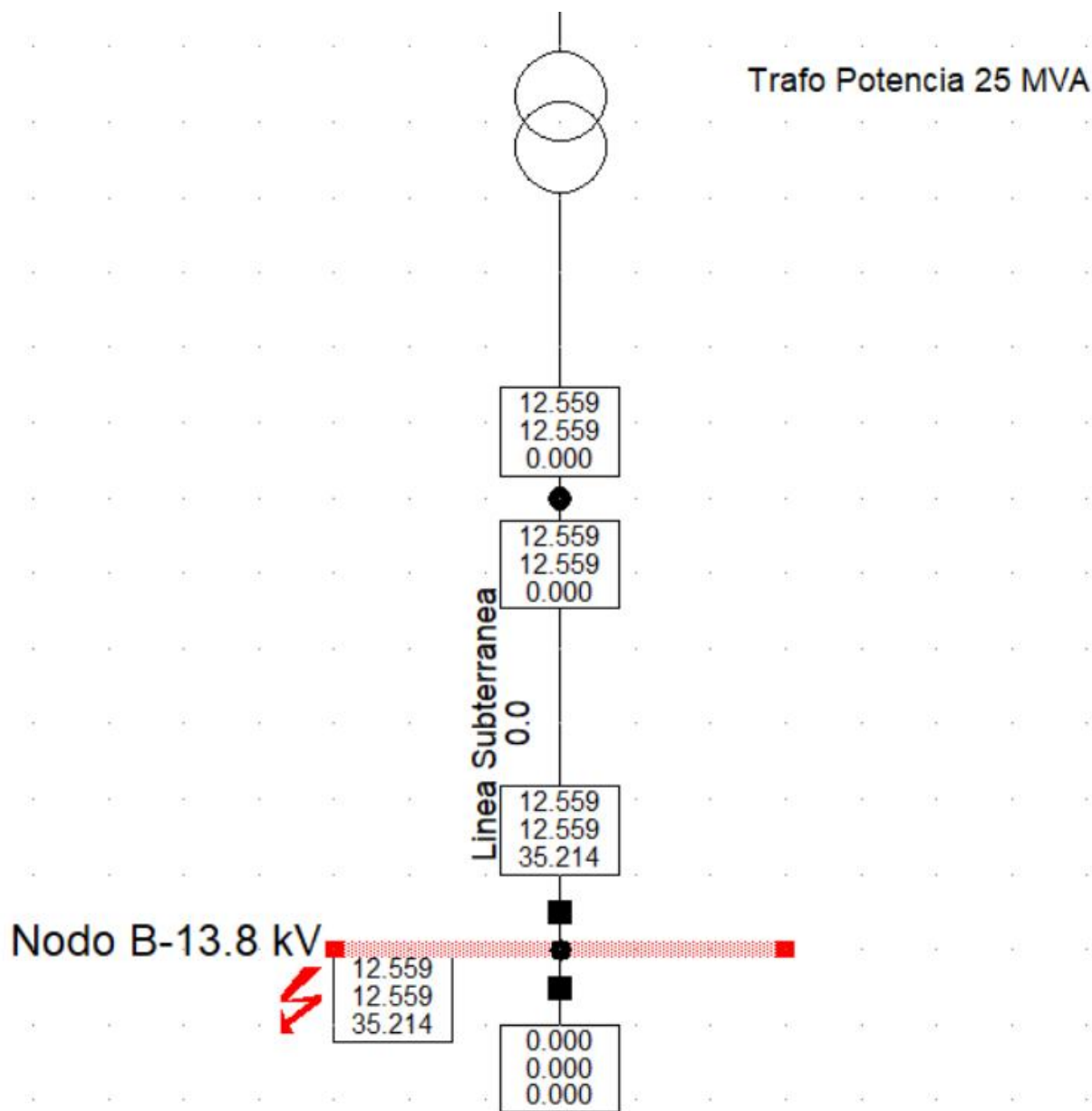


Fuente; Propia

Ahora simulamos un cortocircuito trifásico en el nodo B, para ver la actuación del relé.

Figura 21

Simulación de cortocircuito en barra B

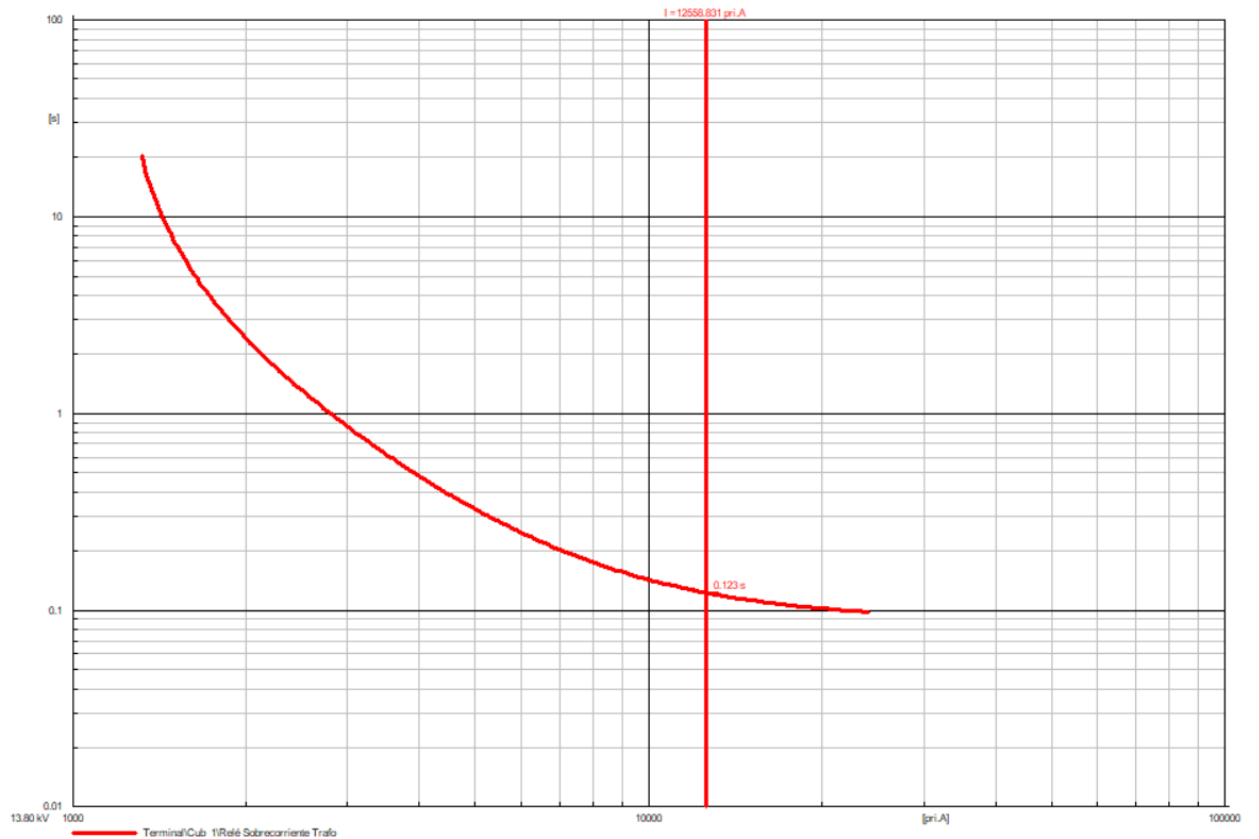


Fuente ; Propia

Y vemos la curva de disparo del relé:

Figura 22

Curva de Disparo del relé cortocircuito en barra B

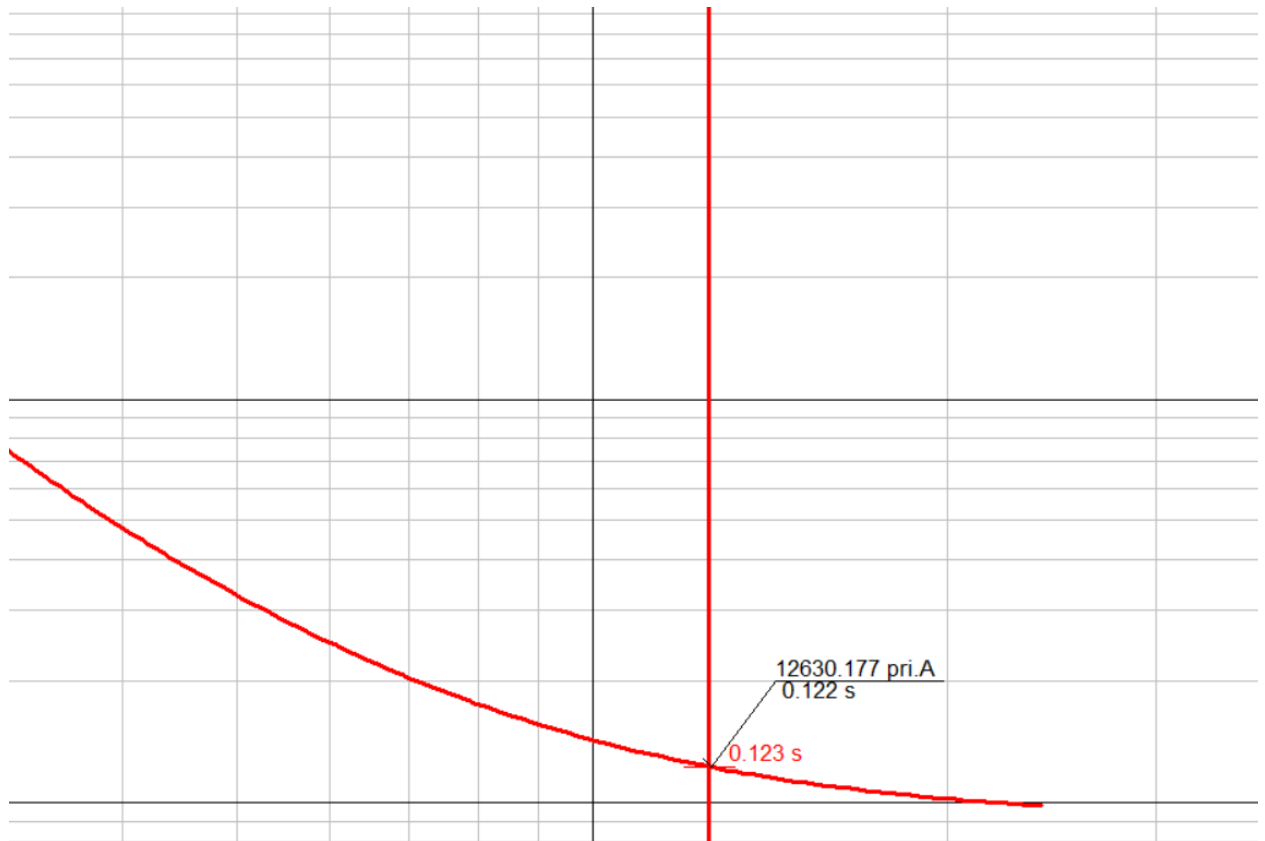


Fuente: Propia

Vemos que para una corriente de 12,558.8 Amperios el relé se dispara en 0.122 segundos

Figura 23

Tiempo de disparo del relé en condición de falla



Fuente: Propia.

Lo cual indica que su ajuste está correcto.

5.3 Desarrollo de la Aplicación para la Protección diferencial en el programa Digsilent Power Factory, para el transformado de potencia de 25 MVA, 138/13.8 kV.

Para desarrollar la aplicación de la protección diferencial en un transformador de potencia de 25 MVA, 138/13.8 kV, utilizamos el mismo diagrama unifilar de la figura No.10 de este documento en el programa computacional DIGSILENT, donde integramos el transformador de potencia con sus parámetros y los dos transformadores de corriente tanto por primario como por secundario y un modelo de relé diferencial marca SEL, modelo:

Figura24

Relé Diferencial



SEL-587

Current Differential Relay

PRODUCT CHANGE NOTICE—LAST-TIME BUY

SEL is announcing a Last-Time Buy (LTB) for the SEL-587. It will no longer be available for purchase after August 31, 2026. We recommend using the [SEL-787-2/-3/-4 Transformer Protection Relay](#) in its place.

The SEL-587 provides protection for any two-terminal apparatus, such as transformers, motors, generators, and reactors. Apply it for differential and overcurrent protection and use event reports for quick post-event analysis.

[SEL-587 and SEL-787-2/-3/-4 Comparison](#)

STARTING AT

Fuente: <https://selinc.com/products/587/>

Parámetros de los transformadores de corriente:

Por primario:

Relación de transformación del transformador de corriente por primario:

150/5 A, CTR = 30

Por secundario:

Relación de transformación del transformador de corriente por primario:

1500/5 A, CTR = 300

Parámetros de ajuste del relé:

Figura25

Parámetros del relé diferencial

Relay Model - Grid\Nodo A\Cub_2\Rele Dif 87T.ElmRelay

Basic Data

- Current/Voltage Transformer
- Max./Min. Fault Currents
- Description

Category: Differential

Name: Rele Dif 87T

Relay Type: ...ays\Schweitzer\SEL 587\SEL 587-5A

Application: Main Protection **Device Number:** 1

Location:

- Reference
- Busbar: Grid\Nodo B
- Branch: Grid\General Load (Attribute: cbranch)

☐ Out of Service

Slot Definition:

	Net Elements Rel*,Elm*,Sta*,IntRef	
Wd-1 Ct	✓ TcL2	
Wd-2 Ct	✓ TR23	
Wd-1 Meas	✓ Wd-1 Meas	
Wd-2 Meas	✓ Wd-2 Meas	
Differential	✓ Differential	
Diff RMS Meas	✓ Diff RMS Meas	
Diff RMS Meas-2nd-H	✓ Diff RMS Meas-2nd-H	
Diff RMS Meas-4th-H	✓ Diff RMS Meas-4th-H	
Diff RMS Meas-5th-H	✓ Diff RMS Meas-5th-H	

Slot Update

OK
Cancel
Contents

Fuente; Propia

Figura26

Ajuste de valores del TC por primario 150/5

Current Transformer - Grid\\Nodo A\\Cub_2\\Tcl2StaCt

Basic Data
Additional Data
Description

Name:

Type: Equipment Type Library/Current Transformer Type

☐ Out of Service

Location

Reference: Grid\\Nodo B\\Cub_1

Busbar: Grid\\Nodo B

Branch: Grid\\General Load

Tap selection

Primary: 150. A

Secondary: 5. A

Nameplate: 150A/5A

Configuration

Orientation:

No. Phases: 3

Phase rotation: a-b-c

Connection: Y

Additional Cores	
1	5A/5A

Fuente: Propia

Figura 27

Ajuste del TC por secundario 1500/5

Current Transformer - Grid\\Terminal\\Cub_1\\TR23.StaCt

Basic Data
Additional Data
Description

Name:

Type: Equipment Type Library/Current Transformer Type(3)

☐ Out of Service

Location

Reference:

Busbar: Grid\\Terminal

Branch: Grid\\Trafo 25 MVA

Tap selection

Primary: 1500. A

Secondary: 5. A

Nameplate: 1500A/5A

Configuration

Orientation:

No. Phases: 3

Phase rotation: a-b-c

Connection: Y

Additional Cores	
1	5A/5A

Fuente: Propia

Figura 28

Ajuste del relé parámetros del primario CTR y Voltaje

The screenshot shows a software window titled "CT Adapter - Grid\Nodo A\Cub_2\Rele Dif 87T\Wd-1 Meas\Wd Adapter.RelCtadapt". On the left is a sidebar with "Basic Data" and "Description". The main area contains the following fields:

- Adapter Type: 3 phases
- Name: Wd Adapter
- Type: ...er\SEL 587\SEL 587-5A\Wd-1 Meas\Wd Adapter
- ☐ Out of Service
- Current Transformer Ratio: 30
- Nominal Terminal Line-Line Voltage: 138.00 kV
- Current Transformer Connection: None

Buttons on the right include OK, Cancel, and Relay.

Fuente: Propia

Figura 29

Ajustes de parámetros del relé por secundario CTR y voltaje

The screenshot shows a software window titled "CT Adapter - Grid\Nodo A\Cub_2\Rele Dif 87T\Wd-2 Meas\Wd Adapter.RelCtadapt". On the left is a sidebar with "Basic Data" and "Description". The main area contains the following fields:

- Adapter Type: 3 phases
- Name: Wd Adapter
- Type: ...er\SEL 587\SEL 587-5A\Wd-2 Meas\Wd Adapter
- ☐ Out of Service
- Current Transformer Ratio: 300
- Nominal Terminal Line-Line Voltage: 13.80 kV
- Current Transformer Connection: None
- Transformer Group: 0

Buttons on the right include OK, Cancel, and Relay.

Fuente: Propia

Figura 30

parámetros de ajuste de la cura del relé

Differential Protection - Grid\Nodo A\Cub_2\Rele Dif 87T\Differential.RelBiasidiff

Basic Data

Tap

Harmonic Blocking

Description

IEC Symbol: Id ANSI Symbol: 87

Measure Type: 3ph

Name: Differential

Type: → ...ays\Schweitzer\SEL 587\SEL 587-5A\Differential

☐ Out of Service

Release Threshold: 0.50 tap

Restraint 1st Slope Threshold: 1. tap

Restraint 2nd Slope Threshold: 3.0 tap

Restraint 1st Slope: 35 %

Restraint 2nd Slope: 75 %

Unrestrained Differential Threshold: 6.1 tap

Total Time: 0.015 s

OK

Cancel

Relay

Fuente Propia:

Release Threshold = Valor de arranque de la corriente de restricción.

Restraint 1st Slope Threshold = Punto de arranque de la primera pendiente.

Restraint 2st Slope Threshold = Punto de arranque de la segunda pendiente,

Restraint 1st Slope = El valor % de la primera pendiente

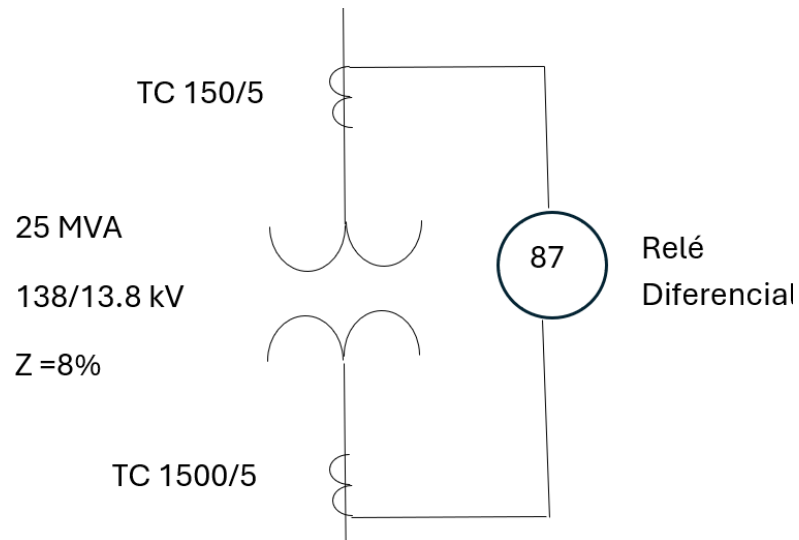
Restraint 2st Slope = El valor % de la segunda pendiente

Unrestrained Differential Threshold = Función Direccional no restringida

Un esquema gráfico de la protección diferencial sería el mostrado a continuación:

Figura 31

Unifilar de la protección Diferencial

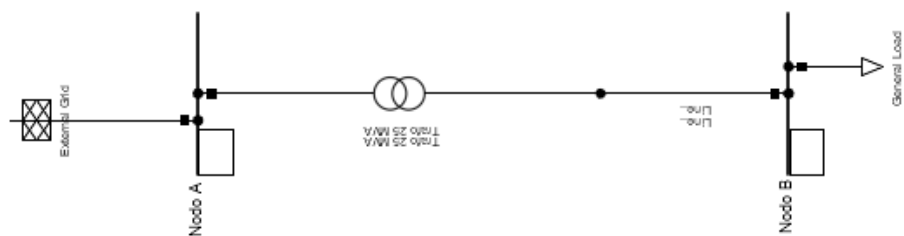


Fuente: Propia

El diagrama unifilar en el programa Digsilent se muestra a continuación:

Figura 32

Unifilar de la protección Diferencial

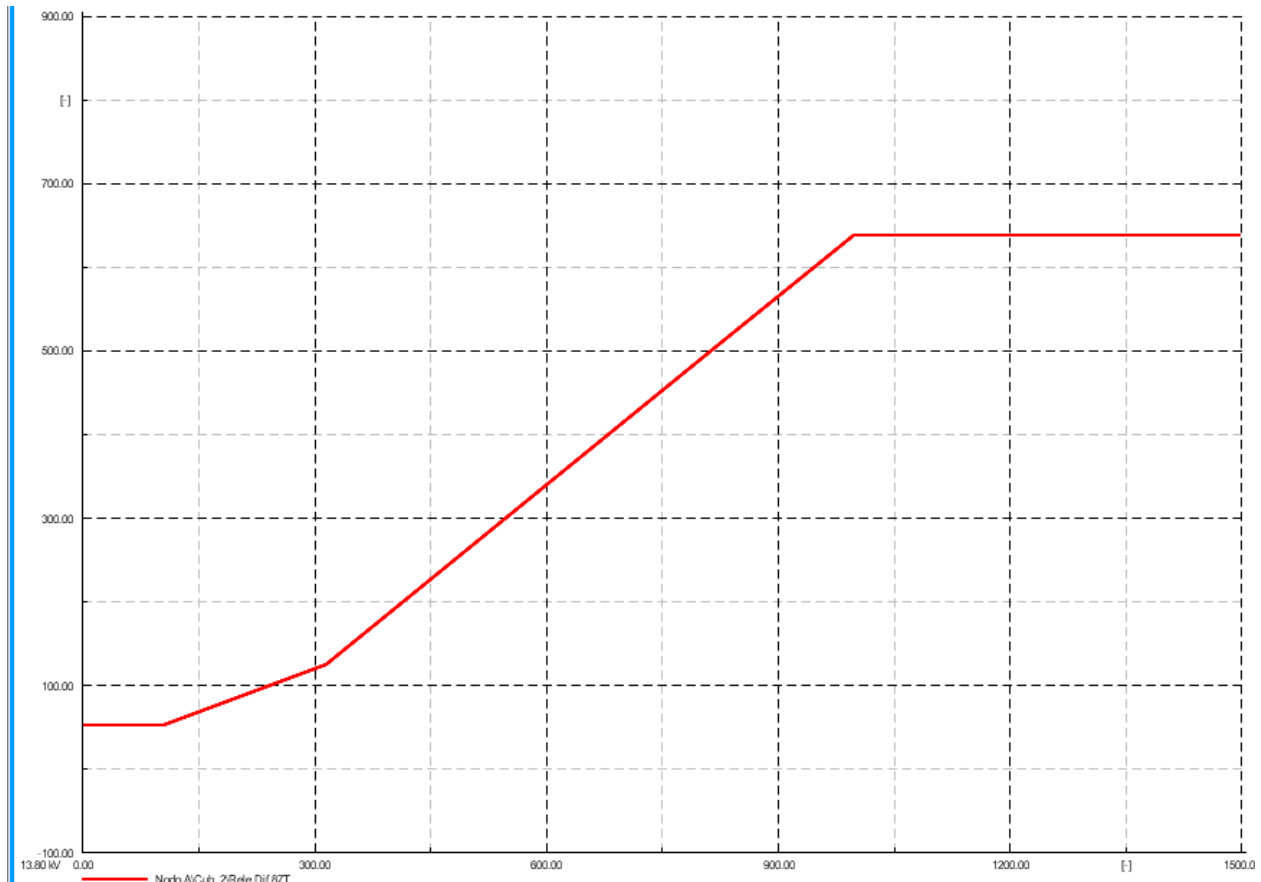


Fuente: Propia

La curva de comparación de la corriente diferencial del relé obtenidas del programa Digsilent se muestra a continuación:

Figura33

Curva de corriente diferencial del relé

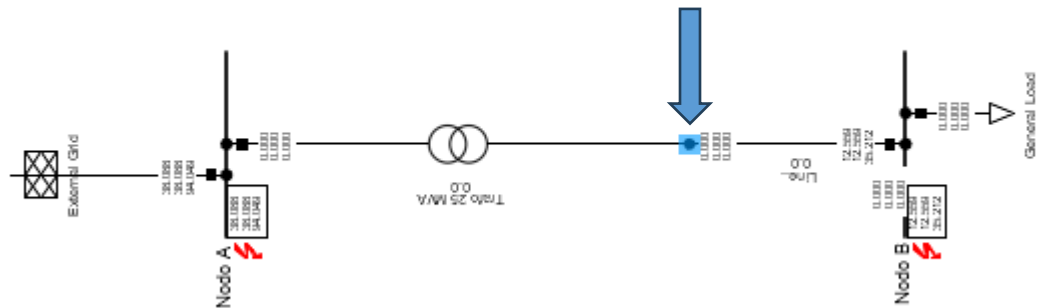


Fuente propia:

Para validar el correcto funcionamiento del relé ejecutamos una falla de cortocircuito interno en el nodo de unión:

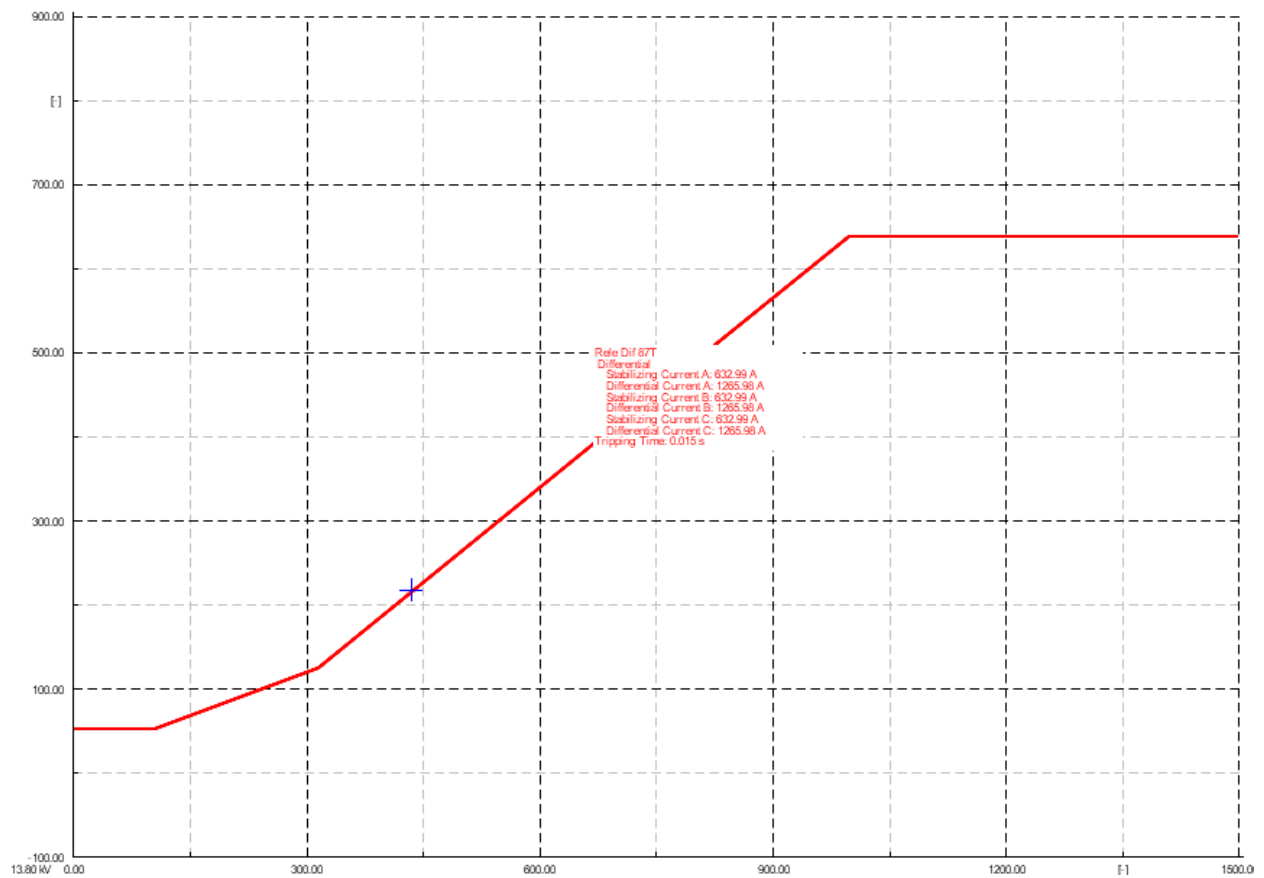
Figura34

Simulación de falla interna



Fuente: Propia

Y vemos la curva de disparo del relé:

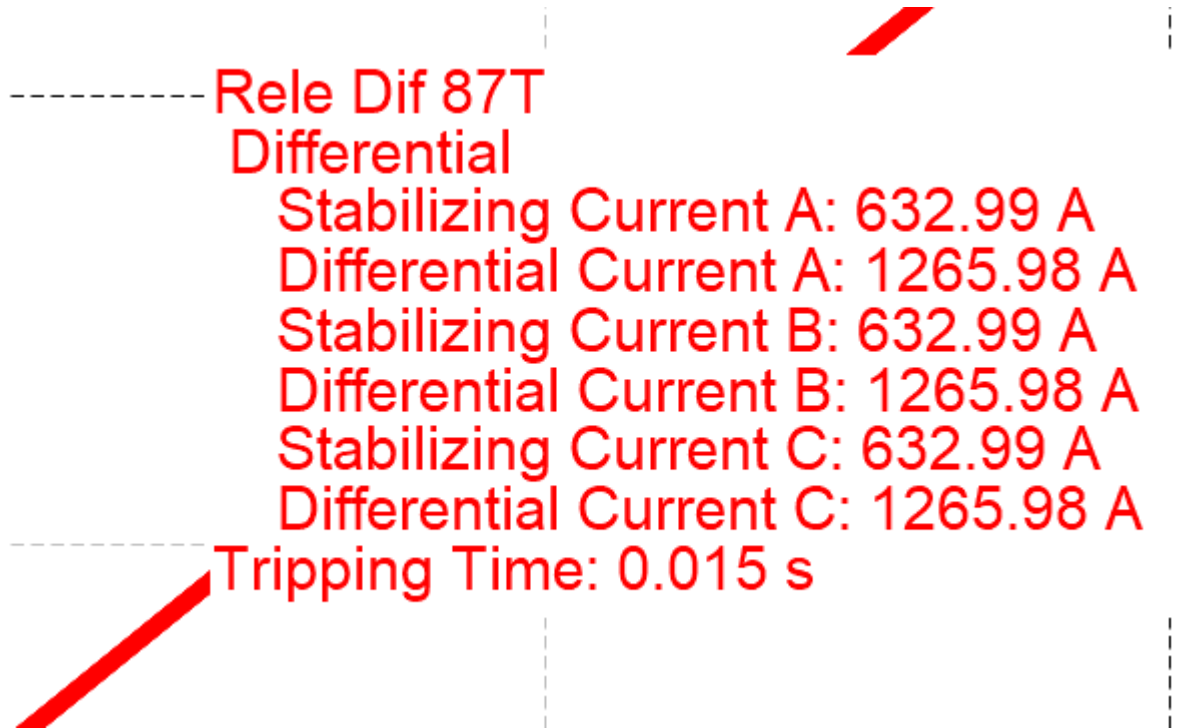


Fuente: Propia

Observamos los valores de la corriente diferencial y la corriente de restricción:

Figura 35

Corriente Diferencial



Fuente: Propia

Esta es una falla interna, por lo tanto, actúa la protección en un tiempo de 0.015 segundos.

CAPÍTULO 6.- ANÁLISIS DE LOS RESULTADOS DEL MODELAJE DE LA PROTECCIÓN APLICABLE A LOS TRANSFORMADORES DE POTENCIA DE 25 MVA, 138/13.8 KV.

Hemos visto de manera teórica y práctica los dos tipos de protección para transformadores de potencia ante fallas internas y externas.

En cuanto a la protección de sobrecorriente para fallas internas, evaluamos la aplicación de los relés de sobrecorriente, donde los parámetros considerados fueron:

- Potencia del transformador en MVA

- Los Voltajes primario y secundario del transformador en kV.

- Impedancia del transformador en porcentaje %

- El cálculo de la corriente nominal del transformador

- Los valores de corriente por primario y secundario de los transformadores de corriente.

- El cálculo del valor de la corriente de arranque del relé

- El tiempo de ajuste de disparo del relé.

- El valor del dial de la curva de disparo del relé.

- La Selección de la curva de disparo del relé.

En cuanto a la simulación realizada en la hoja Excel y los resultados obtenidos de la simulación de la protección por sobrecorriente del transformador de potencia, podemos decir que efectivamente si se realizan los ajustes de cálculo correspondientes al transformador de potencia a proteger, se logró la efectiva protección del transformador en cuanto al tiempo de disparo dentro de los valores establecidos, evitando así el daño al transformador y evitando la falta de continuidad del suministro de la energía eléctrica.

Para el caso de la protección diferencial, los parámetros evaluados fueron:

- La potencia nominal del transformador

La corriente nominal del transformador

La selección de los transformadores de corriente por primario y secundario del transformador.

El Tipo de relé diferencial

La corriente mínima de restricción.

El valor del Tap1

El valor del Tap2

De los resultados de la simulación tanto en la hoja de trabajo Excel, como en el programa Digsilent, evaluamos que efectivamente si ajustamos correctamente los parámetros del relé, la protección diferencial será efectiva contra fallas internas, protegiendo el transformador.

CAPÍTULO 7.- PROPUESTA METODOLÓGICA DE CRITERIOS Y FILOSOFÍA DE PROTECCIÓN APLICABLES A LOS TRANSFORMADORES DE POTENCIA DE 25 MVA, 138/13.8 KV.

.Propuesta Metodológica.

Para elaborar la propuesta metodológica sobre los criterios y la filosofía para la protección de los transformadores de potencia de 25 MVA, 138/13.8 kV, debemos considerar las siguientes tres fallas que pueden afectar a los transformadores;

1. Fallas en el equipo auxiliar que forma parte del transformador.
2. Fallas internas, en los devanados y conexiones del transformador.
3. Fallas externas, sobrecargas y cortocircuitos

Ya que, en caso de las fallas en los equipos auxiliares del transformador, tales como bajo nivel de aceite, fallas de aislamiento en el núcleo, etc. Todas estas protecciones ya vienen integradas con las protecciones propias del transformador, por lo tanto nos centraremos en las fallas internas y externas.

La protección de los transformadores de potencia utiliza una metodología de protección basada en relés para detectar fallas internas y externas, basándose en la filosofía de la protección diferencial (87T) como método principal y complementándose con protección de sobrecorriente (51/51N) para respaldo y detección de fallas más amplias. La protección diferencial, que compara las corrientes de entrada y salida del transformador, es crucial para detectar cortocircuitos y defectos en el aislamiento, mientras que los relés de sobrecorriente ofrecen respaldo y protección contra sobrecargas.

Protección Diferencial (87T):

Principio: Se basa en la Primera Ley de Kirchhoff, donde en condiciones normales, la suma de las corrientes que entran a un elemento debe ser igual a la suma de las corrientes que salen.

Detección de Fallas: Un relé diferencial (87T) compara las corrientes que entran y salen del transformador. Si estas corrientes no son iguales (debido a un cortocircuito interno o falla de aislamiento), el relé detecta la falla y dispara el interruptor para aislar el transformador.

Función Principal: Esta es la protección principal para transformadores de potencia, diseñada para detectar fallas internas rápidas y severas.

Protección de Respaldo (51 y 51N):

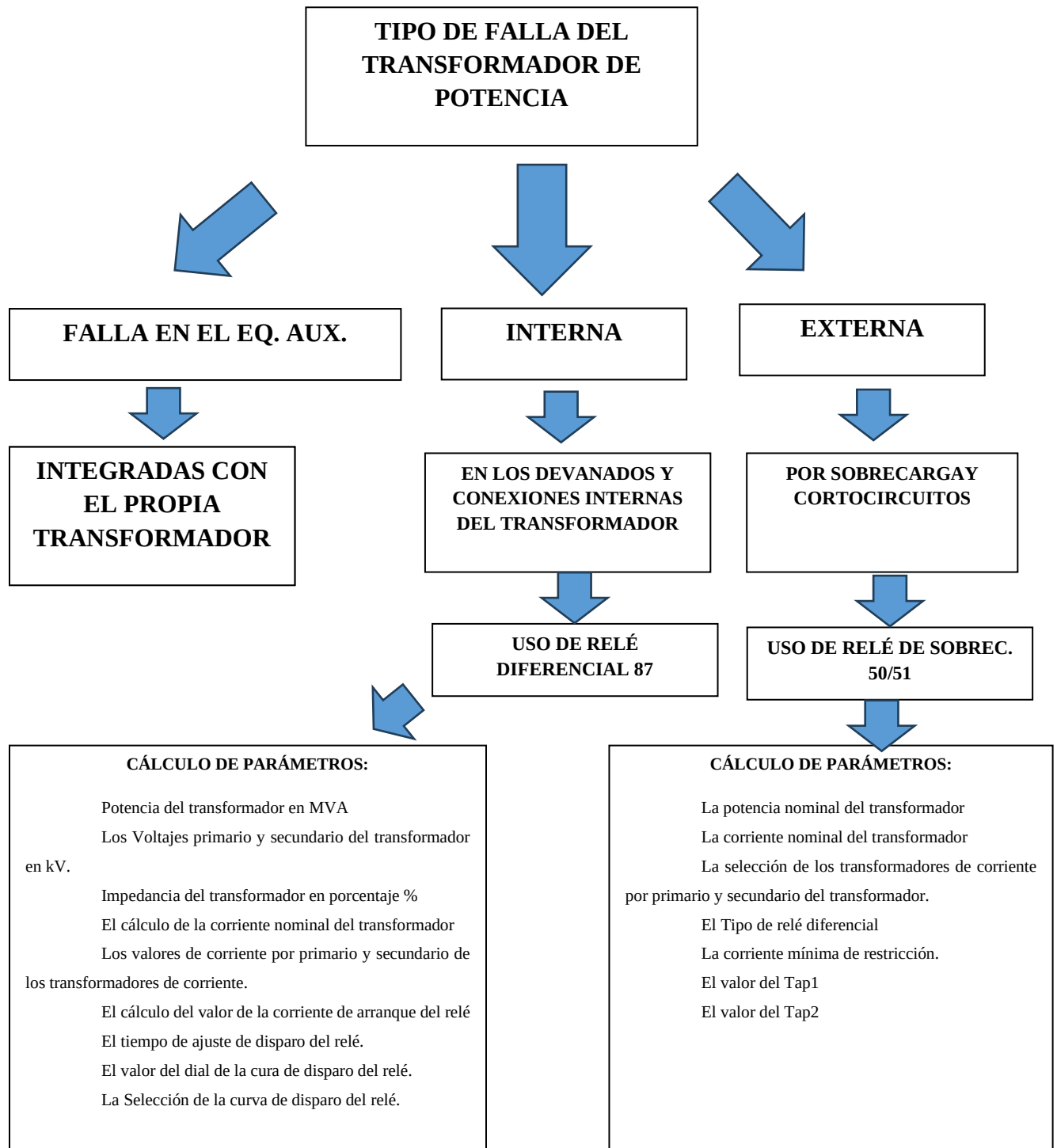
Relés de Sobrecarga y Cortocircuito: Se utilizan relés de sobrecorriente (generalmente de tiempo inverso, número ANSI 51) para fallas que no son detectadas por la protección diferencial.

Factores Adicionales:

Transformadores de Instrumento: Los transformadores de corriente (TC) son esenciales para reducir los niveles de alta corriente a valores seguros para los relés de protección, aislando el circuito de potencia del circuito de protección.

Estudios de Simulación: Se realizan estudios de simulación, a menudo con software especializado como PowerFactory, para determinar los ajustes adecuados de los relés y asegurar la coordinación del sistema.

PROPUESTA METODOLÓGICA



CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES.

Conclusiones

- ✓ Se determinó que una vez analizadas las diferentes tipos de fallas en los transformadores de potencia y considerando la filosofía de protección para sistemas eléctricos, es posibles resumir en unos pasos sencillos una guía de protección, que permitirá evitar el daño a estos equipos de costos económicos representativos.
- ✓ Luego de evaluar los criterios y filosofía para los transformadores de potencia nos permiten calcular con mayor exactitud los parámetros de ajuste para la protección de los transformadores de potencia, modelados con programas computaciones para visualizar el estado real de las protecciones.
- ✓ Al aplicar los criterios y filosofía para la protección de los transformadores de potencia, evaluados con el programa computacional Digsilent, pudimos seleccionar apropiadamente el ajuste para las protecciones y visualizar de forma gráfica su nivel de disparo en la zona de protección correcta.
- ✓ Luego de analizar los resultados obtenidos del modelaje de la protección de los transformadores de potencia de 25 MVA, 138/13.8 kV, logramos establecer en base a los resultados obtenidos los criterios y filosofía para la protección del transformador de potencia.
- ✓ Los resultados obtenidos en esta investigación presentan una la propuesta metodológica de los criterios y filosofía de protección, aplicables a los transformadores de potencia de 25 MVA, 138/13.8 kV.

RECOMENDACIONES

Recomendamos:

- Como recomendación queremos mencionar la importancia de que los profesionales del área de ingeniería eléctrica comprendan concretamente los conceptos detrás de una protección de sobrecorriente y diferencial y que utilicen la simulación mediante programas especializados para que puede visualizar el buen funcionamiento de las protecciones de transformadores de potencia.
- Recomendamos para los estudiantes de la rama de ingeniería eléctrica y profesionales des esta especialidad, dominen el uso de programas computaciones especializados para el ajuste y simulación de protecciones de transformadores de potencia.

Bibliografía

1. CONCEPTO. (2025). *Criterio*. Obtenido de <https://concepto.de/criterio/>
2. COTOPAXI-Ecuador, U. T. (2025). *Protección de sobrecorriente*. Obtenido de <https://www.electro-genesis.com/WebGenesisBiblio/Literatura/Articulos/Operacion%20Control%20y%20Proteccion/Proteccion/Dispositivos%20de%20Proteccion/Reles/Web/RELEVADOR-SOBRECORRIENTE.pdf>
3. DAELIM. (2025). *Guía de Protección de Transformadores de Potencia*. Obtenido de <https://www.daelimtransformer.com/electrical-transformer-protection.html>
4. Electric, T. y. (2025). *Que es Un Rele*. Obtenido de <https://tydelectric.com/reles-proteccion-sistema-electrico-potencia/>
5. ELECTROENERGY. (2024). *Esquema de protección diferencial*. Obtenido de https://electroenergyic.com/esquema-basico-de-proteccion-diferencial-en-transformadores-87t/?srsltid=AfmBOorjFJOkc9wZBPRzSa_eOR85FN6ACgO-Wn9zF-umlBqnVXe1-Ay6
6. ENDESA. (2024). Obtenido de <https://www.fundacionendesa.org/es/educacion/endesa-educa/recursos/corrientes-alternas-con-un-transformador-electrico#:~:text=Los%20transformadores%20se%20basan%20en,devanado%20primario%20hasta%20el%20secundario.>
7. Ferrovial. (2024). Obtenido de <https://www.ferrovial.com/es/stem/transformadores/#:~:text=Un%20transformador%20tiene%2C%20por%20lo,corriente%2C%20conocida%20como%20devanado%20secundario.>
8. Fregoso, C. (2000). Obtenido de <http://www.ptolomeo.unam.mx:8080/jspui/bitstream/132.248.52.100/17156/5/Tesis.pdf>
9. GEBCO. (2024). Obtenido de <https://gebco.co/estadisticas-de-fallas-en-transformadores-de-potencia-y-mantenimiento-predictivo>
10. GEYA. (2025). *Tipos de relé de sobrecorriente*. Obtenido de <https://www.geya.net/es/types-of-overcurrent-relays-and-their-application/>
11. KELTOUR. (2025). *Que es un Relé*. Obtenido de <https://www.keltour.com/what-is-protective-relay/>
12. Longantt, F. (2023). *Digsilent Power Factory*. Obtenido de https://fglongatt.org/OLD/DIGSILENT_Cur_Basico.html

13. Santoyo, D. (2022). Obtenido de <https://www.studocu.com/es-mx/document/instituto-tecnologico-de-ciudad-madero/ingenieria-de-procesos/esquemas-de-proteccion-de-los-transformadores/39603770>
14. Schneider. (2024). Obtenido de https://www.ingenieros.es/files/Proyectos_1/el-transformador.pdf
15. TRAFOMEX. (2025). *Protección de Transformadores de Potencia*. Obtenido de <https://trafomex.com.mx/protecciones-de-transformadores-la-guia-completa/>
16. Universidad del Cono Sur de las Américas, C. (2023). *Crietrios de Protección de Transformadores de Potencia*. Obtenido de <https://inv.ucsa-ct.edu.py/geidise/wp-content/uploads/sites/4/2019/10/PPT2.-Protecciones-el%C3%A9ctricas-de-Transformadores-de-Potencia.pdf>
17. Vásquez, A. R. (2000). *Protección de Transformadores de Potencia*. Obtenido de <https://tesiunamdocumentos.dgb.unam.mx/ppt1997/0244789/0244789.pdf>

ANEXO