



UNIVERSIDAD DE CHILE  
FACULTAD DE CIENCIAS FÍSICAS Y MATEMÁTICAS  
DEPARTAMENTO DE INGENIERÍA ELÉCTRICA.

ESTUDIO Y ANÁLISIS DEL COMPORTAMIENTO DE PROTECCIONES DIFERENCIALES  
DE TRANSFORMADORES DE PODER

MEMORIA PARA OPTAR AL TÍTULO DE  
INGENIERO CIVIL ELECTRICISTA

CARLOS ULLOA CANALES

PROFESOR GUÍA  
VICTOR SEGOVIA CORNEJO

MIEMBROS DE LA COMISIÓN  
ARIEL VALDENEGRO ESPINOZA  
NELSON MORALES OSORIO

SANTIAGO DE CHILE  
NOVIEMBRE 2012

RESUMEN DE MEMORIA  
PARA OPTAR AL TÍTULO DE  
INGENIERO CIVIL ELECTRICISTA  
POR CARLOS ULLOA CANALES  
FECHA: NOVIEMBRE 2012  
PROF. GUÍA: VICTOR SEGOVIA CORNEJO

## ESTUDIO Y ANÁLISIS DEL COMPORTAMIENTO DE PROTECCIONES DIFERENCIALES DE TRANSFORMADORES DE PODER.

En este trabajo se presenta un estudio de la protección diferencial de transformadores de poder. Se comienza con el estudio y cálculo de ajuste de parámetros para la protección de un transformador de potencia típico de las instalaciones de Chilectra; estudio y cálculos extensibles a equipos e instalaciones de cualquier empresa de distribución. Se presentan algunas discusiones, principalmente respecto del grupo de construcción y conexión que se encuentra en las instalaciones de la compañía ya citada. El ajuste de parámetros se realiza para relés electromecánicos y digitales.

El estudio y desarrollo aquí presentado, se centra en particular en el relé modelo SEL587 del fabricante Schweitzer Electric Laboratories. Este relé corresponde a tecnología digital, tecnología que se emplea actualmente en la industria y constituye un estándar en nuevas instalaciones, desde esta perspectiva este trabajo es generalizable a cualquier modelo y fabricante.

A partir de información entregada por el fabricante en sus manuales de operación, además de información recopilada en diversos papers, se estudia el método numérico a través del cual el relé obtiene los valores de corriente de operación( $I_{op}$ ) y corriente de retención( $I_{rst}$ ). Este algoritmo se replica en una planilla de cálculo, en la que se limitan las variables de entrada, ya que se proyecta como herramienta de testeo, incluso en terreno por su sencillez. Se desarrolla entonces una planilla capaz de entregar valores de corriente de operación( $I_{op}$ ) y corriente de retención( $I_{rst}$ ), recibiendo como parámetro básicamente sólo la corriente de entrada al relé, es decir, la corriente de salida de los transformadores de corriente.

De forma paralela al desarrollo descrito, se realizan pruebas de rutina al relé, con el auxilio de una maleta hexafásica, obteniendo una completa colección de registros entregados por el relé en las diversas situaciones planteadas. En particular se estudia los valores de corriente de operación( $I_{op}$ ) y corriente de retención( $I_{rst}$ ) entregados ante ingresos de corrientes equilibradas en condiciones de operación normal o estable, también en condiciones cercanas a la frontera de operación, y ante condiciones de falla. Se reportan también pruebas con ingresos monofásicos.

De la comparación de los valores de corriente de operación( $I_{op}$ ) y corriente de retención( $I_{rst}$ ) registrados en las pruebas descritas anteriormente, con los valores entregados por el algoritmo desarrollado en la planilla, se comprueba cuán ajustados son los resultados entregados por esta última, lo que permite utilizarla como herramienta de simulación o testeo.

Se realiza finalmente trabajo en laboratorio, simulando las fallas más frecuentes en el comisionamiento y operación de relés diferenciales de transformadores de poder, proponiendo un protocolo de lectura e interpretación de los registros de corriente de operación y retención; y verificación del relé, con el apoyo de la planilla desarrollada durante este trabajo.

A mis Padres  
A Katherinne  
A Tiago

## Agradecimientos

Agradezco a mi profesor guía señor Víctor Segovia, el haber aceptado guiarme en este trabajo, sorteando la distancia física existente entre Santiago y Calama. Agradezco sus comentarios y aportes tanto al desarrollo de esta memoria, como a mi incorporación al ejercicio profesional.

Agradezco a los Profesores de la Facultad señores Nelson Morales, Nicolás Beltrán y Marcos Orchard quienes me inspiraron cuando los días no eran buenos.

Agradezco a Mariana, Rosa y Jovanna, de la biblioteca de la facultad. Trabajar con ellas y recibir su aprecio, por su gran calidad humana, es una experiencia que atesoro.

Agradezco a toda la Unidad de Estudio de Protecciones de Chilectra S.A. en especial al ingeniero Adolfo Molina, quien siempre estuvo dispuesto a responder mis preguntas, y a guiarme en la búsqueda de material de estudio durante el desarrollo de este trabajo. Agradezco también su amistad.

Agradezco a mis compañeros y amigos, Andrés y Manuel, por su amistad, su compañía, su comprensión, por aparecer en el momento indicado en mi camino. Por esas tardes de estudio, y esos almuerzos de reflexión. Espero la vida profesional nos permita mantener la cercanía.

Agradezco a mis padres Carlos y Natividad por su inspiración, por su esfuerzo, por su sacrificio diario. Todo lo conseguido es también de ellos.

Agradezco a Katherinne, mi esposa, por su infinito amor, por su apoyo, también por su paciencia en este largo camino. Por comprender y perdonar la falta de tiempo que en ocasiones este camino causó.

Agradezco a Tiago, por su sonrisa y por el brillo de sus ojos, mi inspiración.

# Índice de contenidos

Agradecimientos.....	iv
Índice de contenidos.....	v
Capítulo 1. Introducción.....	1
1.1.- Motivación.....	1
1.2.- Objetivos.....	1
1.3.- Alcance.....	2
1.4.- Organización del trabajo de memoria.....	2
1.5.- Metodología.....	3
Capítulo 2. Revisión Bibliográfica.....	4
2.1.-Presentación de protecciones.....	4
2.1.1.- Introducción.....	4
2.1.2.- Tipos de fallas.....	4
2.1.3.- Filosofía de protección.....	5
2.1.4.- Esquemas para la protección diferencial de transformadores.....	6
2.2.- Especificaciones técnicas de un transformador.....	9
2.3.- Ajuste relé GE-BDD15.....	11
2.3.1.- Compensación de desfase angular.....	11
2.3.2.- Compensación de magnitud de corrientes.....	12
2.3.3.- Cálculo de Tap.....	12
2.3.4.- Ajuste sensibilidad (% de slope) del relé.....	16
2.4.- Ajuste relé SEL587-1.....	17
2.4.1.- Ajuste de los elementos del relé diferencial.....	17
2.5.- Ventajas de protecciones estáticas.....	20
Capítulo 3. Obtención de planilla, cálculo Iop, y Irst.....	22
3.1.- Introducción.....	22
3.2.- Definición nomenclatura de corrientes.....	23
3.3.- Corrección por tap.....	24
3.4.- Obtención del desfase de corrientes.....	24
3.4.1.- Discusión acerca de instalaciones de Chilectra S.A.....	25
3.5.- Corrección desfase.....	26
3.6.- Cálculo Iop e Irst.....	27
3.7.- Presentación gráfica de planilla.....	28
3.7.1.-Pantalla de configuración.....	28
3.7.2.- Hoja de cálculos.....	30
3.7.3.-Interfaz de entrega de resultados.....	31
4.1.- Introducción.....	33
4.2.- Resultados de pruebas a relé SEL-587.....	36
4.2.1.- Tablas con resultados de pruebas a relé SEL-587.....	37
4.3.- Resultados de simulación utilizando planilla.....	38
4.3.1.- Tablas con resultados de simulación utilizando planilla.....	38
4.4.- Comparación de resultados relé, planilla.....	39
Capítulo 5. Ensayo y Protocolo.....	41
5.1.- Introducción.....	41
5.2.- Simulación de errores comunes en comisionamiento.....	41

5.3.- Resultados de simulaciones propuestas.....	42
5.3.1.- Simulaciones al 30% de potencia nominal.....	42
5.3.2.- Simulaciones al 10% de potencia nominal.....	45
5.4.- Protocolo de lectura e interpretación, de los registros de corrientes de operación y retención; y verificación del relé.....	48
6.- Conclusiones.....	50
6.1.- Desafíos pendientes.....	51
Referencias.....	52
Anexo A.....	54
Pruebas sesión 1.....	54
Pruebas sesión 2.....	56
Pruebas sesión 3.....	57
Pruebas sesión 4.....	59
Anexo B.....	62
Ajustes adicionales del relé SEL-587.....	62
Anexo C.....	64

# Capítulo 1. Introducción.

## 1.1.- Motivación.

La operación de los Sistemas de Potencia es imposible de efectuar eliminando por completo la posibilidad de ocurrencia de alteraciones, sobreexigencias o fallas, sean estas por maniobras, accidentes o acción mal intencionada. Por esto resulta fundamental, además de contar con una adecuada coordinación de aislación en toda la instalación, contar con un sistema de protecciones que permita despejar, de manera pronta y oportuna, toda circulación de corriente que pueda resultar en deterioro o destrucción de la instalación o los equipos.

El desarrollo tecnológico ha logrado buenas soluciones para los diversos esquemas de protección. En particular, para la protección diferencial de transformadores, la tecnología digital resulta particularmente ventajosa, al eliminar la necesidad de compensaciones de desfase angular, de manera previa al ingreso al relé, de las corrientes medidas en el lado de alta y de media tensión del transformador, ofreciendo además otras funciones, entre las que destacan la retención para el energizado y sobre flujo, registro de eventos y oscilografías. En esta línea de acción, consecuente con el interés de operar un sistema robusto y con altas tasas de disponibilidad, Chilectra S.A. ha ido incorporando a sus sistemas de protección, por construcción de nuevas instalaciones o renovación de instalaciones existentes, tecnología digital o de estado sólido, contando así, con un variado parque de tecnologías, desde relé electromecánico hasta relé de tipo digital.

Aun cuando la incorporación de tecnología digital debiese resultar en una simplificación del proceso de instalación y configuración de la protección diferencial de transformadores de poder, se ha constatado en la práctica, al interior de Chilectra S.A., la existencia de dificultades en la interpretación de la lectura de las corrientes diferenciales y de retención, debido a la compensación interna de los desfases angulares, los que se observan como consecuencia del grupo de conexión de los transformadores de poder y sus respectivos transformadores de corrientes (TT/CC).

La situación descrita motiva la realización de este trabajo, al detectarse la posibilidad de contribuir con conocimiento, al realizar un análisis y estudio de la protección diferencial de transformadores de poder, en particular relés de tecnología digital, que permita la comprensión de estos elementos, de manera de lograr establecer un protocolo de lectura e interpretación de los registros de corriente de operación y retención; y verificación del relé, aprovechando de mejor manera las potencialidades de esta nueva tecnología, por ejemplo en cuanto a la simplificación de conexiones que ofrece, realizando así un aporte a las labores operativas de Chilectra S.A.

## 1.2.- Objetivos.

Se espera lograr entendimiento de los fenómenos ligados a la protección diferencial de transformadores de poder, en particular.

*Objetivos generales.*

Estudiar fenómenos ligados a la protección con relé electromecánico.

Profundizar en el entendimiento de los ajustes necesarios para la puesta en servicio de la

protección diferencial de transformadores de poder.

Conocer los modelos de relé más utilizados en esta aplicación, y conocer las referencias a sus catálogos y distribuidores.

Comprender en profundidad la aplicación de relés de tecnología digital a la protección diferencial de transformadores de poder.

*Objetivos específicos.*

Programación de una herramienta computacional de apoyo a la interpretación de lecturas del relé.

Presentar un protocolo de lectura e interpretación de los registros de corriente de operación y retención; y verificación del relé.

### 1.3.- Alcance.

El trabajo aquí presentado muestra el estudio de la protección diferencial de transformador de poder en las instalaciones de Chilectra S.A., en particular la comprensión de los esquemas habituales de protección, así como la tecnología actual disponible para estos efectos, además de tecnología que hace algunos años está en servicio, y que por razones económicas, aún se encuentra en operaciones en las instalaciones de la compañía.

Se ha tomado como preocupación central de este trabajo el estudio del modelo de relé de protección SEL-587, ejemplificado en el que se encuentra instalado en la S/E Santa Elena.

Se entrega una planilla de cálculo capaz de replicar los valores calculados por el software del relé. Esto lo hace en régimen permanente, no se hace cargo de análisis de frecuencias, por lo que el estudio de los bloqueos por armónicas, disponibles en este relé, quedan fuera del alcance de este estudio.

Finalmente se propone un protocolo de lectura e interpretación de los registros de corriente de operación y retención; y verificación del relé, que busca enfrentar los errores reportados como más comunes en las instalaciones.

### 1.4.- Organización del trabajo de memoria.

Este trabajo de memoria está organizado en 6 capítulos

El capítulo 1 realiza la presentación del tema, además de definir los objetivos y alcances del trabajo.

En el capítulo 2 se presenta una revisión bibliográfica que soporta el trabajo desarrollado, en ella se puede hallar la especificación típica de un transformador de poder, y de los equipos auxiliares necesarios para su protección, tales como, transformadores de corriente. Se muestra la técnica usual para el ajuste de una protección diferencial.

El capítulo 3 se hace cargo de mostrar el desarrollo y obtención de la planilla de cálculo capaz de replicar los valores de corriente de operación  $I_{op}$ , y corriente de retención  $I_{rst}$  entregados por el software del relé.

En el capítulo 4 se presentan los resultados de pruebas realizadas en laboratorio a una unidad del

relé modelo SEL-587. También se presentan los resultados obtenidos por la planilla de cálculo para los mismos ingresos. Tablas comparativas de estos resultados se incluyen también.

El capítulo 5 propone un protocolo de lectura e interpretación de los registros de corrientes de operación y retención y verificación del relé, que busca enfrentar los errores reportados como más comunes en las instalaciones. Se utiliza la planilla desarrollada en este trabajo como herramienta práctica para la visualización de errores típicos y no siempre de fácil detección en pruebas de comisionamiento.

Finalmente el capítulo 6 entrega las conclusiones del estudio, así como posibles líneas de trabajo que el autor tiene en mente, mas por tiempo no se ha podido incluir en esta memoria; quedan estos propuestos como trabajos futuros.

## 1.5.- Metodología.

El trabajo planteado se ha esquematizado en tres etapas, las que se describen a continuación.

Etapa 1 o Etapa de Estudio: En esta etapa se realiza una revisión de la literatura técnica que permite la profundización en la comprensión del problema descrito. Se utilizan preferentemente libros técnicos reconocidos en el área, además de papers generados en congresos o por los fabricantes de las protecciones, que han permitido, más allá de conocer la teoría, estar al día en la aplicación de ésta a los problemas contingentes de la industria a nivel global. Al final de esta etapa se obtienen esquemas de conexión detallados y estimaciones de lecturas en el relé ante distintos escenarios hipotéticos de carga. Al finalizar esta etapa se cuenta con una planilla capaz de replicar los valores entregados por el relé SEL587, al realizar el mismo algoritmo matemático que este.

Etapa 2 o Etapa de Laboratorio: En esta etapa se realiza una contrastación de los esquemas obtenidos en la etapa previa con la implementación de éstos en los equipos disponibles en el laboratorio de Chilectra S.A., lo que permite verificar la validez e idoneidad de dichos resultados. A partir de este escenario, se obtuvieron lecturas del relé ante distintas situaciones de prueba, y se confrontaron los resultados con los entregados por la planilla de cálculo que contiene el algoritmo del SEL587.

Etapa 3 o Etapa de estudio de errores típicos: En esta etapa se realiza la proposición del protocolo de conexionado, lectura e interpretación, con el auxilio validado de la herramienta computacional de apoyo a la interpretación de lecturas de relé. Se espera que esta herramienta permita en el futuro una simplificación en los procesos de instalación y puesta en marcha, al permitir contrastar los valores esperados de cada etapa del protocolo de conexionado, lectura e interpretación sugerido.

## Capítulo 2. Revisión Bibliográfica.

### 2.1.-Presentación de protecciones.

#### 2.1.1.- Introducción.

Según definición de la IEEE, un Relé, es un dispositivo cuya función es detectar condiciones anormales o de naturaleza peligrosa en el sistema de potencia, e iniciar acciones de control apropiadas[17], condiciones siempre existentes, sean estas por maniobras, accidentes o acción mal intencionada.

Resulta fundamental, además de contar con una adecuada coordinación de aislación en toda la instalación, contar con un sistema de protecciones que permita despejar, de manera pronta y oportuna, toda circulación de corriente que pueda resultar en deterioro o destrucción de la instalación o los equipos.

Dentro de estas precauciones, por el tamaño de la inversión y su importancia capital en el funcionamiento del sistema de potencia, la protección del transformador de poder tiene un lugar destacado[14].

El desarrollo tecnológico ha logrado buenas soluciones para los diversos esquemas de protección. En particular, para la protección diferencial de transformadores, la tecnología digital resulta particularmente ventajosa, al eliminar la necesidad de compensaciones de desfase angular, de manera previa al ingreso al relé, de las corrientes medidas en el lado de alta y de media tensión del transformador, ofreciendo además otras funciones, entre las que destacan la retención para el energizado y sobre flujo, registro de eventos y oscilografías.

En este capítulo se presenta una enumeración del tipo de fallas y la filosofía o idea base detrás de la protección diferencial de transformadores, así como una breve descripción de los esquemas de protección más utilizados, entre los que se encuentra el esquema de retención de porcentaje, esquema utilizado en el desarrollo de este trabajo. Además se presenta el cálculo de ajustes para la protección diferencial de transformador de poder de 110/12,5kV, de una red de distribución. El cálculo de ajustes se realiza considerando dos tecnologías distintas, a saber, se realiza el ajuste para un relé electromecánico modelo BDD15, del fabricante General Electric GE; y para un relé de tipo numérico, del fabricante SEL, modelo 587.

#### 2.1.2.- Tipos de fallas.

Entre los elementos que componen un sistema de potencia, los transformadores presentan un índice de falla menor comparativamente[1], sin embargo, sus fallas suelen ser catastróficas, es decir, la mayor parte de las veces implican la destrucción del equipo, eventualmente seguido de fuego. Siendo un elemento costoso y de lenta reposición, resulta fundamental contar con esquemas de protección rápidos y seguros.

Las fallas a las que se enfrenta un transformador, normalmente se clasifican como fallas externas o fallas internas, según si ocurren fuera o dentro de la zona de protección, zona comprendida entre los transformadores de corriente utilizados para entregar parámetros de decisión al relé, definición concordante con “que los componentes [...]de un sistema eléctrico

puedan aislarse adecuadamente con el mínimo de desconexiones de interruptores, sin comprometer a otros que pueden continuar dando servicio”[3]. Las fallas externas ocurren fuera de la zona de protección diferencial, y tienen como consecuencia una disminución de la vida útil del transformador a causa del posible daño de sus bobinas producto, entre otros, de la magnitud de corriente que circula en el sistema y sus componentes en estos fenómenos.

Las fallas internas ocurren dentro de la zona de protección diferencial del transformador. Por lo general implican averías serias del transformador, e incluyen el riesgo de incendio en transformadores sumergidos en aceite. Estas fallas, se pueden dividir en fallas incipientes y activas[2][19].

Entre las fallas incipientes se puede enumerar

- \* Sobrecalentamiento interno del transformador.
- \* Sobreflujo en el núcleo.
- \* Sobrepresión en el tanque del transformador.
- \* Arco entre un devanado y el núcleo, debido a sobretensiones causadas por descargas atmosféricas, fallas externas o maniobras en el sistema.
- \* Arco entre devanados o entre espiras contiguas de capas diferentes, debido a movimientos de las bobinas bajo la acción de fuerzas electromecánicas durante cortocircuitos externos.
- \* Fallas en los contactos de cambiadores de derivaciones produciéndose calentamiento o cortocircuito de vueltas entre derivaciones.

Las fallas activas requieren de una acción rápida que permita la desconexión, evitando así daños severos en el transformador. Es posible mencionar dentro de esta clasificación:

- \* Cortocircuito en el devanado primario del transformador.
- \* Cortocircuito en el devanado secundario del transformador
- \* Cortocircuito entre fases.
- \* Cortocircuito entre espiras de los devanados.
- \* Fallas en el núcleo.
- \* Fallas en el tanque del transformador.

### 2.1.3.- Filosofía de protección.

El objetivo básico detrás del dispositivo de protección es diferente según se trate de fallas incipientes o de fallas activas. Una breve descripción de los objetivos de la protección en transformadores se presenta a continuación.

Protección contra fallas activas: La protección debe desconectar rápidamente el transformador en falla del sistema de potencia, logrando así minimizar el efecto de la perturbación, además de limitar el daño al equipo. Una falla no despejada completa y prontamente puede ocasionar daños importantes en el equipo, siendo necesaria una larga y costosa reparación, cuando es posible, pudiendo resultar incluso peligroso para el personal que se encuentre en la proximidad del transformador al momento de la falla.

Protección de fallas incipientes: Las fallas incipientes no demandan una desconexión inmediata del equipo. Estas fallas se desarrollan lentamente y existe la posibilidad de una observación cuidadosa e incluso la realización de pruebas. Además, estas fallas no siempre son detectadas por el mismo dispositivo de protección utilizado para fallas activas. Por esto se debe utilizar sistemas de protección adicionales para la detección de fallas incipientes.

Los dos tipos de protecciones necesarias, según las descripciones de fallas hasta aquí entregadas, normalmente se diseñan para ser mutuamente excluyentes y complementarias. La bibliografía presenta como única excepción en esta filosofía “el uso de la protección Buchholz en Europa, la que ha sido proclamada como la única protección necesaria”[18], aunque en redes Chilenas, por citar alguna, esta idea no goza de gran popularidad.

En aplicaciones de protección diferencial es importante el uso de transformadores de corriente de características similares en ambos lados del transformador de poder[8]. Si los dos sets de transformadores de corriente son de características diferentes, cualquier corriente fluyendo en la bobina de operación del relé tenderá a incrementar el burden o carga del transformador de corriente de mayor precisión, y a disminuir el burden del transformador de corriente de menor exactitud.

#### 2.1.4.- Esquemas para la protección diferencial de transformadores.

La protección diferencial de transformadores se basa en la comparación de las corrientes primaria y secundaria disponible en el secundario de los TC instalados en los límites de la zona de protección diferencial, en los extremos del transformador de potencia. En condiciones normales ambas corriente son iguales, expresadas en un sistema por unidad, es decir:

$$I_p + I_s = 0 \quad (2.1)$$

En el caso de ocurrir un cortocircuito en el transformador, la corriente total de cortocircuito es igual a la suma de ambas corrientes:

$$I_p + I_s = I_{cc} \quad (2.2)$$

No obstante, las corriente primaria y secundaria no son exactamente iguales, debido a diversas circunstancias, ente las que se puede mencionar:

- \* Hay diferencia de fase entre las corrientes de línea en un transformador con conexión estrella-delta.
- \* Tienen distintos niveles de tensión, lo que implica que los transformadores de corriente son de distinto tipo, y tienen relaciones de transformación diferentes.
- \* Puede no haber concordancia entre las relaciones de transformación de los transformadores de corriente disponibles y la del transformador protegido.
- \* La relación de transformación puede ser variable para devanados de regulación de tensión.

\* La corriente de magnetización del transformador puede tener un valor transitorio alto, valor que la protección puede interpretar erróneamente como indicativas de una falla interna.

\* Alta corriente de excitación causada por la sobreexcitación de transformadores.

Los primeros cuatro puntos se resuelven con la adecuada conexión de los TC, y la selección de los parámetros de ajuste del relé, sin embargo las altas corrientes debido al efecto de inrush y la sobreexcitación del transformador se resuelven por diseño del relé, y no por ajuste.

El relé de protección diferencial tiene por principio de funcionamiento la comparación de dos corrientes, una denominada corriente de operación  $I_{op}$  y la corriente de retención  $I_{rst}$ [4].

La corriente de operación  $I_{op}$  está constituida por la suma fasorial de las corrientes del lado primario y secundario del transformador disponibles en los secundarios de los TC. En el caso de la corriente de retención  $I_{rst}$ , existen distintas formas para definirla en función del diseño del relé, siendo la más típica la diferencia fasorial de las corrientes secundarias de los TC, o como en el caso que se estudiará en este trabajo, la semisuma. Ambas corrientes se expresan como

$$I_{op} = [I_p + I_s] \quad (2.3)$$

$$I_{rst} = \left[ \frac{I_p + I_s}{2} \right] \quad (2.4)$$

En condiciones ideales, para una falla interna al área de protección diferencial, en este caso el transformador de poder, se tendrá que la corriente de retención será cero,

$$I_{rst} = 0 \quad (2.5)$$

lo que asegura la operación del relé; en cambio para una falla externa, se presenta la condición

$$I_{op} = 0 \quad (2.6)$$

con lo cual se asegura la no operación de la protección. En el caso de una falla interna, la corriente de operación resulta igual a la corriente de cortocircuito

$$I_{op} = I_{cc} \quad (2.7)$$

en esta condición la corriente de retención es muy pequeña y aproximadamente igual a la corriente de desbalance

$$I_{rst} = I_d \quad (2.8)$$

además, como

$$I_{cc} \gg I_d \quad (2.9)$$

se asegura la operación del relé, independiente del error de transformación que presenten los TC

En condiciones reales, la corriente por el secundario de los TC no son iguales, debido principalmente a los errores de transformación de los TC, originados por el grado de saturación de los mismos[9], esto significa que

$$I_{op} > 0 \quad (2.10)$$

,con un valor aproximadamente igual a la diferencia entre las corrientes secundarias de los TC, este valor se conoce como corriente de desbalance, es decir,

$$I_{op} = I_d \quad (2.11)$$

Con el objetivo de evitar operaciones incorrectas para fallas externas, debido a errores en los TC, la característica de operación del relé, esto es, la relación matemática entre ambas corrientes, es de la forma.

$$I_{op} = kI_{rst} + I_{pu} \quad (2.12)$$

donde  $k$  es la pendiente de la característica de operación del relé e  $I_{pu}$  es la corriente de operación mínima en la que el relé opera, dada la condición de corriente de retención cero.

Debido a la forma de la característica de operación, relés que operan bajo esta lógica, en la literatura son conocidos como relé de porcentaje[2][17][19], ya que por lo general el parámetro de ajuste  $k$  se expresa en por ciento. Una de las principales características de este esquema es su robustez frente a errores de transformación de los TC, pues mientras mayor es la corriente de desbalance en una falla externa, mayor será la corriente de retención, evitando de esta forma la operación incorrecta del relé.

Otro punto de suma importancia es la protección durante la energización del equipo, para esto, la técnica más empleada en prevenir falsos disparos de la protección es el bloqueo o retención de armónicos. Las corrientes de inrush difieren de las corrientes de fallas internas por el alto porcentaje de armónicos[2][19], mientras que el segundo armónico es de mayor magnitud

bajo condiciones de energización. Una de las formas en que opera el relé es, si el contenido del segundo armónico de la corriente diferencial excede un porcentaje predefinido de la fundamental, esta corriente de magnetización se asume descriptiva del fenómeno expuesto, y la protección es bloqueada para evitar una operación incorrecta. No obstante estos algoritmos presentan problemas para discriminar entre las corrientes de inrush y de cortocircuito en condiciones de energización[19], en que la corriente de magnetización es altamente simétrica y en consecuencia presenta un bajo contenido de armónicas.

## 2.2.- Especificaciones técnicas de un transformador.

En el presente apartado se entregan las especificaciones técnicas del transformador que se utilizará como ejemplo en los cálculos de ajustes de protección diferencial entregados en este capítulo. Este transformador corresponde a las instalaciones de Chilectra S.A., y es denominado de enlace en la nomenclatura de la compañía, ya que enlaza el anillo de 110kV con tensiones menores. También se detalla los transformadores de corriente disponibles para esta aplicación.

La tabla a continuación muestra las especificaciones técnicas del transformador de poder a proteger, además de detalles constructivos.

- Marca	:	Rhona			
- N° de Serie	:	9860			
- Potencias	:	OA	FA	FOA	FOA
		12 MVA	16 MVA	20 MVA	22,4 MVA
- Impedancia	:	8,80%	base 12 MVA, toma nominal.		
- Conexión	:	Dyn1			
- Aumento de T°	:	65 °C			
- Tensión nominal Primario	:	110 kV ± 2*2,5%	Delta		
- Tensión nominal Secundario	:	12,5 kV	Estrella		

Tabla 2.1 Especificaciones transformador de Poder

Este Transformador, no posee cambiador de tap bajo carga (CTBC).

a) Valores de tensión según posición de cambiador manual de taps.

Tensión bornes (kV)	Corriente OA (A)	Corriente FOA (A)	Posición
115,50	60,00	112,00	1
112,75	61,40	114,70	2
110,00	63,00	117,60	3
107,25	64,60	120,60	4
104,50	66,30	123,80	5

Tabla 2.2 Especificaciones cambiador manual de tap.

La tabla 2.2 muestra la tensión en bornes del transformador, en función de la posición escogida para el cambiador manual de taps.

b) Transformadores de corriente (TT/CC) en bushing AT del transformador de poder.

Se detallan las tomas de los transformadores de corriente multirango disponibles en las instalaciones a proteger. Se destaca en cursiva y rojo la toma seleccionada.

TC	Terminales	Relación	Aplicación
TC1, TC2	X2-X3	50/5	Protección sobrecorriente de respaldo de fase y protección diferencial
	X1-X2	100/5	
	X1-X3	150/5	
	<i>X4-X5</i>	<i>200/5</i>	
	X3-X4	250/5	
	X2-X4	300/5	
	X1-X4	400/5	
	X3-X5	450/5	
	X2-X5	500/5	
X1-X5	600/5		

Tabla 2.3 TCs disponibles en lado AT del transformador.

c) Transformador de corriente instalado en el enrollado del neutro del transformador de poder, lado 12,5 kV.

Se detallan las tomas de los transformadores de corriente multirango disponibles en las instalaciones a proteger. Se destaca en cursiva y rojo la toma escogida. No se utiliza en este estudio.

TC	Terminales	Relación	Aplicación
TC7	X2-X3	100/5	Protección sobrecorriente de neutro
	X1-X2	200/5	
	X1-X3	300/5	
	X4-X5	400/5	
	X3-X4	500/5	
	X2-X4	600/5	
	X1-X4	800/5	
	X3-X5	900/5	
	<i>X2-X5</i>	<i>1000/5</i>	
	X1-X5	1200/5	

Tabla 2.4 TCs disponibles en enrollado neutro del transformador.

d) Transformadores de corriente (TT/CC) instalados en el interruptor de 12,5 kV de la barra MT, lado transformador de poder y lado barra.

Se detallan las tomas de los transformadores de corriente multirango disponibles en las

instalaciones a proteger. Se destaca en cursiva y rojo la toma escogida

<b>TC</b>	<b>Relación</b>	<b>Clase</b>	<b>Aplicación</b>
TC1 y TC2 600/5 MR	<b>600/5</b>	C-100	Protección sobrecorriente de barra y diferencial

Tabla 2.5 TC disponibles en el lado MT del transformador.

e) Esquema de protección.

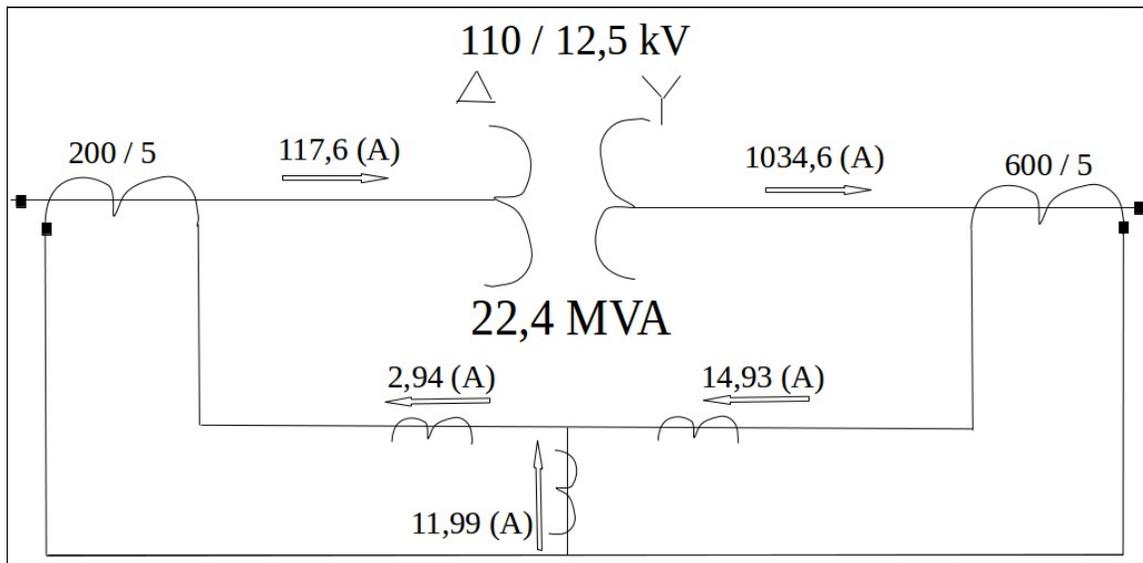


Figura 2.1 Esquema de protección diferencial.

En la figura 2.1 se muestra el esquema de protección diferencial, se puede apreciar la conexión de los enrollados del transformador de poder. Se muestran los valores nominales de tensión, potencia, y corrientes.

### 2.3.- Ajuste relé GE-BDD15.

Se presenta el ajuste de la protección diferencial de transformadores BDD15, del fabricante General Electric, GE, para la protección del equipo de poder descrito en el punto 2.2.

El dispositivo BDD15 es un relé diferencial de porcentaje, apropiado para la protección de transformadores de poder de dos enrollados. Las corrientes secundarias de los transformadores de corriente difieren en magnitud (ver Figura 2.1). El relé incorpora medios para compensar las diferencias de corriente. El desfase angular en las corrientes, resultante del grupo de conexión del transformador de poder, se compensa a través de conexión inversa de los TT/CC instalados tanto en el lado A.T.(110kV) como el lado M.T.(13,2kV)

#### 2.3.1.- Compensación de desfase angular.

En esta aplicación, los TT/CC del lado de alta tensión (enrollado en delta del transformador de poder ) se conectan en estrella, de manera de replicar la fase de las corrientes de

cada línea al ingresar al relé. Los TT/CC del lado de M.T. se conectan en delta, de forma inversa al desfase introducido por la conexión delta del primario.

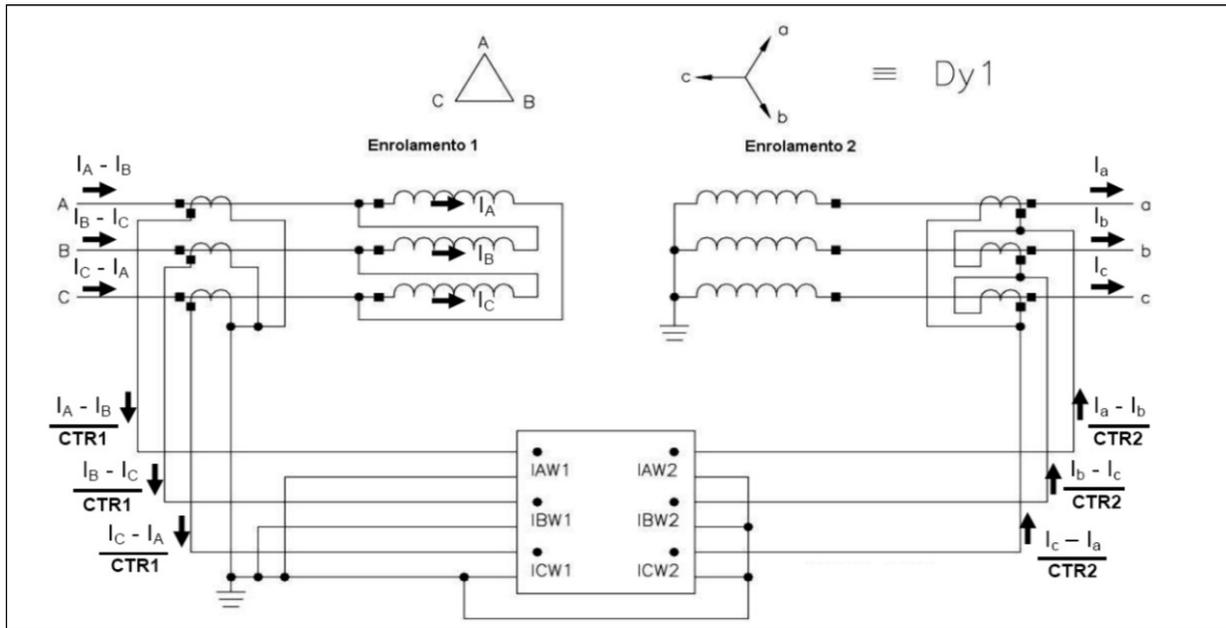


Figura 2.2 Conexión de relé en transformador Dy1

En la figura anterior se presenta un diagrama esquemático de esta situación, en él se puede apreciar cómo una conexión inversa de grupo de conexión de los TT/CC logra anular el desfase angular producto del grupo de conexión del transformador de poder.

### 2.3.2.- Compensación de magnitud de corrientes.

Se observa que la magnitud de las corrientes secundarias de TT/CC, corrientes que ingresan al relé, difieren notablemente (ver Figura 2.1), de manera que resulta difícil equiparar las corrientes secundarias en forma exacta por medio de la selección de las razones de TT/CC.

El relé diferencial BDD incorpora varios ajustes de taps de igualación o de compensación, tanto para lado A.T. como M.T., y así permitir un mayor equilibrio entre las corrientes secundarias que circulan por ambas bobinas de retención del BDD.

### 2.3.3.- Cálculo de Tap.

Se muestra el procedimiento de obtención del tap. Se necesita calcular la razón de corrientes secundarias que circulan por el relé. Para esto se presenta la deducción de la expresión:

A través de un cálculo sencillo, es posible obtener el valor de corriente que circula por el secundario del TT/CC. Estos valores dependen de las tensiones y potencia del transformador, así como del tipo de conexión (delta o triángulo) de los TT/CC.

$$I_{at} = \frac{(IAT)}{(TT/CC * AT)} \quad (2.13)$$

$$I_{bt} = \frac{(IBT * \sqrt{3})}{(TT/CC * BT)} \quad (2.14)$$

Al hacer la división entre estas expresiones se tiene:

$$\frac{I_{at}}{I_{bt}} = \frac{(IAT * TT/CC * BT)}{(IBT * TT/CC * AT * \sqrt{3})} \quad (2.15)$$

De la relación corriente, tensión y potencia, se obtiene la siguiente expresión:

$$\frac{I_{at}}{I_{bt}} = \frac{(V_{l}IBT * TT/CC * BT)}{(V_{l}IAT * TT/CC * AT * \sqrt{3})} \quad (2.16)$$

Donde:

\*  $V_{l}IBT$  voltaje nominal de placa de M.T. del transformador de poder (12,5kV)

\*  $V_{l}IAT$  voltaje nominal de placa de A.T. Del transformador de poder (110kV)

\*  $TT/CC BT$  Razón del tap del TT/CC en lado M.T. (600/5)

\*  $TT/CC AT$  Razón del tap del TT/CC en el lado A.T. (200/5)

Luego, se calcula el valor de la expresión hallada, para tres valores de  $V_{l}IAT$ , esto es, para las posiciones 1, 3, y 5 del cambiador manual de taps (detallado en el punto 3.2)

a) Para  $V_{l}IAT=110kV$ (posición central)

$$\frac{I_{at}}{I_{bt}} = \frac{(12500 * 600/5)}{(110000 * 200/5 * \sqrt{3})} = 0,197 \quad (2.17)$$

b) Para  $V_{l}IAT=115,5kV$ (posición superior)

$$\frac{I_{at}}{I_{bt}} = \frac{(12500 * 600/5)}{(115500 * 200/5 * \sqrt{3})} = 0,187 \quad (2.18)$$

c) Para  $V_{l}IAT=104,5kV$ (posición inferior)

$$\frac{I_{at}}{I_{bt}} = \frac{(12500 * 600 / 5)}{(104500 * 200 / 5 * \sqrt{3})} = 0,207 \quad (2.19)$$

En seguida, con los valores de tap (2,9 - 3,2 - 3,5 - 3,8 - 4,2 - 4,6 - 5,0 - 8,7) disponibles en el relé diferencial BDD, se calcula la relación TapAT / TapBT. Para formar las combinaciones necesarias, se seguirá el criterio:

$$\frac{(Tap AT)}{(Tap BT)} < 1 \quad (2.20)$$

Para cada una de las razones de corrientes secundarias que llegan al relé diferencial, se calcula el porcentaje de error relativo con respecto a cada una de las razones de taps del relé. Los cálculos se realizan en la forma siguiente:

$$\%E = \frac{(I_{at} / I_{bt} - Tap AT / Tap BT)}{(Tap AT / Tap BT)} \quad (2.21)$$

Para la razón  $I_{at}/I_{bt} = 0,187$  (cambiador manual de taps en posición superior). Se calcula el % de error (%E) con respecto a la primera razón de taps (2,9/3,2)

$$\%E = \frac{(0,187 - 0,906) * 100}{0,906} = 79,32 \quad (2.22)$$

Para las demás razones de los taps indicados, se realizan cálculos similares de % de error, los cuales se muestran en la tabla siguiente.

Tap Relé		Tap Transformador			Error %	
		Superior	Central	Inferior		
Tap A.T.	Tap M.T.	115,5	110,0	104,5	Min.	Max.
2,9	/ 3,2	79,32%	78,28%	77,14%	77,14%	79,32%
2,9	/ 3,5	77,38%	76,25%	75,00%	75,00%	77,38%
2,9	/ 3,8	75,44%	74,21%	72,85%	72,85%	75,44%
2,9	/ 4,2	72,85%	71,49%	69,99%	69,99%	72,85%
2,9	/ 4,6	70,27%	68,78%	67,14%	67,14%	70,27%
2,9	/ 5,0	67,68%	66,06%	64,28%	64,28%	67,68%
2,9	/ 8,7	43,76%	40,95%	37,85%	37,85%	<b>43,76%</b>
3,2	/ 3,5	79,50%	78,47%	77,34%	77,34%	79,50%
3,2	/ 3,8	77,74%	76,63%	75,40%	75,40%	77,74%
3,2	/ 4,2	75,40%	74,17%	72,81%	72,81%	75,40%
3,2	/ 4,6	73,05%	71,71%	70,22%	70,22%	73,05%
3,2	/ 5,0	70,71%	69,25%	67,63%	67,63%	70,71%
3,2	/ 8,7	49,04%	46,49%	43,67%	43,67%	49,04%
3,5	/ 3,8	79,65%	78,63%	77,51%	77,51%	79,65%
3,5	/ 4,2	77,51%	76,38%	75,14%	75,14%	77,51%
3,5	/ 4,6	75,36%	74,13%	72,77%	72,77%	75,36%
3,5	/ 5,0	73,22%	71,88%	70,40%	70,40%	73,22%
3,5	/ 8,7	53,40%	51,08%	48,50%	48,50%	53,40%
3,8	/ 4,2	79,28%	78,25%	77,10%	77,10%	79,28%
3,8	/ 4,6	77,31%	76,17%	74,92%	74,92%	77,31%
3,8	/ 5,0	75,34%	74,10%	72,74%	72,74%	75,34%
3,8	/ 8,7	57,08%	54,94%	52,57%	52,57%	57,08%
4,2	/ 4,6	79,47%	78,44%	77,31%	77,31%	79,47%
4,2	/ 5,0	77,68%	76,57%	75,34%	75,34%	77,68%
4,2	/ 8,7	61,17%	59,23%	57,08%	57,08%	61,17%
4,6	/ 5,0	79,62%	78,61%	77,48%	77,48%	79,62%
4,6	/ 8,7	64,55%	62,77%	60,82%	60,82%	64,55%
5,0	/ 8,7	67,38%	65,75%	63,95%	63,95%	67,38%

Tabla 2.6 Porcentajes de error en el cálculo de tap.

De los resultados obtenidos, se debe elegir en la columna Max % Error, el menor valor de error máximo, en este caso de 43,76%, frente a ese valor se muestra un valor en la columna TapAT / TapBT, que corresponderá al valor que se seleccionará en el ajuste.

En conclusión, de la tabla, la razón de taps a incorporar en el ajuste, es:

**\* Tap AT = 2,9 Tap de compensación para el lado de A.T.**

**\* Tap BT = 8,7 Tap de compensación para el lado M.T**

### 2.3.4.- Ajuste sensibilidad (% de slope) del relé.

Una falla externa, falla fuera de la influencia de la zona diferencial, afecta a menudo la sensibilidad del relé diferencial utilizado en el esquema, debido principalmente a la distinta característica de saturación de los TT/CC.

Para evitar operaciones indeseadas ante fallas externas, los relés diferenciales del tipo BDD, se insensibilizan aplicando en su operación el concepto de porcentaje, lo que indica que el relé opera solamente cuando la corriente diferencial es igual o superior a un determinado porcentaje de la corriente.

De acuerdo a esto, la definición del % de insensibilidad queda dada por:

$$\%Sensibilidad = \%Slope = \frac{(I_{at} - I_{bt}) * 100}{I_{bt}} = \frac{I_d * 100}{I_{bt}} \quad (2.23)$$

El % de slope a elegir en el ajuste deberá garantizar la no operación del relé frente a errores por ajuste de los taps del relé (%E), en este caso resulta:

$$\%E = 17,88 \% \quad (2.24)$$

Además, debe garantizar la no operación del relé frente a % de error por saturación (%Esat) de TT/CC. En este caso se puede estimar:

$$\%Esat = 10 \% \quad (2.25)$$

Para determinar el % de sensibilidad con que se va a ajustar el relé, se aplica la expresión siguiente:

$$\%Slope = \%E + \%Esat + \%de\ seguridad. \quad (2.26)$$

Reemplazando valores se tendrá:

$$\%Slope = 17,88 + 10 + 5 = 32,88 \% \quad (2.27)$$

De los valores de ajuste de % slope disponibles en el relé diferencial BDD15, se selecciona el valor inmediatamente superior al calculado. En este caso:

$$\%Slope = 40\% \quad (2.28)$$

## 2.4.- Ajuste relé SEL587-1.

Se presenta el ajuste del relé diferencial del fabricante Schweitzer Engineering Laboratories modelo 587 (SEL-587), para la protección del transformador de poder descrito en el punto 2.2.

El relé de corriente diferencial SEL-587 es capaz de entregar protección, al detectar corriente diferencial, en transformadores de dos devanados, con la posibilidad de ajustarlo para la protección frente a distintos grupos de conexión de transformadores de poder. Los ajustes referidos posibilitan la conexión de transformadores de corriente indistintamente en estrella o delta, tanto a la salida del enrollado de alta o media tensión, esto porque la compensación angular de la corriente de media respecto a la de alta, en cada fase del sistema, la provee el algoritmo interno del relé, con lo que la obtención de las cantidades de retención y operación es factible.

La característica de protección diferencial del relé está definida por una corriente ajustable de pickup de operación, además de dos pendientes características de porcentaje. La elección apropiada de estos tres parámetros permite ajustar la sensibilidad del relé permitiendo que éste discrimine entre fallas internas y externas para altas corrientes de falla.

El relé SEL-587 posee también un elemento sin retención, capaz de despejar rápidamente fallas internas de alta intensidad, las que de no ser despejadas de manera casi instantánea, dadas las magnitudes involucradas, pueden resultar muy perjudiciales para la vida útil del transformador de poder protegido, implicando incluso su destrucción.

El presente trabajo no desarrolla detalles sobre el bloqueo o retención de segunda y quinta armónica, las que permiten al relé discriminar la corriente diferencial medida en fallas internas, de la corriente diferencial vista con ocasión de toma de carga del transformador o inrush de magnetización; o de la corriente diferencial que puede aparecer en situaciones de sobreexcitación, respectivamente. La distinción anterior es posible a través del análisis de la razón entre la frecuencia fundamental, y el contenido del armónico específico, en la señal de corriente medida. Para un detalle de las funciones y sus ajustes, específicos para estas aplicaciones, una breve descripción se puede hallar en el Anexo B de este trabajo, para profundizar en ellos se recomienda [12].

### 2.4.1.- Ajuste de los elementos del relé diferencial.

El relé SEL-587 requiere la definición de una serie de parámetros para su ajuste a un caso particular. A continuación se presenta la descripción de estos parámetros, acompañado de los valores calculados para esta aplicación particular.

Las variables a ajustar son: MVA, VWDG1, VWDG2, TRCON, CTCON, CTR1 y CTR2.

Los taps de corriente (TAP1, TAP2) son definidos por el relé mediante el cálculo automático de los valores usando los ajustes ingresados de MVA, VWDG1, VWDG2, TRCON, CTCON, CTR1 y CTR2, variables que a continuación se detallan :

a) MVA ó Maximum Power Transformer Capacity:

Corresponde a la potencia del transformador, en este caso se utiliza la capacidad FOA

(Forced Oil, Air), capacidad de emergencia más alta, igual a **22,4 MVA**.

b) VWDG1 y VWDG2 ó Winding Line-Line Voltages:

Voltaje fase-fase nominal, para el lado de alta y media tensión en el transformador, en este caso **110 y 12,5 kV** respectivamente.

c) TRCON ó Transformer Connection y CTCON ó CT Connection. (CTCON):

El relé SEL-587 está construido con la capacidad de compensar internamente el desfase angular presente entre el lado de media y alta tensión, en la corriente de una misma fase. Para la configuración estudiada los ajustes requeridos son **DACY e YY**, los que representan la conexión del transformador de poder (Dy11) y las conexiones de los transformadores de corriente (estrella-estrella), respectivamente. El fabricante entrega un apéndice al manual (Consultar apéndice B en [12]) en el que se presentan las catorce combinaciones diferentes de conexiones de devanados de transformadores de poder y conexiones de devanados de transformadores de corriente, según el ajuste anterior, la combinación coincide con la figura B.13 del apéndice B (Imagen se muestra en Anexo C de este trabajo). Esta referencia resultará fundamental en el diagrama de conexiones.

d) TAP1 y TAP2 ó Currents Taps:

El relé SEL-587 usa ecuaciones típicas para el ajuste de TAP1 y TAP2. Estas ecuaciones incluyen el parámetro C1 y C2, los que quedan definidos por las conexiones del transformador de poder y los transformadores de corriente. Para este caso particular se tiene C1 y C2 con un valor uno (1). Los valores de Tap calculados resultan:

$$TAP\ 1 = \frac{MVA \times 1000 \times C1}{\sqrt{3} \times VWDG\ 1 \times CTR\ 1} = 2,93 \quad (2.29)$$

$$TAP\ 2 = \frac{MVA \times 1000 \times C2}{\sqrt{3} \times VWDG\ 2 \times CTR\ 2} = 8,62 \quad (2.30)$$

Las limitaciones del cálculo para TAP1 y TAP2 son:

i) Los ajustes de tap están dentro del rango  $0,1 * I_n$  y  $32 * I_n$ , donde  $I_n$  es la corriente nominal.

ii) La relación

$$\frac{TAP_{MAX}}{TAP_{MIN}} \leq 4,5 \quad (2.31)$$

Se ve que los valores calculados cumplen con las limitaciones impuestas.

e) O87P u Operating Current PU:

Establece la corriente de pickup de operación en un mínimo pickup para una sensibilidad aumentada, pero lo suficientemente alto para evitar la operación debido al error de estado estacionario del transformador de corriente y la corriente de excitación del transformador. Un ajuste habitualmente sugerido es 0,3. En este caso se emplea **0,4**

El rango de ajuste de O87P es 0,1 a 10. El ajuste debe también producir una corriente de operación más grande que  $0,1 \cdot I_n$ , cuando es multiplicado por el valor más pequeño de TAP1 y TAP2. Por ejemplo, si TAP1 es igual a 1 A , e  $I_n = 5$  A, el ajuste mínimo disponible es 0,5.

f) SLP1 y SLP2 ó Restraint Slope Percentages (SLP1,SLP2):

Valores de ajuste: ( 35, 50 )

Se debe fijar el ajuste de porcentaje de pendiente de retención (SLP1) para discriminar entre fallas internas y externas. El ajuste de SLP1 tiene por objeto no reaccionar ante las diferencias de corriente que podrían aparecer debido al cambiador de tap del transformador de poder, de existir; corriente de magnetización, y error del relé.

Por ejemplo :

El error del transformador de corriente (e) es igual a  $\pm 10\%$ . En por unidad :

$e = 0,1$

La variación de la relación de voltaje del cambiador de tap bajo carga del transformador de poder es de 95 a 115%. En por unidad :

$a = 0,05$

De acuerdo a la ecuación de máxima corriente diferencial esperada para condiciones de corriente continua :

$$I_{d \text{ máx}} = (1+e) \times IW1 - \frac{1-e}{1+a} \times IW2 \quad (2.32)$$

Donde IW1 y IW2 son las corrientes secundarias en el lado de alta y baja del transformador de poder, después de la compensación de TAP. Ya que  $IW1=IW2$  para fallas externas y corriente de carga, podemos expresar la corriente máxima diferencial como un porcentaje de la corriente del devanado :

$$\frac{2 \times e + a + e \times a}{1+a} \times 100 = 24\% \quad (2.33)$$

Además se deben considerar los errores debido a la corriente de excitación del transformador ( 3% ) y el error de medición del relé ( 5% ). El error máximo total llega a 32%. Por lo tanto, un slope 1 conservador, es de 40%.

g) U87P ó Instantaneous Unrestrained Current PU:

Se recomienda por el fabricante ajustar la corriente de pickup instantánea irrestricta en 8 por unidad, en este caso **se ajusta en 10** por la posible descoordinación con una falla a la salida del alimentador.

El elemento instantáneo diferencial irrestricto responde sólo a la frecuencia fundamental.

El elemento diferencial instantáneo irrestricto no es afectado por los ajustes SLP1, SLP2, IRS1, PCT2, PCT5 o IHBL.

## 2.5.- Ventajas de protecciones estáticas.

Los relés estáticos presentan algunas características constructivas que le proporcionan ventajas comparativas respecto a los relés electromecánicos[3][4], entre estas características se pueden listar las siguientes:

La ausencia de partes móviles, pivotes o resortes, aumenta la resistencia del relé a vibraciones propias de la operación o transporte, además de brindarle mayor resistencia ante golpes, que suelen ocurrir en etapas previas al montaje. Es posible deducir que equipos construidos con esta tecnología presentan una vida útil mayor, además de necesitar menor mantención que su equivalente electromecánico, o no necesitarla de plano.

Los relés estáticos no resultan afectados por su operación, por lo que no deben ser atendidos o reemplazados después de un número determinado de operaciones.

Los relés estáticos presentan tamaños reducidos en comparación a los electromecánicos, lo que permite montajes en tableros o paneles de menor superficie y volumen, con la consiguiente reducción de costos en este ítem.



Figura 2.3 Relé numérico.



Figura 2.4 Relé electromecánico.

Por su construcción modular, es posible reemplazar o agregar características de operación al relé, simplemente reemplazando o agregando módulos.

Los ajustes se realizan, en la mayor parte de los casos, a través de potenciómetros, por lo que resultan sencillos de manejar.

Posibilidad de simular actuación a través de botones de prueba que se incorporan en el equipo.

Entre las desventajas, la más decisiva resulta ser la menor experiencia existente en la aplicación de relés de esta tecnología a instalaciones en operación, en comparación a la existente respecto a la tecnología tradicional, en la que se ha logrado, a través de su difundido uso, referencias claras de comportamiento ante distintas condiciones de montaje y operación.

## Capítulo 3. Obtención de planilla, cálculo $I_{op}$ , y $I_{rst}$ .

### 3.1.- Introducción.

Se presenta a continuación el estudio del algoritmo de cálculo de las corrientes de operación y retención por parte del relé SEL-587. A partir de este estudio, se construye la planilla de cálculo que permite replicar estos resultados y que servirá de base y apoyo para la aplicación del protocolo de conexionado, lectura e interpretación sugerido.

Como se ha visto en el capítulo precedente, la aplicación del principio de la protección diferencial, requiere la comparación de las corrientes que ingresan y las que salen de la zona definida de protección. En el caso de un transformador de poder, la dificultad se encuentra en que las corrientes de entrada y salida difieren en magnitud, y dependiendo de la construcción y conexión del transformador, también puede existir desfase angular.

Se han utilizado diversas maneras de compensar estas diferencias, y hacer comparables ambas corrientes, sin ir más lejos en el capítulo 2 se presenta el ajuste de un relé BD, en el que la compensación angular se realiza de manera previa, a través de una cuidada selección de conexión de transformadores de corriente.

En el caso particular del relé SEL587, y en general en cualquier relé de tecnología digital o numérica, todas las compensaciones se realizan a través del algoritmo que trata las lecturas obtenidas, no siendo necesarias, aunque si posibles, las compensaciones como las descritas anteriormente (conexión específica de transformadores de corriente).

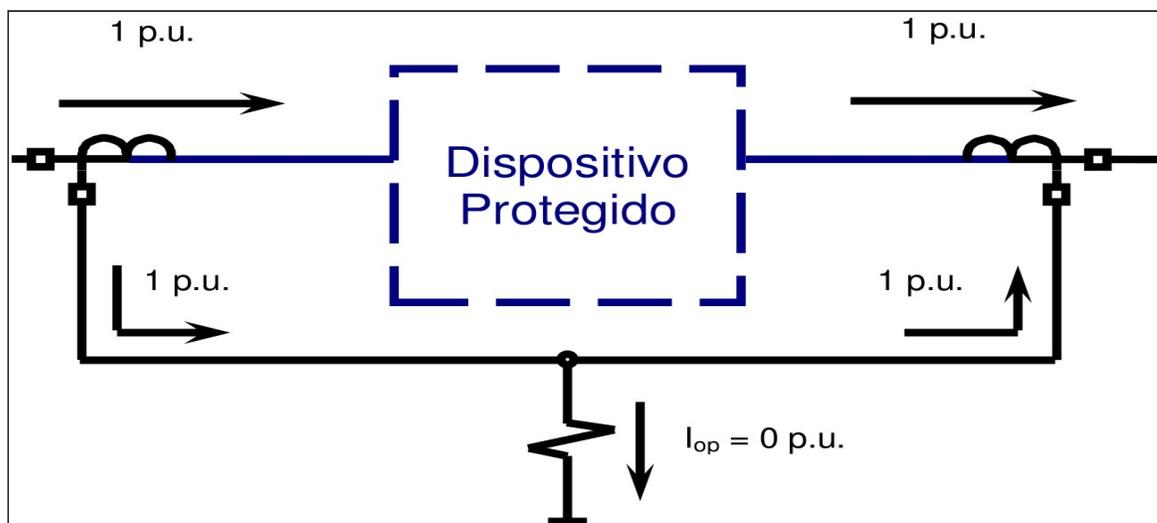


Figura 3.1 Diagrama de esquema diferencial.

El relé SEL-587, relé en estudio, posee la capacidad de ser aplicado en la protección de transformadores de diversas conexiones, y sus ajustes internos permiten que la conexión de transformadores de corriente sea en estrella o en delta, tanto en el lado de alta como en el de media tensión. Resulta claro que la conexión de los TC en estrella es deseable, ya que permite

simplificar el alambrado en la instalación, lo que evita agregar posibilidades de falla en el comisionamiento y mantenimiento del sistema de protección.

El relé posee un pickup ajustable de corriente de operación, y la posibilidad de elegir entre una pendiente simple o dual en la característica de retención de porcentaje, lo que aumenta las capacidades del relé para discriminar entre una falla interna y una falla externa con magnitudes de corriente elevadas. También posee un elemento que despeja de forma inmediata fallas internas, este elemento se denomina sin retención y se encuentra en torno a 10 veces el umbral mínimo de disparo de la protección.

El relé posee también elementos de bloqueo o retención por armónicas, las que permiten discriminar entre la corriente diferencial causada por fallas internas de las causadas por la corriente de magnetizante o de inrush, o la sobreexcitación. Estos ajustes escapan al alcance de este trabajo, para mayores detalles de su funcionamiento, una breve descripción en el anexo, además de la bibliografía.

Dada la naturaleza del relé en estudio, es posible ajustar la característica diferencial de porcentaje con una pendiente simple, o bien con doble pendiente. La operación del elemento diferencial es controlada por las corriente de operación  $I_{op}$  y de retención  $I_{rst}$ , las que se obtienen del procesamiento de las medidas de corriente provenientes de los TC. El disparo o activación de la protección ocurrirá siempre que la corriente de operación  $I_{op}$  alcance un valor mayor al mínimo necesario para la activación, y se encuentre sobre la curva definida por la característica del elemento diferencial para un valor de corriente de retención  $I_{rst}$  determinada.

### 3.2.- Definición nomenclatura de corrientes

Para presentar en detalle el algoritmo utilizado por el SEL587, se utilizará en adelante las denominaciones que en se presentan en la figura 3.2.

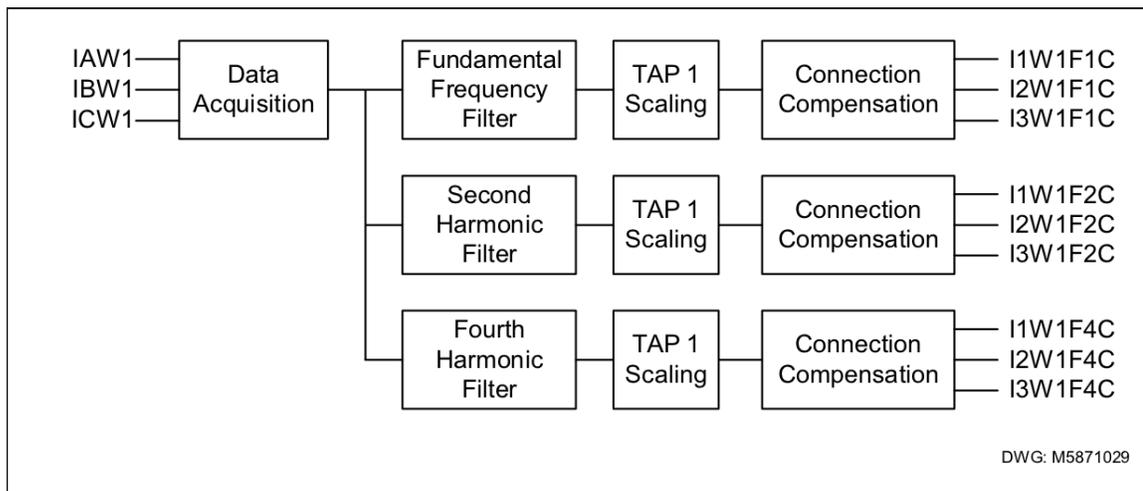


Figura 3.2 Diagrama de tratamiento de datos en SEL-587

Se llamará IAW1 a la corriente que ingresa al relé desde el transformador de corriente en

la fase A del lado de alta tensión. De manera análoga, IBW1 e ICW2 resultan las corrientes de ingreso al relé desde el transformado de corriente de la fase B y C respectivamente. Debe resultar claro que esta corriente sólo tiene la conversión en magnitud que realiza por naturaleza el transformador de corriente, según la relación de transformación seleccionada.

De forma equivalente, las corrientes que ingresan al relé por el lado de media tensión serán denominadas IAW2, IBW2 e ICW2.

Se llamará IAW1F1, IBW1F1 e ICW1F1 a las corrientes de la toma de alta tensión, después de aplicado el filtro de frecuencia, (filtro sobre el que no se realizará mayor discusión, ya que se encuentra fuera del alcance de este trabajo) y IAW2F1, IBW2F1 e ICW2F1 a su equivalente en la toma de media tensión.

En la etapa siguiente, se llamará I1W1F1, I2W1F1 e I3W1F1 a las corrientes de la toma de alta tensión después de la etapa de corrección por tap. Manteniendo la nomenclatura, se llamará I1W2F1, I2W2F1 e I3W2F1 a las corrientes corregidas por tap en la toma de media tensión.

La última etapa realiza la compensación angular producto del grupo de conexión del transformador, en este caso se llamará I1W1F1C, I2W1F1C e I3W1F1C a las corrientes compensadas en el lado de alta tensión, y I1W2F1C, I2W2F1C e I3W2F1C a las corrientes compensadas en el lado de media tensión.

### 3.3.- Corrección por tap.

Como se ha discutido hasta acá, a los valores ingresados al relé se les aplica un filtro de frecuencia, filtro que escapa al alcance de este trabajo, luego se realiza la corrección de tap, y finalmente la compensación de desfase angular.

De esta manera, al ejemplificar con IAW1(corriente de ingreso al relé en la fase A de la toma de alta tensión), en la segunda etapa(suponiendo ya aplicado el filtro de frecuencia) se realiza la ponderación por el TAP seleccionado, esto es, una división por el valor seleccionado en la etapa de configuración de la protección.

$$I1W2F1 = \left( \frac{IAW2}{TAP} \right) \quad (3.1)$$

### 3.4.- Obtención del desfase de corrientes

El paso siguiente requiere la compensación angular producto del grupo de conexión del transformador, desfase que pasa intacto a los TC, dado que ambos sets están conectados en delta. Dicho esto, se toma como referencia angular el lado de alta, quedando fijos los fasores de este lado, y se debe componer las corrientes en el lado de media tensión de manera de compensar el desfase presente.

Como se ha visto en la especificación del transformador, este corresponde a un equipo de conexión Dy1. A continuación se muestra esquemáticamente la conexión interna de un transformador con esta construcción, además de un diagrama fasorial de las corrientes en líneas de alta y baja.

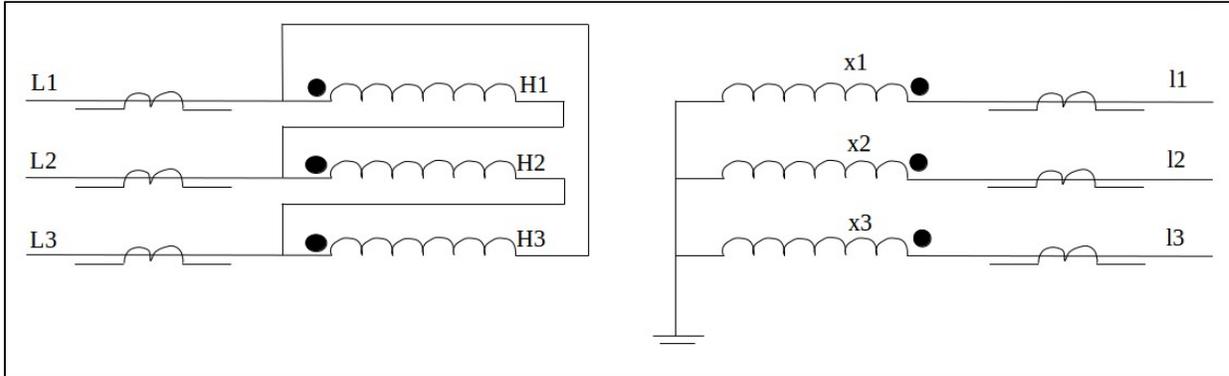


Figura 3.3 Diagrama interno de conexiones transformador Dy1.

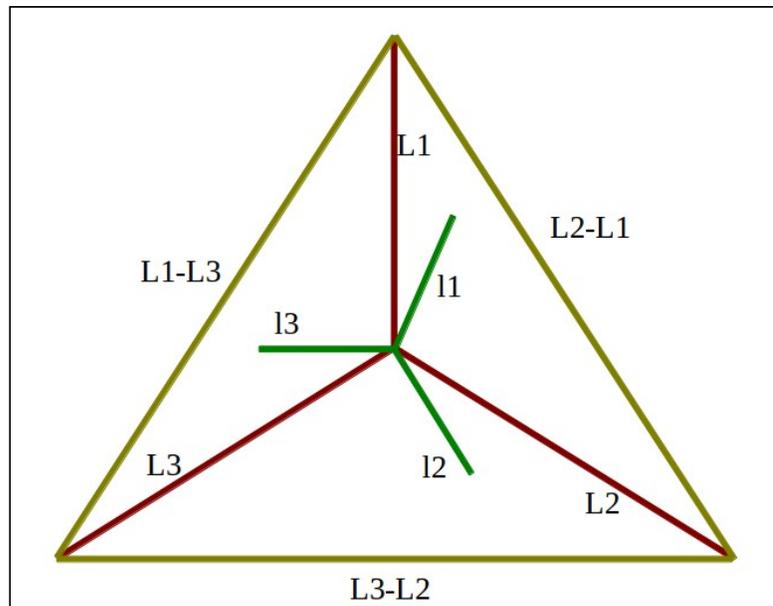


Figura 3.4 Diagrama de corrientes en transformador Dy1.

A través de las gráficas anteriores es posible apreciar que en un transformador de conexión Dy1, la corriente de alta tensión, adelanta en 30 grados eléctricos la corriente de media tensión.

### 3.4.1.- Discusión acerca de instalaciones de Chilectra S.A.

Sin embargo en las instalaciones de la empresa dónde este trabajo se realiza, esto es Chilectra S.A., por razones históricas que para el autor no fue posible aclarar del todo, pero que pareciera responder a un error constructivo de las primeras instalaciones, y que resultó en su momento, y más aun ahora, muy complejo de resolver, se intercambian las líneas 1 y 3, conectando la línea 1 al terminal 3, y la línea 3 al terminal 1 de los transformadores Dy1, quedando entonces el esquemático, y el diagrama fasorial como sigue.

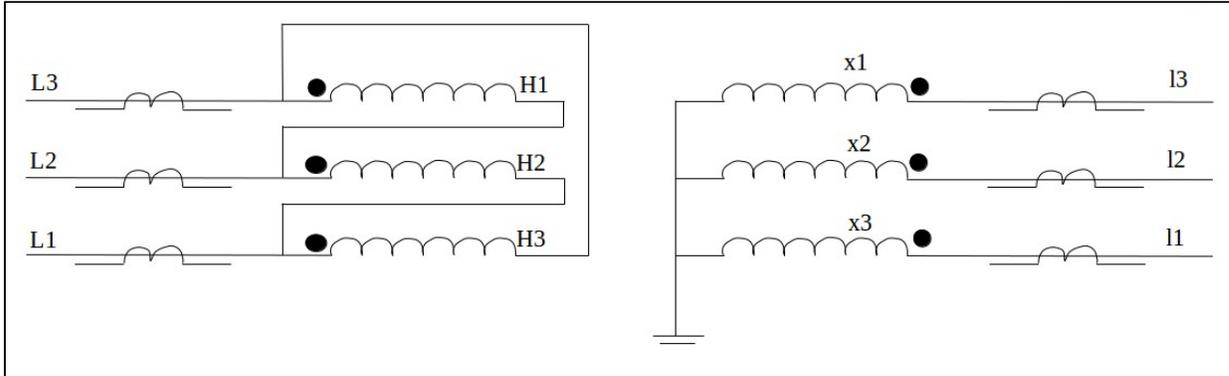


Figura 3.5 Diagrama interno de conexiones, transformador Dy1 conectado como Dy11.

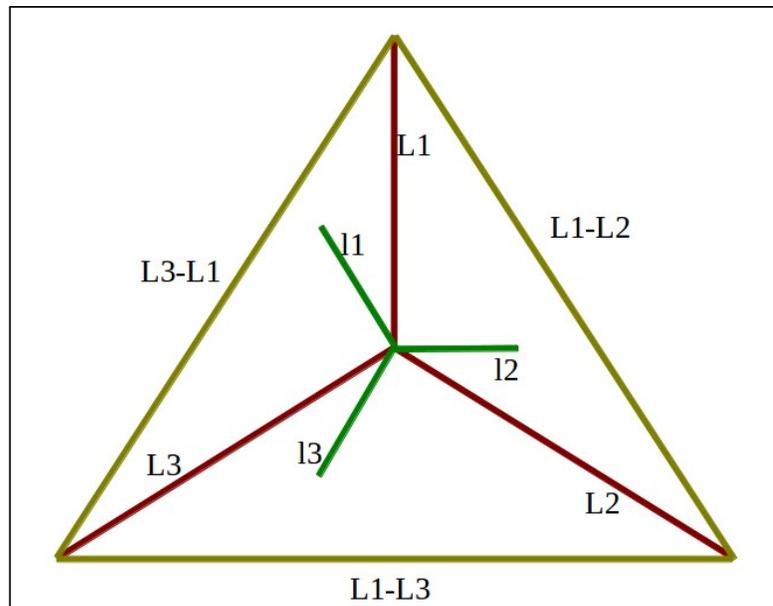


Figura 3.6 Diagrama de corrientes en transformador Dy1 conectado como Dy11.

Es decir, el transformador se comporta, a causa de la particular conexión presente en las instalaciones de la empresa, como un transformación con grupo de conexión Dy11, dónde la corriente en las líneas de alta tensión atrasa en 30 grados eléctricos la corriente en las líneas de media tensión.

### 3.5.- Corrección desfase.

En las instalaciones de la compañía, y tal como recomienda el fabricante[12], a través del ajuste de polaridades de los TC, las corrientes ingresan al relé en la toma de alta tensión y salen en la toma de media tensión. Con esta consideración, el diagrama fasorial de corrientes en el relé se ve en la figura siguiente.

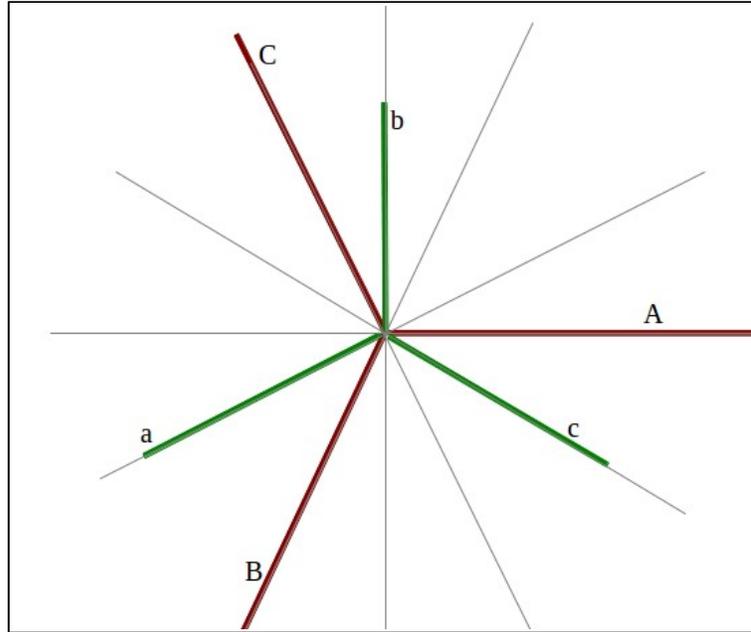


Figura 3.7 Diagrama de corrientes de ingreso al relé.

Ahora, para realizar la compensación angular basta con la expresión matricial

$$\begin{bmatrix} I1W2F1C \\ I2W2F1C \\ I3W2F1C \end{bmatrix} = \frac{1}{\sqrt{3}} \begin{bmatrix} 1 & 0 & -1 \\ -1 & 1 & 0 \\ 0 & -1 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I1W2F1 \\ I2W2F1 \\ I3W2F1 \end{bmatrix} \quad (3.2)$$

Expresión que se deduce de las discusiones anteriores, en ella se puede hallar que  $I1W2F1C$  tiene un desfase de 180 grados eléctricos con  $I1W1F1C$ . Igual resultado se verifica para las demás fases.

### 3.6.- Cálculo $I_{op}$ e $I_{rst}$ .

Las corrientes  $I1W1F1C$ ,  $I2W1F1C$  e  $I3W1F1C$  y  $I1W2F1C$ ,  $I2W2F1C$  e  $I3W2F1C$ , permiten hallar la corriente de operación  $I_{op}$ , y la corriente de retención  $I_{rst}$ . Es claro que se obtiene un valor para cada fase.

La corriente de operación es la suma fasorial de las corriente que ingresan al relé, suma después de las compensaciones necesarias. Notar que la corriente de operación será próxima a cero mientras más parecido en magnitud resulten los valores de las corrientes compensadas en el lado de alta y media tensión, y además, que los ángulos se encuentren contrapuestos. La expresión para hallar la corriente de operación es:

$$Iop1 = [I1W1F1C + I1W2F1C] \quad (3.3)$$

La corriente de retención por su parte tiene la expresión:

$$Irst1 = \frac{([I1W1F1C] + [I1W2F1C])}{2} \quad (3.4)$$

En la figura 3.8. es posible apreciar la obtención de estas cantidades, y la lógica de disparo del relé SEL-587, para más detalles, referirse a la bibliografía[12].

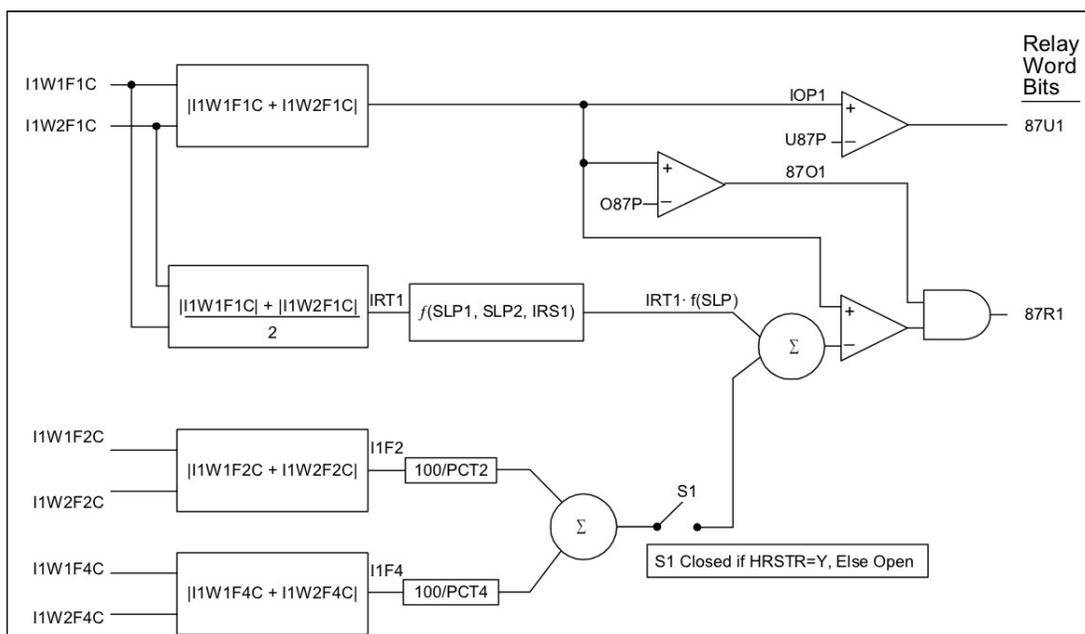


Figura 3.8 Diagrama de cálculo de corrientes y lógica de disparo para SEL-587.

Resuelto eso, es posible la construcción de la planilla de cálculo que replique las observaciones del relé al valerse del mismo algoritmo y consideraciones.

### 3.7.- Presentación gráfica de planilla.

A continuación se muestra las pantallas y cuadros de diálogos que presenta la planilla. Los datos necesarios de ingreso se han discutido en el capítulo 2.

#### 3.7.1.-Pantalla de configuración.

En la figura 3.9. se observa el cuadro de configuración, en esta página se ingresan los valores principales que definen la configuración de la protección, esto es, potencia del transformador, tensiones en alta y media tensión, conexión de TC, entre otros. Todos estos parámetros se han discutido en el capítulo 2, además de mostrarse la forma de calcular y obtener

alguno de ellos.

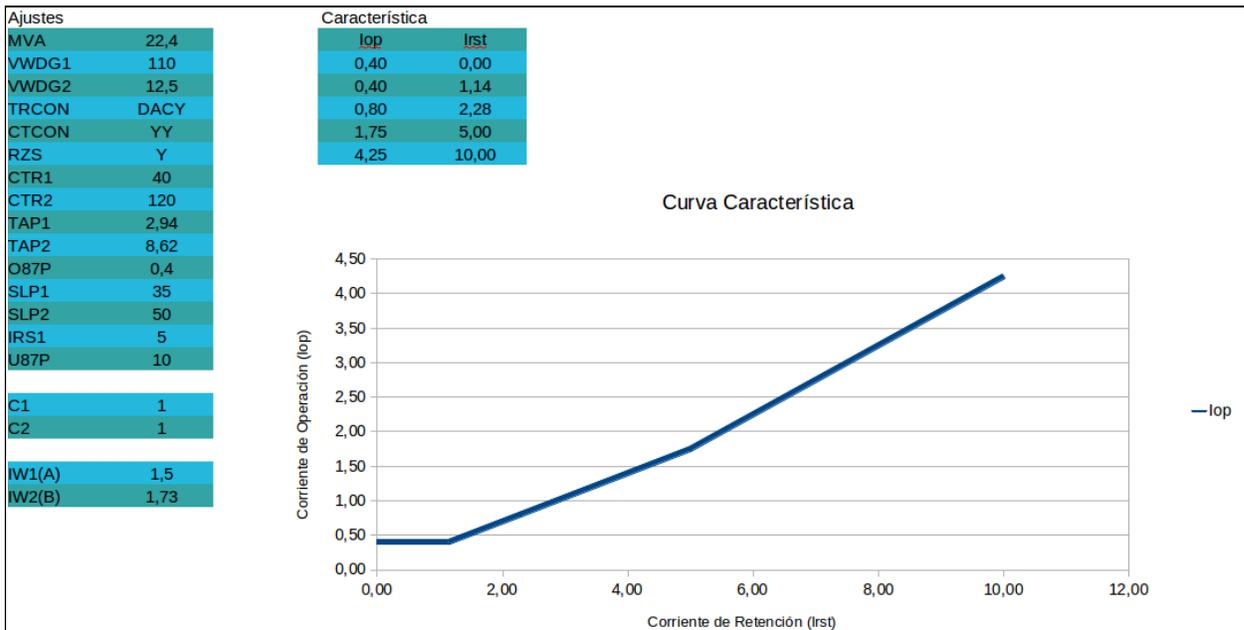


Figura 3.9 Hoja de configuración relé, en Planilla de cálculo.

Se ha configurado una pendiente dual, de 35 y 50 % respectivamente. El umbral mínimo de la corriente de operación es 0,4 veces el valor del tap menor. Además el mayor valor de corriente de operación permisible es 10 veces el valor del menor tap.

El SEL587, es un relé diferencial de porcentaje con la capacidad de configurar diferentes pendientes de porcentaje. El propósito de la característica de la pendiente de porcentaje es evitar un funcionamiento inadecuado del relé debido a "desequilibrios" entre los TCs durante fallas externas. Estos desequilibrios de deben a:

- \* Conmutación de tomas de regulación en el transformador de potencia;
- \* Desequilibrio entre las corrientes del TC y la capacidad de las tomas del relé
- \* La diferencia entre los errores de los TC en cualquier lado del transformador de potencia.

Muchos transformadores de potencia tienen un paso de  $\pm X\%$  de cambio en la relación de transformación. La práctica es seleccionar las relaciones del TC y las tomas del relé para equilibrar las corrientes en el punto medio de la zona de conmutación de las tomas de regulación. En esa base, el desequilibrio máximo que puede ocurrir por esta causa es  $X\%$ . El desequilibrio máximo inevitable entre las corrientes del TC y los valores nominales de las tomas del relé es la mitad de la diferencia entre dos valores nominales de las tomas del relé, expresada en porcentaje. El porcentaje de la diferencia entre los errores del TC debe determinarse en la falla externa que produzca el máximo error. Lo mejor aproximación es calcularla con base al estado estable. Se debe suponer los tres desequilibrios en la misma dirección para obtener el desequilibrio máximo posible. Luego se debe agregar un 5% a este valor. El valor obtenido es la pendiente mínima en

porcentaje que debería utilizarse[19].

La pendiente 1(slope 1) se configura de manera de manejar corrientes diferenciales(de operación) que surgen como resultado de error en TC y cambiador de tap, sea este manual o automático. La pendiente 2(slope2) previene la operación indeseada(falsa condición de operación) como resultado de la saturación TC para corrientes grandes, producto de fallas externas. En los parámetros ingresados al relé también se incluye la configuración sin bloqueo(unrestrained), típicamente del orden de 10 veces el valor de tap. Este umbral sólo se supera para una falla interna

### 3.7.2.- Hoja de cálculos.

En la hoja de cálculos se observa la secuencia en la que las corrientes van siendo comparables, además de la matriz de compensación angular.

Se puede ver en la figura 3.10. como se corrige por tap, y como se realiza la compensación angular.

1	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K	
1	Fasores	polares(f despues TC)	polares(f despues TC)	polares(f despues de TAP)	rectangulares	rectangulares(post shift)	po					
2		módulo	ángulo	módulo	ángulo(rads)	módulo	ángulo(rads)	x	y	x	y	
3	IA	3,5	0	3,5	0,00000	1,19048	0,00000	1,19048	0,00000	1,19048	0,00000	
4	IB	3,5	-120	3,5	-2,09440	1,19048	-2,09440	-0,59524	-1,03098	-0,59524	-1,03098	
5	IC	3,5	120	3,5	2,09440	1,19048	2,09440	-0,59524	1,03098	-0,59524	1,03098	
6												
7	ia	5	210	5	3,66519	0,58005	3,66519	-0,50233	-0,29002	-0,58005	0,00000	
8	ib	5	90	5	1,57080	0,58005	1,57080	0,00000	0,58005	0,29002	0,50233	
9	ic	5	330	5	5,75959	0,58005	5,75959	0,50233	-0,29002	0,29002	-0,50233	
10												
11												
12	Matriz compensación angular											
13	CTC (11)	1	0	-1								
14	1,73205	-1	1	0								
15		0	-1	1								
16												
17	Matriz filtro homopolar											
18	Filtro Homo	2	-1	-1								
19	3	-1	2	-1								
20		-1	-1	2								
21												
22												
23												

Figura 3.10 Hoja de cálculos relé, en Planilla de cálculo.

En la Figura 3.11. se ve un detalle de la imagen anterior en la que es posible leer con claridad la operatoria realizada, en consecuencia con lo explicitado en este capítulo.

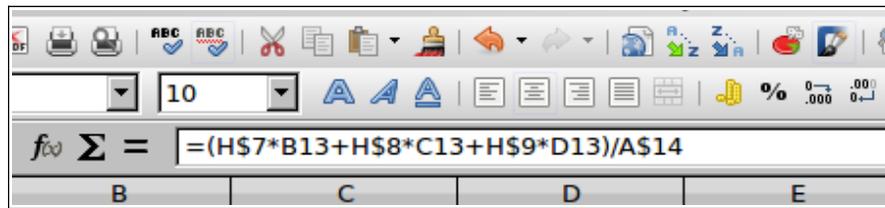


Figura 3.11 Detalle de Hoja de cálculos relé, en Planilla de cálculo.

### 3.7.3.-Interfaz de entrega de resultados.

La pantalla de entrega de resultados, además de mostrar la curva característica definida en la pantalla de configuración, permite manejar algunas variables como magnitud de corriente entregada por los TC, o polaridad de los TC.

En este punto del trabajo se entrega una planilla de cálculo que muestra gráficamente la característica de operación del relé, ver figura 3.12. Esta planilla permite visualizar, partiendo de las corrientes entregadas en el secundario del TC, la zona del gráfico en el que se encuentra el punto de operación actual, pudiendo establecer cercanía o lejanía de la frontera de operación

En sentido contrario, también ofrece la posibilidad de conocer las corrientes de prueba en un punto particular del plano, de esta manera es posible situarse en la frontera de activación y verificar activación ante pequeñas variaciones de corriente.

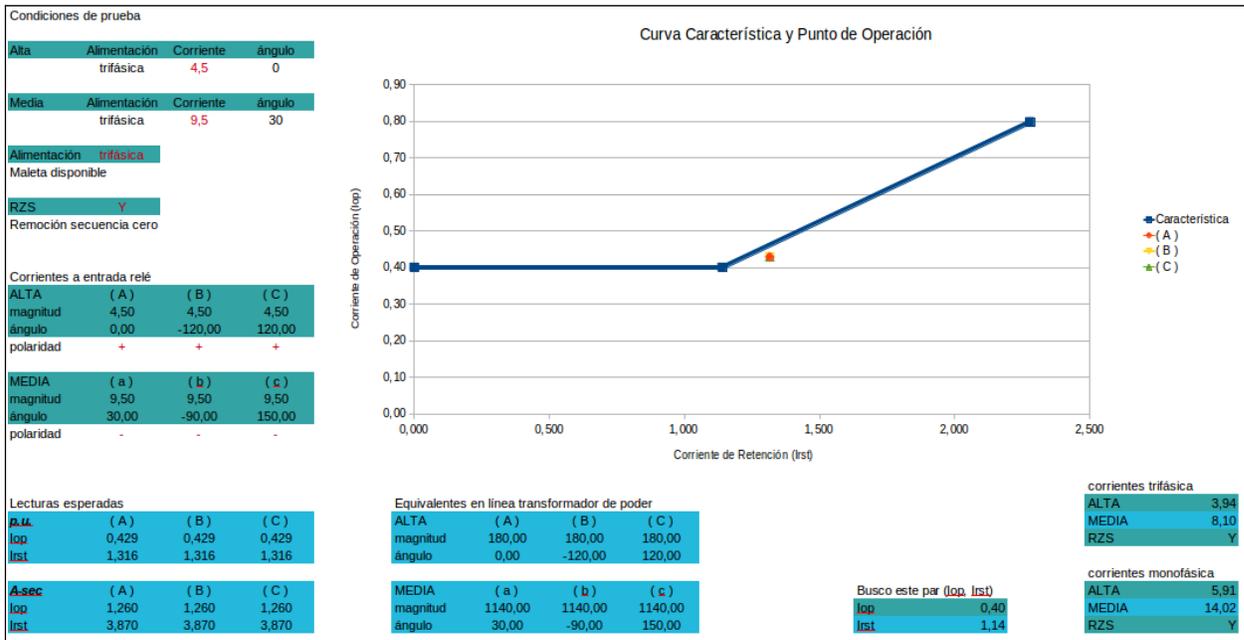


Figura 3.12 Hoja entrega de resultados, en Planilla de cálculo.

Entre los principales cuadros de diálogo de la planilla, se ven ajustes a ingresar, diferenciadas por colores y bloqueos de celdas, ajustes primarios, y ajustes derivados. Se implementan menús desplegables para polaridad de TC, y tipo de alimentación.

Se presenta un cuadro de dialogo en el que se ingresan valores para corrientes en el lado

de alta y media tensión(magnitud y módulo) Entrega a partir de los valores ingresados, los valores para  $I_{op}$ , y  $I_{rst}$ , en p.u. y en A-sec.

Posee también cuadro de dialogo capaz de entregar corriente de ingreso al relé, para un determinado punto del plano de característica.

# Capítulo 4. Pruebas y contrastación.

## 4.1.- Introducción

En el presente capítulo se muestra los resultados de pruebas realizadas al relé SEL-587 en instalaciones de Chilectra S.A. También se muestra el contraste de estos resultados con los obtenidos de la planilla desarrollada en el capítulo anterior.

En el laboratorio de pruebas de la compañía se realiza, con ayuda de personal técnico, el montaje del circuito de pruebas que esquemáticamente se muestra en la Figura 4.1.

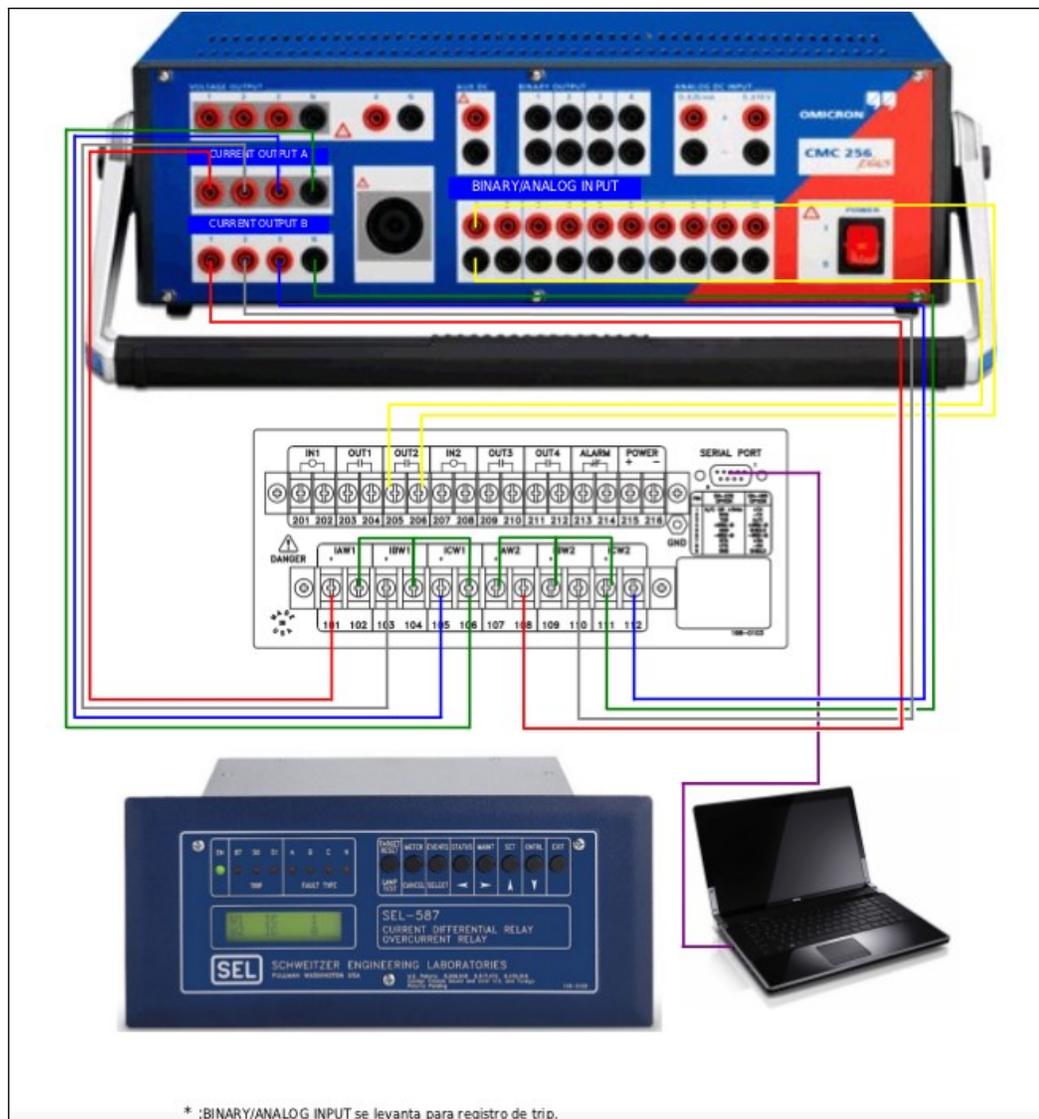


Figura 4.1. Esquema circuito de pruebas.

Las pruebas tienen por objeto, registrar los valores que entregue el relé configurado según los parámetros presentados en el capítulo 2. Se deja el “disparo”(ligado a la ecuación lógica y a la

salida vista brevemente en la Figura 3.8) del relé deshabilitado, de manera de tener la opción de registrar los valores entregados.

Los valores entregados por el relé se recogen en reportes tal como el de la Figura 4.2. En el reporte se puede leer el valor de las corrientes de entrada al relé, en magnitud y ángulo, así también los valores calculados para las corrientes de retención y operación. Dada la razón de transformación conocida del TC, en el reporte también se muestra el valor de corriente por líneas de alta y media tensión.

```

MET SEC
XFMR 1                               Date: 10/14/11   Time: 05:15:22.727
SET CTR1

                Winding 1                Winding 2
                IAW1  IBW1  ICW1  IAW2  IBW2  ICW2
I (A,sec)      1.08  1.18  1.10  3.57  3.63  3.30
ANGLE (deg)    0.00 237.80 113.58 210.03 84.54 326.59

                3I2W1  IRW1                3I2W2  IRW2
I (A,sec)      0.13  0.01                0.51  0.01
ANGLE (deg)    284.43 221.47                234.12 20.69

==>MET DIF
XFMR 1                               Date: 10/14/11   Time: 05:15:26.547
SET CTR1

                Operating Qty            Restraint Qty
                IOP1  IOP2  IOP3  IRT1  IRT2  IRT3
I (A,sec)      0.24  0.23  0.25  3.62  3.63  3.63

                Second Harmonic          Fifth Harmonic
                I1F2  I2F2  I3F2  I1F5  I2F5  I3F5
Harmonic
Current (A,sec) 0.01  0.02  0.01  0.02  0.01  0.02

==>MET
XFMR 1                               Date: 10/14/11   Time: 05:15:30.097
SET CTR1

                Winding 1                Winding 2
                IAW1  IBW1  ICW1  IAW2  IBW2  ICW2
I (A,pri)      140   140   141  1315  1323  1320

                3I2W1  IRW1                3I2W2  IRW2
I (A,pri)      1     1                9     7

==>|

```

Figura 4.2. Reporte de salida entregado por el relé.

La Figura 4.3. muestra el montaje en el laboratorio. En ella es posible apreciar los

componentes involucrados en las pruebas, esto es, la maleta hexafásica, el relé, además de elementos de medida y control tales como amperímetros o interruptores que facilitan la realización de la secuencia de pruebas planeada.

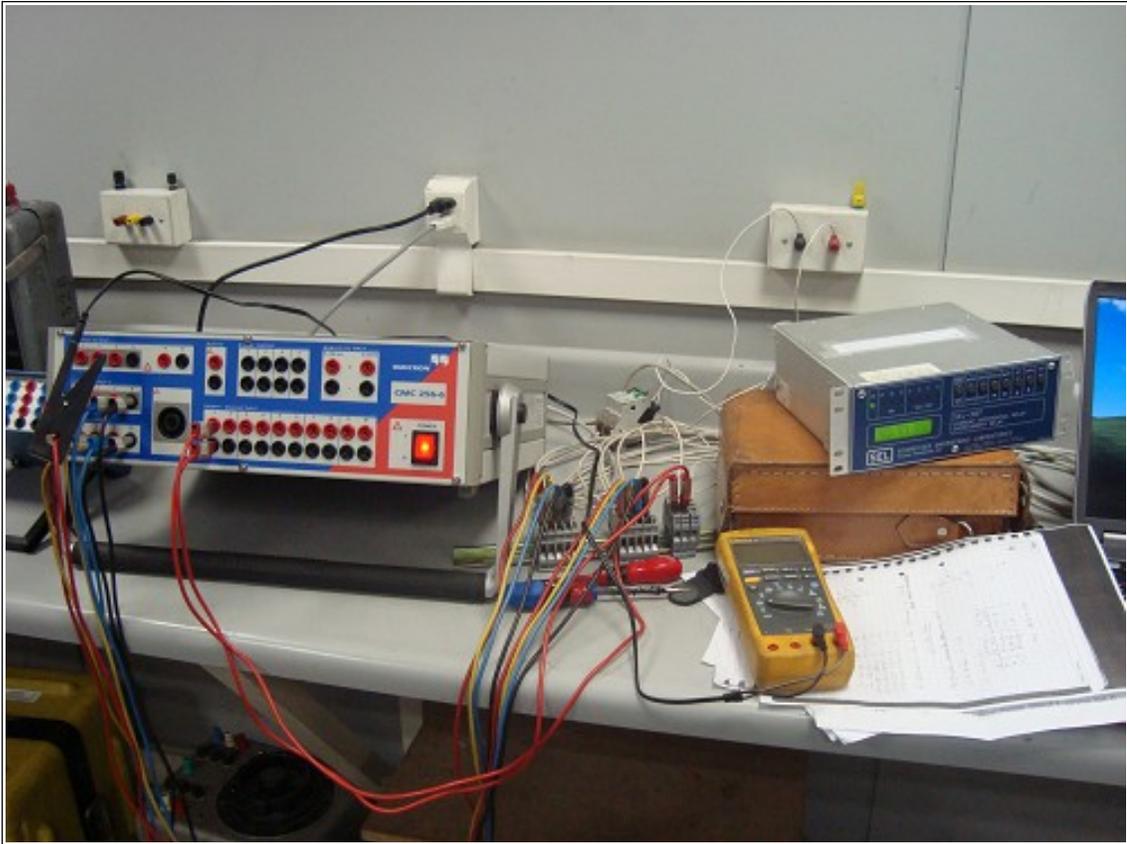


Figura 4.3. Circuito de pruebas en laboratorio.

Para la realización de pruebas además de contar con una unidad funcional del modelo de relé bajo ensayo, se dispone de una maleta hexafásica para la inyección de corriente al relé. La Figura 4.4. muestra la interfaz de la maleta hexafásica, a través de la cual, es posible controlar, magnitud y fases de la corriente ingresada por cada línea.

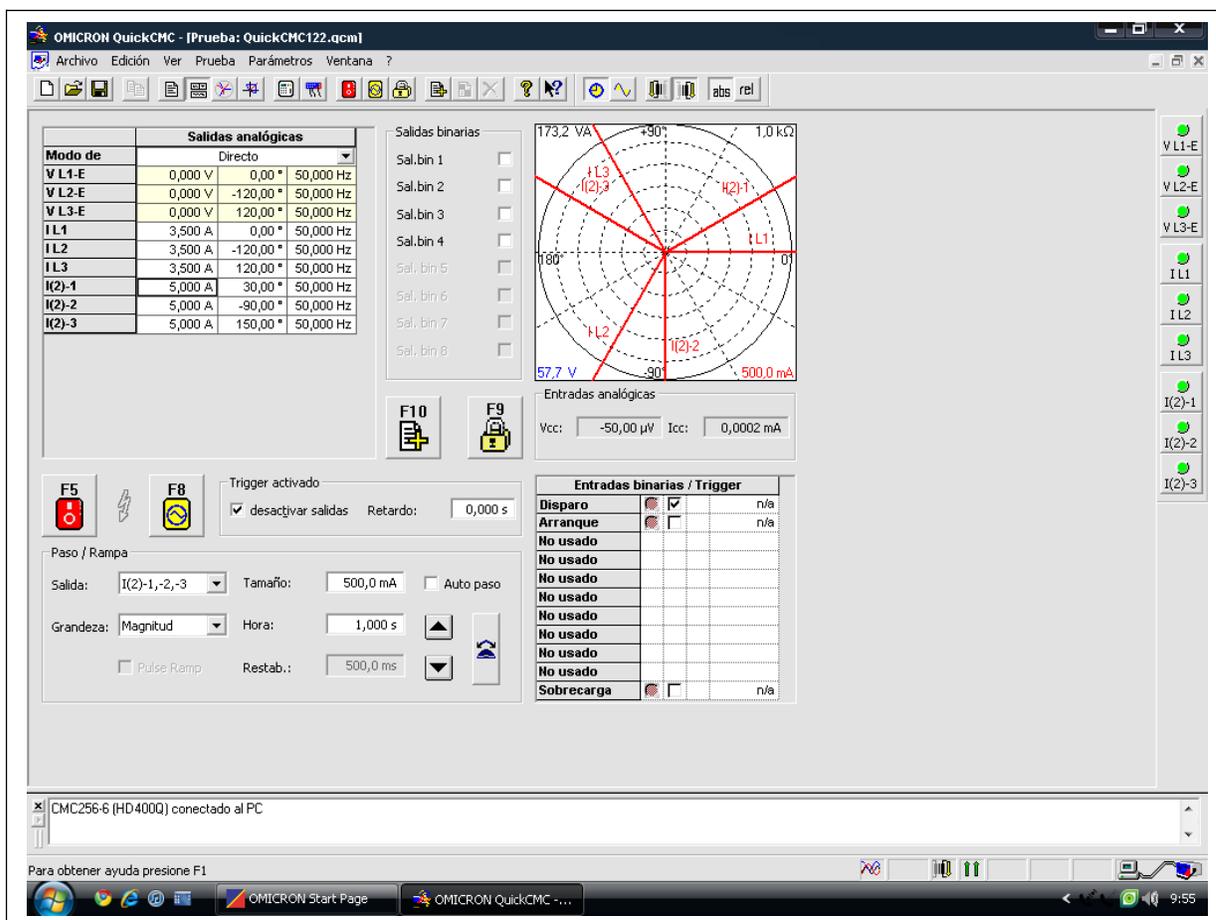


Figura 4.4. Pantalla interfaz de maleta hexafásica.

Vale decir que en ninguna de las imágenes precedentes se puede ver el computador necesario para controlar la maleta hexafásica. Es conveniente hacer esta precisión por claridad del lector.

## 4.2.- Resultados de pruebas a relé SEL-587.

Las pruebas aquí expuestas se han realizado en el transcurso de 4 distintas sesiones. Cada set de pruebas se ha registrado con una nomenclatura distinta. La colección completa de datos recogidos se puede hallar en el Anexo A de este trabajo.

Para el objetivo de este capítulo sólo se trabajará con la serie de datos tomados en la tercera sesión, los resultados obtenidos se presentan en las tablas a continuación.

Los resultados se entregan diferenciados por colores según cada fase. Cada tabla contiene en la parte superior información ingresada al relé, como magnitud, corriente por fase y ángulo de la corriente ingresada. Los ángulos aquí expuestos son desde la perspectiva del relé, por lo que a simple vista pueden resultar contradictorios a los análisis presentados en el capítulo anterior, mas no tardará el lector en notar la concordancia de ellos y el material expuesto precedentemente.

La nomenclatura empleada en el reporte de resultados es la siguiente:

Se llama IAW1, IBW1, ICW1 a las corrientes de ingreso al relé por el lado de alta tensión. De

manera análoga, las corrientes de ingreso al relé por el lado de media tensión se llaman IAW2, IBW2, ICW2.

La corriente de operación y de retención se llaman IOP1, IOP2, IOP3 e IRT1, IRT2, IRT3 respectivamente según fase.

#### 4.2.1.- Tablas con resultados de pruebas a relé SEL-587.

<b>PRUEBA 31</b>	<b>IAW1</b>	<b>IBW1</b>	<b>ICW1</b>	<b>IAW2</b>	<b>IBW2</b>	<b>ICW2</b>
I (A-sec)	3,51	3,51	3,5	11,97	12,01	12,01
Angle (deg)	0	240,41	120,08	210,14	89,93	329,96
	<b>IOP1</b>	<b>IOP2</b>	<b>IOP3</b>	<b>IRT1</b>	<b>IRT2</b>	<b>IRT3</b>
I (A-sec)	0,57	0,57	0,56	3,79	3,8	3,8

Tabla 4.1. Resultados prueba 1 sesión 3.

<b>PRUEBA 33</b>	<b>IAW1</b>	<b>IBW1</b>	<b>ICW1</b>	<b>IAW2</b>	<b>IBW2</b>	<b>ICW2</b>
I (A-sec)	3,5	3,51	3,51	11,01	11,01	11
Angle (deg)	0	240,09	120,34	210	90,01	329,91
	<b>IOP1</b>	<b>IOP2</b>	<b>IOP3</b>	<b>IRT1</b>	<b>IRT2</b>	<b>IRT3</b>
I (A-sec)	0,25	0,24	0,24	3,61	3,63	3,62

Tabla 4.2. Resultados prueba 3 sesión 3.

<b>PRUEBA 35</b>	<b>IAW1</b>	<b>IBW1</b>	<b>ICW1</b>	<b>IAW2</b>	<b>IBW2</b>	<b>ICW2</b>
I (A-sec)	3,5	3,51	3,5	8,98	9,03	9
Angle (deg)	0	240,11	120,02	210,24	90,05	329,95
	<b>IOP1</b>	<b>IOP2</b>	<b>IOP3</b>	<b>IRT1</b>	<b>IRT2</b>	<b>IRT3</b>
I (A-sec)	0,43	0,43	0,44	3,28	3,28	3,29

Tabla 4.3. Resultados prueba 5 sesión 3.

<b>PRUEBA 37</b>	<b>IAW1</b>	<b>IBW1</b>	<b>ICW1</b>	<b>IAW2</b>	<b>IBW2</b>	<b>ICW2</b>
I (A-sec)	3,49	3,5	3,49	6,98	7,03	7,02
Angle (deg)	0	239,33	119,54	209,61	89,47	329,54
	<b>IOP1</b>	<b>IOP2</b>	<b>IOP3</b>	<b>IRT1</b>	<b>IRT2</b>	<b>IRT3</b>
I (A-sec)	1,12	1,11	1,12	2,94	2,94	2,95

Tabla 4.4. Resultados prueba 7 sesión 3.

<b>PRUEBA 39</b>	<b>IAW1</b>	<b>IBW1</b>	<b>ICW1</b>	<b>IAW2</b>	<b>IBW2</b>	<b>ICW2</b>
I (A-sec)	3,52	3,53	3,52	4,98	5,02	5
Angle (deg)	0	240,07	119,68	210,02	89,73	329,87
	<b>IOP1</b>	<b>IOP2</b>	<b>IOP3</b>	<b>IRT1</b>	<b>IRT2</b>	<b>IRT3</b>
I (A-sec)	1,82	1,8	1,79	2,6	2,6	2,6
Event:	TRP1	Targets:	87	A	B	C

Tabla 4.5. Resultados prueba 9 sesión 3.

### 4.3.- Resultados de simulación utilizando planilla.

De manera similar al punto anterior, los resultados se entregan diferenciados por colores según cada fase. Cada tabla contiene en la parte superior información ingresada a la planilla, como magnitud corriente por fase y ángulo de la corriente ingresada.

Similar advertencia al punto anterior se debe presentar, los ángulos aquí expuestos son desde la perspectiva del relé, por lo que a simple vista pueden resultar contradictorios a los análisis presentados en el capítulo anterior, mas no tardará el lector en notar la concordancia de ellos y el material expuesto precedentemente. A continuación los valores entregados por la planilla entregada en este trabajo para las condiciones de prueba a las que ha sido sometido el relé.

#### 4.3.1.- Tablas con resultados de simulación utilizando planilla.

<b>PRUEBA 31</b>	<b>IAW1</b>	<b>IBW1</b>	<b>ICW1</b>	<b>IAW2</b>	<b>IBW2</b>	<b>ICW2</b>
I (A-sec)	3,5	3,5	3,5	12	12	12
Angle (deg)	0	240	120	210	90	330
	<b>IOP1</b>	<b>IOP2</b>	<b>IOP3</b>	<b>IRT1</b>	<b>IRT2</b>	<b>IRT3</b>
I (A-sec)	0,593	0,593	0,593	3,796	3,796	3,796

Tabla 4.6. Resultados simulación basado en prueba 1 sesión 3.

<b>PRUEBA 33</b>	<b>IAW1</b>	<b>IBW1</b>	<b>ICW1</b>	<b>IAW2</b>	<b>IBW2</b>	<b>ICW2</b>
I (A-sec)	3,5	3,5	3,5	11	11	11
Angle (deg)	0	240	120	210	90	330
	<b>IOP1</b>	<b>IOP2</b>	<b>IOP3</b>	<b>IRT1</b>	<b>IRT2</b>	<b>IRT3</b>
I (A-sec)	0,252	0,252	0,252	3,626	3,626	3,626

Tabla 4.7. Resultados simulación basado en prueba 3 sesión 3.

<b>PRUEBA 35</b>	<b>IAW1</b>	<b>IBW1</b>	<b>ICW1</b>	<b>IAW2</b>	<b>IBW2</b>	<b>ICW2</b>
I (A-sec)	3,5	3,5	3,5	9	9	9
Angle (deg)	0	240	120	210	90	330
	<b>IOP1</b>	<b>IOP2</b>	<b>IOP3</b>	<b>IRT1</b>	<b>IRT2</b>	<b>IRT3</b>
I (A-sec)	0,43	0,43	0,43	3,285	3,285	3,285

Tabla 4.8. Resultados simulación basado en prueba 5 sesión 3.

<b>PRUEBA 37</b>	<b>IAW1</b>	<b>IBW1</b>	<b>ICW1</b>	<b>IAW2</b>	<b>IBW2</b>	<b>ICW2</b>
I (A-sec)	3,5	3,5	3,5	7	7	7
Angle (deg)	0	240	120	210	90	330
	<b>IOP1</b>	<b>IOP2</b>	<b>IOP3</b>	<b>IRT1</b>	<b>IRT2</b>	<b>IRT3</b>
I (A-sec)	1,113	1,113	1,113	2,944	2,944	2,944

Tabla 4.9. Resultados simulación basado en prueba 7 sesión 3.

<b>PRUEBA 39</b>	<b>IAW1</b>	<b>IBW1</b>	<b>ICW1</b>	<b>IAW2</b>	<b>IBW2</b>	<b>ICW2</b>
I (A-sec)	3,5	3,5	3,5	5	5	5
Angle (deg)	0	240	120	210	90	330
	<b>IOP1</b>	<b>IOP2</b>	<b>IOP3</b>	<b>IRT1</b>	<b>IRT2</b>	<b>IRT3</b>
I (A-sec)	1,795	1,795	1,795	2,603	2,603	2,603
Event:	TRP1	Targets:	87	A	B	C

Tabla 4.10. Resultados simulación basado en prueba 9 sesión 3.

#### 4.4.- Comparación de resultados relé, planilla.

En las tablas siguientes se muestra la diferencia porcentual existente entre cada valor registrado en el caso de las pruebas en relé, y los valores entregados por simulación realizada en la planilla de cálculo.

<b>PRUEBA 31</b>	<b>IAW1</b>	<b>IBW1</b>	<b>ICW1</b>	<b>IAW2</b>	<b>IBW2</b>	<b>ICW2</b>
I (A-sec)	-0,003	-0,003	0,000	0,002	-0,001	-0,001
Angle (deg)	0,000	-0,002	-0,001	-0,001	0,001	0,000
	<b>IOP1</b>	<b>IOP2</b>	<b>IOP3</b>	<b>IRT1</b>	<b>IRT2</b>	<b>IRT3</b>
I (A-sec)	0,039	0,039	0,056	0,002	-0,001	-0,001

Tabla 4.11. Comparación resultados prueba y simulación. Prueba 1 sesión 3.

<b>PRUEBA 33</b>	<b>IAW1</b>	<b>IBW1</b>	<b>ICW1</b>	<b>IAW2</b>	<b>IBW2</b>	<b>ICW2</b>
I (A-sec)	0,000	-0,003	-0,003	-0,001	-0,001	0,000
Angle (deg)	0,000	0,000	-0,003	0,000	0,000	0,000
	<b>IOP1</b>	<b>IOP2</b>	<b>IOP3</b>	<b>IRT1</b>	<b>IRT2</b>	<b>IRT3</b>
I (A-sec)	0,008	0,048	0,048	0,004	-0,001	0,002

Tabla 4.12. Comparación resultados prueba y simulación. Prueba 3 sesión 3.

<b>PRUEBA 35</b>	<b>IAW1</b>	<b>IBW1</b>	<b>ICW1</b>	<b>IAW2</b>	<b>IBW2</b>	<b>ICW2</b>
I (A-sec)	0,000	-0,003	0,000	0,002	-0,003	0,000
Angle (deg)	0,000	0,000	0,000	-0,001	-0,001	0,000
	<b>IOP1</b>	<b>IOP2</b>	<b>IOP3</b>	<b>IRT1</b>	<b>IRT2</b>	<b>IRT3</b>
I (A-sec)	0,000	0,000	-0,023	0,002	0,002	-0,002

Tabla 4.13. Comparación resultados prueba y simulación. Prueba 5 sesión 3.

<b>PRUEBA 37</b>	<b>IAW1</b>	<b>IBW1</b>	<b>ICW1</b>	<b>IAW2</b>	<b>IBW2</b>	<b>ICW2</b>
I (A-sec)	0,003	0,000	0,003	0,003	-0,004	-0,003
Angle (deg)	0,000	0,003	0,004	0,002	0,006	0,001
	<b>IOP1</b>	<b>IOP2</b>	<b>IOP3</b>	<b>IRT1</b>	<b>IRT2</b>	<b>IRT3</b>
I (A-sec)	-0,006	0,003	-0,006	0,001	0,001	-0,002

Tabla 4.14. Comparación resultados prueba y simulación. Prueba 7 sesión 3.

<b>PRUEBA 39</b>	<b>I AW1</b>	<b>IBW1</b>	<b>ICW1</b>	<b>I AW2</b>	<b>IBW2</b>	<b>ICW2</b>
I (A-sec)	-0,006	-0,009	-0,006	0,004	-0,004	0,000
Angle (deg)	0,000	0,000	0,003	0,000	0,003	0,000
	<b>I OP1</b>	<b>I OP2</b>	<b>I OP3</b>	<b>I RT1</b>	<b>I RT2</b>	<b>I RT3</b>
I (A-sec)	-0,014	-0,003	0,003	0,001	0,001	0,001

Tabla 4.15. Comparación resultados prueba y simulación. Prueba 9 sesión 3.

Se puede ver directamente que la precisión o exactitud del algoritmo replicado es alta. No se hallan diferencias mayores al 6% en el peor caso, siendo 1% el error promedio en corrientes de operación o retención. Cabe mencionar que no se considera en este análisis los errores agregados por la maleta, ya que como se puede apreciar en el reporte de resultados de pruebas realizadas en laboratorio (figura 4.4), los valores de magnitud de corriente y fase no son exactos, a diferencia de los que se ingresan a la planilla.

No obstante esto, los resultados se califican de satisfactorios, se da por superado uno de los hitos importantes de este trabajo, esto es, validar los resultados entregados por la planilla que replica el algoritmo del relé SEL-587.

## Capítulo 5. Ensayo y Protocolo.

### 5.1.- Introducción.

En ocasiones, es posible que ciertos errores en las instalaciones pasen las pruebas estándares de comisionamiento, a pesar de los esfuerzos que técnicos e ingenieros realizan en dichas pruebas. La bibliografía consultada [10] tiene reportado los siguientes eventos como los más comúnmente repetidos y significativos en la puesta en marcha u operación del dispositivo de protección.

- \* Terminal perdido en el cableado secundario del TT/CC
- \* Tap incorrecto en TT/CC
- \* Incorrecta selección de tap de una de las fases de TT/CC
- \* Incorrecta polaridad de TT/CC
- \* Error en ajuste de compensación de ángulo por fase
- \* Ausencia de trampa de secuencia cero
- \* Falla del relé
- \* Restricted earth fault (falla a tierra restringida)
- \* Problemas del interruptor

Luego, es del todo conveniente poseer un protocolo que permita apoyar la lectura de las corrientes de operación  $I_{op}$ , y de retención  $I_{rst}$ , además de verificar el correcto funcionamiento de la protección diferencial.

A través de la herramienta presentada en este trabajo, se simplifica la visualización de las corrientes de operación  $I_{op}$ , y de retención  $I_{rst}$ , al permitir observarlas gráficamente, potenciando el análisis del personal de terreno.

### 5.2.- Simulación de errores comunes en comisionamiento.

La secuencia de simulaciones propuestas a continuación, y la correcta interpretación de sus resultados, permiten asegurar la ausencia de errores en tres de los problemas listados como los de más frecuente ocurrencia, esto es, incorrecta polaridad de TC, fase cambiada en terminales del TC, y terminal perdido en el cableado secundario del TC.

Como se ha visto en los apartados precedentes, es posible modificar estos parámetros en la planilla de cálculo generada, estos son incorrecta polaridad de TC, fase cambiada en terminales del TC, y terminal perdido en el cableado secundario del TC, mostrando gráficamente las variaciones en el plano de la característica de la protección que estos implican, por lo que resulta una herramienta de aplicación directa a este análisis.

Protocolo de lectura e interpretación de los registros de corriente de operación y retención; y verificación del relé.

\* Se realiza simulación en la planilla de conexión errada en la polaridad de los terminales del relé. Este valor se contrasta con la observación en terreno.

\* Se simula en la planilla la conexión intercambiada de dos fases en los terminales del relé. Este valor se contrasta con la observación en terreno.

\* Se simula en la planilla la pérdida de uno de los cables de ingreso al relé. Este valor se contrasta con la observación en terreno.

Para la visualización de los resultados de estas simulaciones, es claro que la planilla entregada aporta en la interpretación de las corriente obtenidas, transformando la interpretación de una colección de números, que puede resultar sencillo para el experto, en la interpretación de un gráfico, que debe resultar amigable para cualquier persona entrenada en los tópicos tratados en este trabajo.

### 5.3.- Resultados de simulaciones propuestas.

#### 5.3.1.- Simulaciones al 30% de potencia nominal.

Ingresando valores de corriente al 30% de la potencia nominal del transformador, se procede a realizar las simulaciones sugeridas en el protocolo.

a) Se comienza mostrando los resultados obtenidos para el caso de polaridad cambiada en un TC. Se ingresa un cambio de polaridad en el TC de media tensión de la fase b.

PRUEBA 231	IAW1	IBW1	ICW1	IAW2	IBW2	ICW2
I (A-sec)	0,87	0,87	0,87	2,58	2,58	2,58
Angle (deg)	0	240	120	210	90	330
	IOP1	IOP2	IOP3	IRT1	IRT2	IRT3
I (A-sec)	0,01	1,007	1,007	0,875	0,689	0,689

Tabla 5.1. Resultados simulación 1.

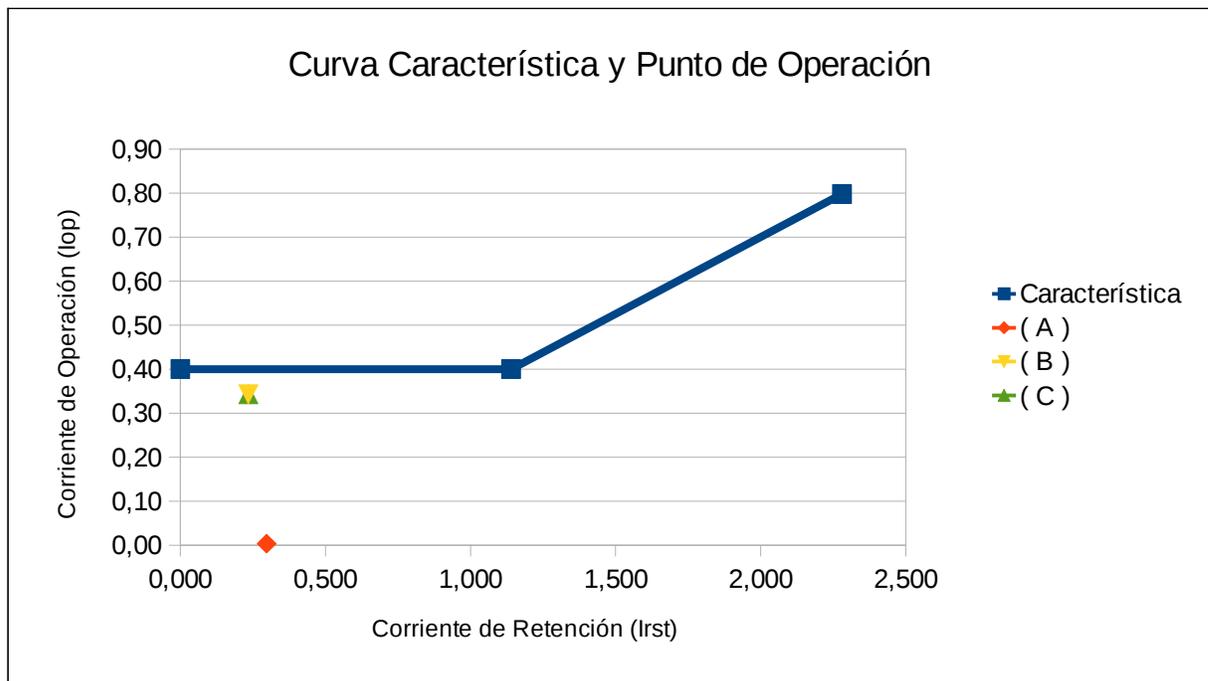


Figura 5.1. Resultados simulación 1.

Los resultados muestran un desbalance en la corriente de operación  $I_{op}$ , para las fases. También existe un desequilibrio, aunque no tan marcado en la corriente de retención  $I_{rst}$ . Lo más llamativo de esto es que a pesar del claro error ingresado en la protección, está no entra en zona de operación, lo que implica una dificultad mayor, ya que podría pasar desapercibida hasta entrar en operación, o bien, al alcanzar cierto nivel de carga una vez que ya se encuentre en servicio.

El cambio de polaridad en una de las fases, implica romper el equilibrio del sistema de corriente, por lo que resulta esperable el desequilibrio tanto en el cálculo de la corriente de operación y de retención.

b) Se muestra los resultados obtenidos para el caso de fase cambiada en terminales del relé. Se ingresa el cambio de las fases b y c del lado de alta tensión.

PRUEBA 233	I <sub>AW1</sub>	I <sub>BW1</sub>	I <sub>CW1</sub>	I <sub>AW2</sub>	I <sub>BW2</sub>	I <sub>CW2</sub>
I (A-sec)	0,87	0,87	0,87	2,58	2,58	2,58
Angle (deg)	0	240	120	210	90	330
	I <sub>OP1</sub>	I <sub>OP2</sub>	I <sub>OP3</sub>	I <sub>RT1</sub>	I <sub>RT2</sub>	I <sub>RT3</sub>
I (A-sec)	0,01	1,516	1,516	0,875	0,875	0,875

Tabla 5.2. Resultados simulación 2.

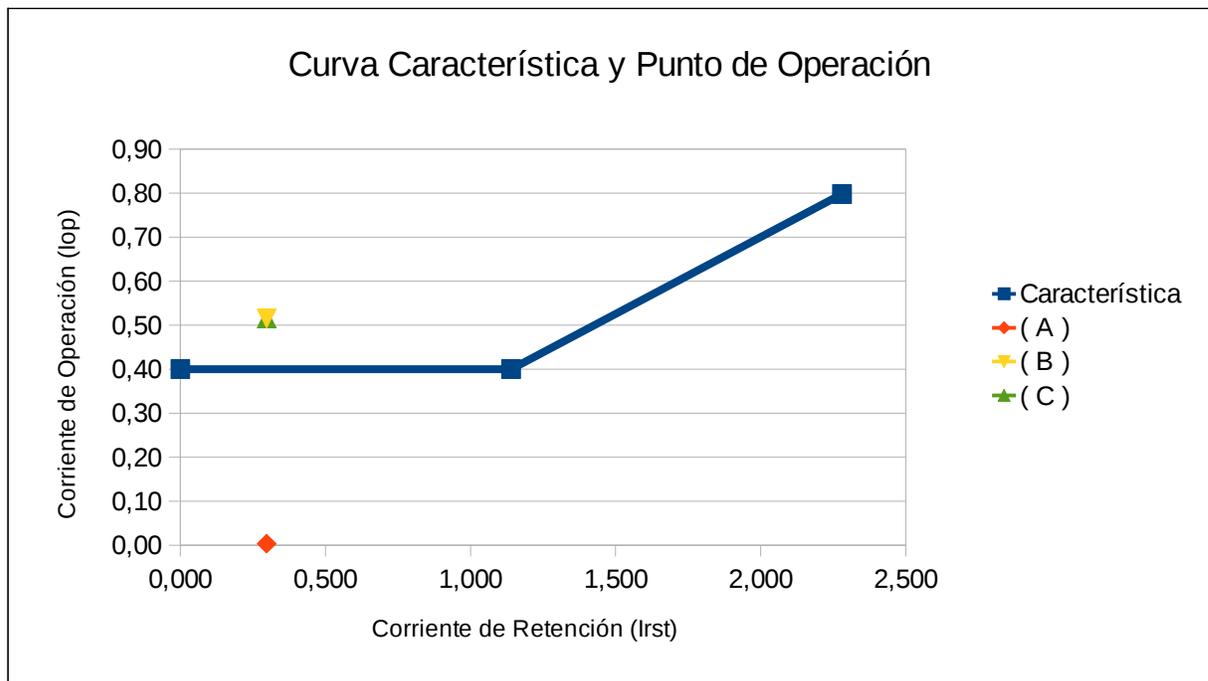


Figura 5.2. Resultados simulación 2.

Los resultados muestran un desbalance en la corriente de operación  $I_{op}$ , para las fases. No existe un desequilibrio en la corriente de retención  $I_{rst}$ . Esta falla debería resultar clara de apreciar, al menos a este nivel de carga.

El intercambio de dos fases, no implica romper el equilibrio del sistema de corriente, por lo que resulta esperable el desequilibrio en el cálculo de la corriente de operación, pero la corriente de retención al depender solo del módulo del sistema equilibrado, no se ve afectada.

c) Se muestra los resultados obtenidos para el caso de terminal perdido en el relé. No se ingresa corriente en la toma b del lado de media tensión.

PRUEBA 235	IAW1	IBW1	ICW1	IAW2	IBW2	ICW2
I (A-sec)	0,87	0,87	0,87	2,58	2,58	2,58
Angle (deg)	0	240	120	210	90	330
	IOP1	IOP2	IOP3	IRT1	IRT2	IRT3
I (A-sec)	0,01	0,499	0,499	0,875	0,689	0,689

Tabla 5.3. Resultados simulación 3.

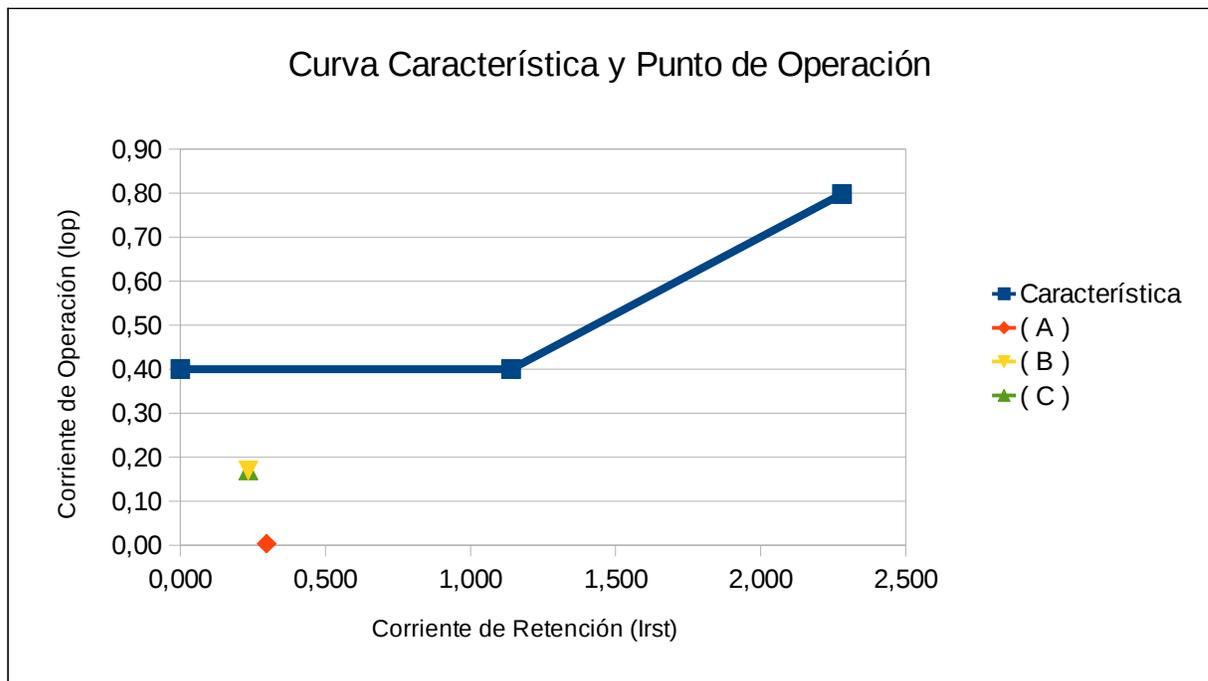


Figura 5.3. Resultados simulación 3.

Los resultados muestran un desbalance en la corriente de operación  $I_{op}$ , para las fases. También existe un desequilibrio, aunque no tan marcado en la corriente de retención  $I_{rst}$ . Al igual que el caso a), a pesar del claro error ingresado en la protección, está no entra en zona de operación, lo que implica una dificultad mayor, ya que podría pasar desapercibida hasta entrar en operación, o bien, al alcanzar cierto nivel de carga una vez que ya se encuentre en servicio.

El no ingreso de corriente en uno de los terminales, implica romper el equilibrio del sistema de corriente, por lo que resulta esperable el desequilibrio tanto en el cálculo de la corriente de operación y de retención.

### 5.3.2.- Simulaciones al 10% de potencia nominal.

Ingresando valores de corriente al 10% de la potencia nominal del transformador, se procede a realizar las pruebas sugeridas en el protocolo.

a) Se comienza mostrando los resultados obtenidos para el caso de polaridad cambiada en un TC. Se ingresa un cambio de polaridad en el TC de media tensión de la fase b.

PRUEBA 331	I <sub>AW1</sub>	I <sub>BW1</sub>	I <sub>CW1</sub>	I <sub>AW2</sub>	I <sub>BW2</sub>	I <sub>CW2</sub>
I (A-sec)	0,29	0,29	0,29	0,86	0,86	0,86
Angle (deg)	0	240	120	210	90	330
	I <sub>OP1</sub>	I <sub>OP2</sub>	I <sub>OP3</sub>	I <sub>RT1</sub>	I <sub>RT2</sub>	I <sub>RT3</sub>
I (A-sec)	0,003	0,336	0,336	0,292	0,23	0,23

Tabla 5.4. Resultados simulación 4.

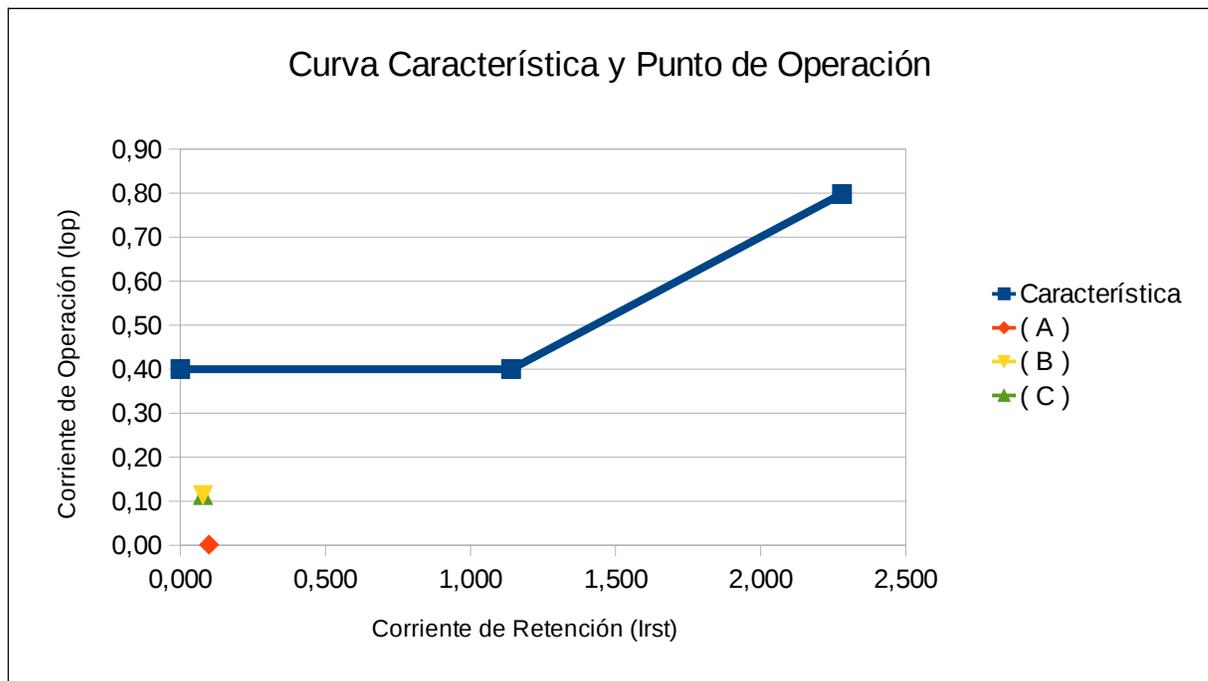


Figura 5.4. Resultados simulación 4.

Los resultados muestran un desbalance en la corriente de operación  $I_{op}$ , para las fases. También existe un desequilibrio, aunque no tan marcado en la corriente de retención  $I_{rst}$ . Lo más llamativo de esto es que a pesar del claro error ingresado en la protección, está no entra en zona de operación, lo que implica una dificultad mayor, ya que podría pasar desapercibida hasta entrar en operación, o bien, al alcanzar cierto nivel de carga una vez que ya se encuentre en servicio.

El cambio de polaridad en una de las fases, implica romper el equilibrio del sistema de corriente, por lo que resulta esperable el desequilibrio tanto en el cálculo de la corriente de operación y de retención.

b) Se muestra los resultados obtenidos para el caso de fase cambiada en terminales del relé. Se ingresa el cambio de las fases b y c del lado de alta tensión.

PRUEBA 333	I AW1	I BW1	I CW1	I AW2	I BW2	I CW2
I (A-sec)	0,29	0,29	0,29	0,86	0,86	0,86
Angle (deg)	0	240	120	210	90	330
	I OP1	I OP2	I OP3	I RT1	I RT2	I RT3
I (A-sec)	0,003	0,505	0,505	0,292	0,292	0,292

Tabla 5.5. Resultados simulación 5.

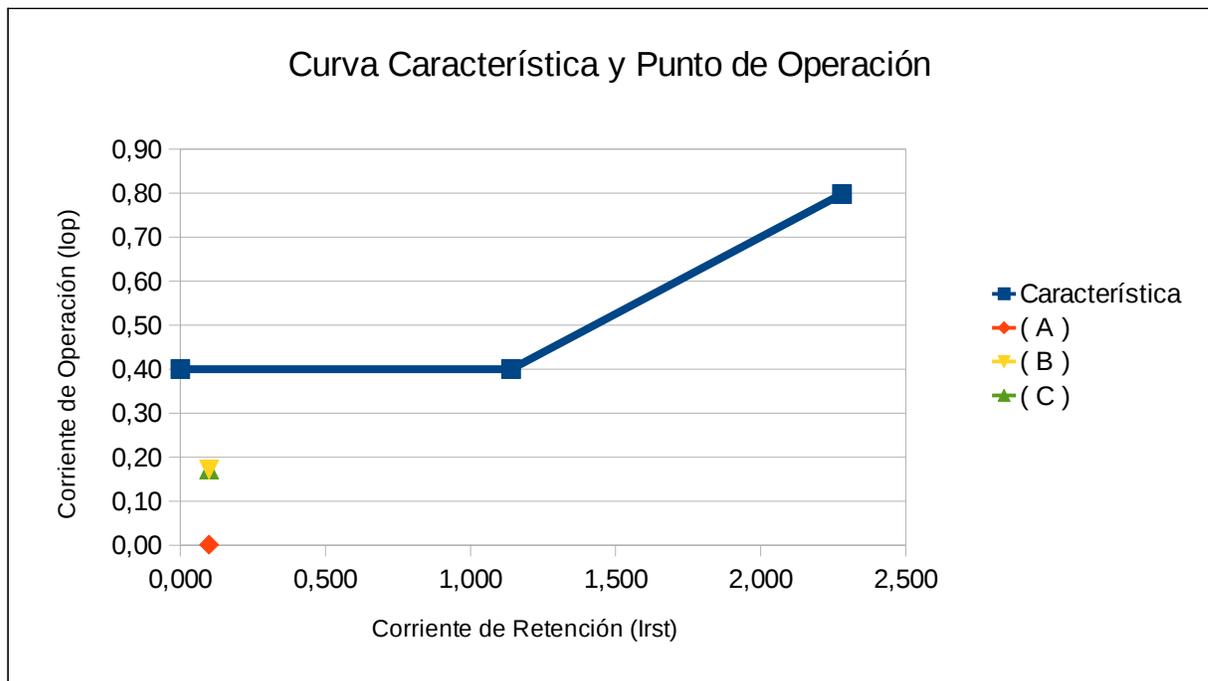


Figura 5.5. Resultados simulación 5.

Los resultados muestran un desbalance en la corriente de operación  $I_{op}$ , para las fases. No existe un desequilibrio en la corriente de retención  $I_{rst}$ . Esta falla debería resultar clara de apreciar, al menos a este nivel de carga.

El intercambio de dos fases, no implica romper el equilibrio del sistema de corriente, por lo que resulta esperable el desequilibrio en el cálculo de la corriente de operación, pero la corriente de retención al depender sólo del módulo del sistema equilibrado, no se ve afectada.

c) Se muestra los resultados obtenidos para el caso de terminal perdido en el relé. No se ingresa corriente en la toma b del lado de media tensión.

PRUEBA 335	IAW1	IBW1	ICW1	IAW2	IBW2	ICW2
I (A-sec)	0,29	0,29	0,29	0,86	0,86	0,86
Angle (deg)	0	240	120	210	90	330
	IOP1	IOP2	IOP3	IRT1	IRT2	IRT3
I (A-sec)	0,003	0,166	0,166	0,292	0,23	0,23

Tabla 5.6. Resultados simulación 6.

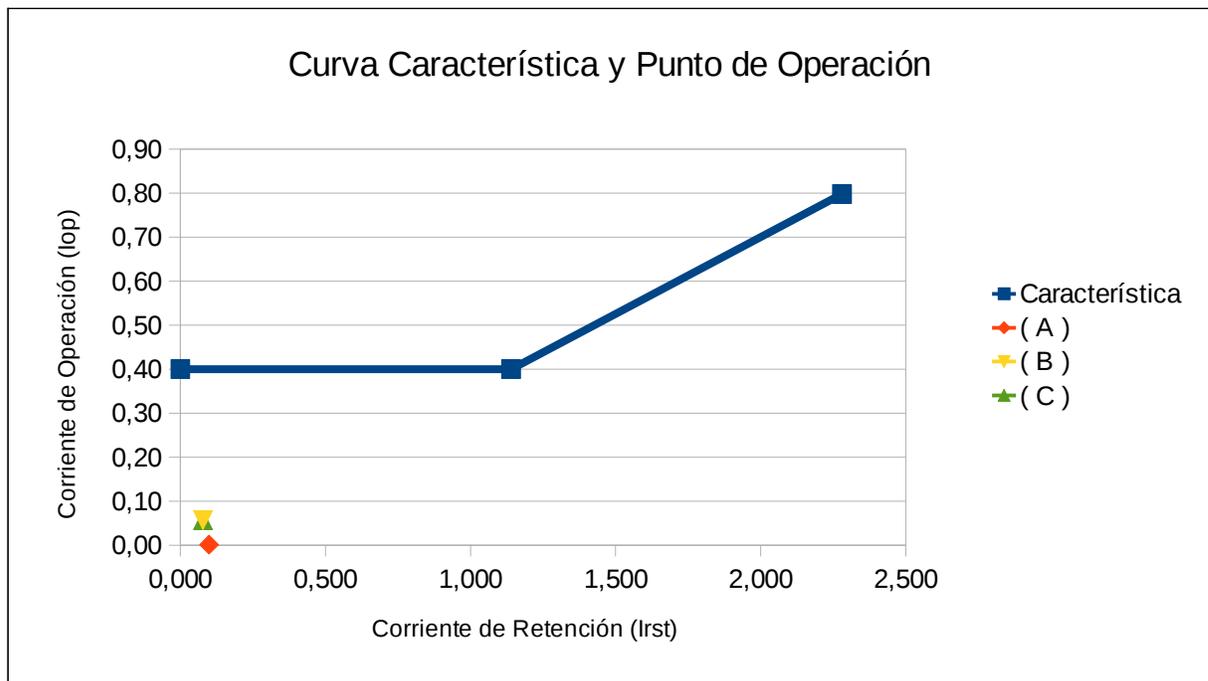


Figura 5.6. Resultados simulación 6.

Los resultados muestran un desbalance en la corriente de operación  $I_{op}$ , para las fases. También existe un desequilibrio, aunque no tan marcado en la corriente de retención  $I_{rst}$ . Al igual que el caso a), a pesar del claro error ingresado en la protección, está no entra en zona de operación, lo que implica una dificultad mayor, ya que podría pasar desapercibida hasta entrar en operación, o bien, al alcanzar cierto nivel de carga una vez que ya se encuentre en servicio.

El no ingreso de corriente en uno de los terminales, implica romper el equilibrio del sistema de corriente, por lo que resulta esperable el desequilibrio tanto en el cálculo de la corriente de operación y de retención.

#### 5.4.- Protocolo de lectura e interpretación, de los registros de corrientes de operación y retención; y verificación del relé.

A la luz de los hallazgos hasta acá obtenidos, se presenta el siguiente listado de resultados y conclusiones, como prácticas recomendadas a la hora de testear el relé SEL-587.

Protocolo de lectura e interpretación de los registros de corriente de operación y retención y verificación del relé.

1.- Simular en la planilla, la conexión errada en la polaridad de los terminales del relé. Este valor se contrasta con la observación en terreno.

Se verifica que para un error en la fase a, se tendrá un incremento de la corriente de operación a y b en casi 100 veces el valor estándar, además de un decremento en la corriente de retención de la fase a y b. Se verifica que para un error en la fase b, se tendrá un incremento de la

corriente de operación b y c en casi 100 veces el valor estándar, además de un decremento en la corriente de retención de la fase b y c. Se verifica que para un error en la fase c, se tendrá un incremento de la corriente de operación c y a en casi 100 veces el valor estándar, además de un decremento en la corriente de retención de la fase c y a.

2.- Simular en la planilla la conexión intercambiada de dos fases en los terminales del relé. Este valor se contrasta con la observación en terreno.

Se verifica que para un intercambio de fases en el ingreso de corrientes al relé, la corriente de retención no presenta diferencias al caso estándar. Un intercambio entre las fases a y b, tendrá un incremento de la corriente de operación en casi 170 veces el valor estándar en la fase a y b. Un intercambio entre las fases b y c, tendrá un incremento de la corriente de operación en casi 170 veces el valor estándar en la fase b y c. Un intercambio entre las fases c y a, tendrá un incremento de la corriente de operación en casi 170 veces el valor estándar en la fase c y a.

3.- Se simula en la planilla la pérdida de uno de los cables de ingreso al relé. Este valor se contrasta con la observación en terreno.

Se verifica que para un terminal perdido en la fase a, se tendrá un incremento de la corriente de operación a y b en casi 50 veces el valor estándar, además de un decremento en la corriente de retención de la fase a y b. Se verifica que para un terminal perdido en la fase b, se tendrá un incremento de la corriente de operación b y c en casi 50 veces el valor estándar, además de un decremento en la corriente de retención de la fase b y c. Se verifica que para un terminal perdido en la fase c, se tendrá un incremento de la corriente de operación c y a en casi 50 veces el valor estándar, además de un decremento en la corriente de retención de la fase c y a.

## 6.- Conclusiones

Se ha visto como una idea sencilla, a saber, la ley de corrientes de Kirchoff, permite la protección de elementos fundamentales en la operación de los sistemas de potencia, como los transformadores de poder. La aplicación de este concepto incluye una serie de precauciones y complicaciones que se deben considerar en detalle, para lograr un ajuste exitoso. Un ejemplo de esto, es el cuidado en la determinación de las magnitudes de corriente a ingresar al relé y cómo deben ser ajustadas en magnitud y fase, de manera de ser comparables y determinar si se produce una falla interna en el transformador.

Se ha podido observar como la tecnología numérica facilita algunos de estos puntos, en particular, como simplifica el alambrado de la instalación, lo que sin duda redundará en una reducción de la probabilidad de error en el proceso de montaje y puesta en servicio. Contar con registro de eventos, es también otro de los grandes avances que permite la tecnología digital.

En la construcción de la planilla, ha sido necesario el conocimiento teórico de la aplicación de la protección diferencial, así como también se han empleado manuales y papers generados por el fabricante, los que resultaron decisivos al mostrar la lógica de disparo, de manera de lograr replicar los cálculos.

A lo largo del desarrollo de este trabajo se ha podido experimentar la escasez de bibliografía referente a pruebas o comisionamiento de relés. Este hecho resulta muy llamativo ya que la comprensión completa de los relés empleados, hasta ahora, sólo se logra a través del estudio de su manual de instalación y operación, por lo que resulta fundamental que el fabricante genere y actualice manuales y guías de operación y aplicación. Se puede afirmar que la entrega, por parte del fabricante, de manuales y guías de aplicación detalladas, repercute en el desempeño que la instalación tendrá a lo largo del tiempo, ya que permite una comprensión detallada por parte de los especialistas de las reacciones de los elementos protectores ante fenómenos que se puedan observar.

Se puede ver directamente que la precisión o exactitud del algoritmo replicado es alta. En las pruebas realizadas y presentadas en el capítulo 4, esto es, la contrastación de los resultados del relé ante situaciones simuladas, y los resultados obtenidos por la planilla ante los mismos requerimientos, en los casos 1, 3, 5, 7 y 9 de pruebas de la sesión 3, no se hallan diferencias mayores al 6% en el peor caso, siendo 1% el error promedio en corrientes de operación y retención. Cabe mencionar que no se ha considerado los errores agregados por la maleta, ya que como se puede apreciar en el reporte de resultados de pruebas realizadas en laboratorio, los valores de magnitud de corriente y fase que ingresa la maleta al relé difieren levemente de los solicitados, a diferencia de los que se ingresan a la planilla, por lo que resulta razonable esperar bajar el porcentaje de error si estos factores son tomados en cuenta.

Se ha visto en la práctica de la compañía, que la frontera de actuación es dejada de lado en las pruebas rutinarias que se suelen hacer a la protección. Las pruebas que se realizan, como ejemplo situar a la protección en un punto de operación cualquiera, y variar las corrientes de ingreso hasta la actuación, están más orientadas en verificar que la protección responda, que a determinar en qué lugar responde o si el lugar en que responde es el que se ha configurado según los requerimientos de la instalación.

En este sentido la herramienta entregada, permite visualizar las corrientes necesarias a

ingresar de manera de situarse en la frontera de actuación y realizar una prueba en condiciones más controladas que las que se realizan hasta ahora.

Se ha logrado entregar un protocolo de lectura e interpretación de los registros de corriente de operación y retención; y verificación del relé. De manera resumida este entrega la posibilidad de hallar fallas comunes en este tipo de instalaciones con el auxilio de la planilla desarrollada. Verifica que para un error en la fase a, se tendrá un incremento de la corriente de operación a y b en casi 100 veces el valor estándar, además de un decremento en la corriente de retención de la fase a y b. Verifica que para un intercambio de fases en el ingreso de corrientes al relé, la corriente de retención no presenta diferencias al caso estándar. Un intercambio entre las fases a y b, tendrá un incremento de la corriente de operación en casi 170 veces el valor estándar en la fase a y b. Verifica que para un terminal perdido en la fase a, se tendrá un incremento de la corriente de operación a y b en casi 50 veces el valor estándar, además de un decremento en la corriente de retención de la fase a y b.

Desde la perspectiva de los objetivos, el autor considera que la planilla generada cumple con las expectativas que se generó al comenzar este trabajo, ya que cumple con su objetivo principal, esto es, replicar los valores entregados por el relé SEL-587. La planilla generada en este trabajo logra aportar en la disminución de posibles errores de interpretación de corrientes, pues simplifica su lectura, y como se ha hecho evidente no significa la incorporación de un costo adicional en el ejercicio de la compañía.

En relación al protocolo propuesto, se espera que el cotidiano ejercicio de la labor en la compañía que acogió al autor, muestre la idoneidad del mismo. Las pruebas expuestas en este trabajo apuntan en la dirección correcta, pero se considera que debe ser sometido al juicio del trabajo cotidiano.

## 6.1.- Desafíos pendientes.

Entre los desafíos pendientes, el que más motiva la curiosidad del autor, es la posibilidad de dibujar completamente la característica diferencial utilizando el método presentado en el capítulo 5, es decir, entregando las corrientes a ingresar en el relé para cada punto de la característica. Esto permitiría la prueba del relé a lo largo de toda la frontera, pudiendo asegurar su correcto funcionamiento. Es cierto que existen métodos elaborados que realizan esta función, sin ir más lejos, el software que controla la maleta hexafásica vista durante el desarrollo de este trabajo posee la capacidad de realizar el dibujo de la característica de forma automática, mientras realiza pruebas sobre el relé. Sin embargo, en la práctica habitual de Chilectra S.A. no se realizan. El autor se aventura a decir que muchas veces, las nuevas tecnologías son leídas como una complicación más que como un beneficio, por lo que resulta del todo interesante aportar con una herramienta sencilla y familiar (como una planilla de cálculo) como medio de introducción, de manera que todo involucrado e interesado, pueda luego ir más allá con las herramientas de que dispone.

El trabajo en el espectro de frecuencia no se ha abordado en el desarrollo de este trabajo, sin duda existe ahí un nicho importante de conocimiento hacia donde este estudio puede ser ampliado, al indagar la respuesta de este relé ante la aparición de determinadas armónicas en la corriente de entrada.

## Referencias

- [1] A. Iriondo, "Protecciones de Sistemas de Potencia", Servicio Editorial UPV/EHU. Bilbao, 1996.
- [2] J. Blackburn, "Protective Relaying principles and applications", Marcel Dekker. 1998.
- [3] L. Brand, J. Moncada, "Protecciones de Sistemas Eléctricos", Editado, impreso y distribuido por Hugo González. Santiago de Chile, 1976.
- [4] G. Enríquez Harper, "Fundamentos de Protecciones de Sistemas Eléctricos por relevadores", Limusa. Mexico D.F., 1996.
- [5] J. A. Yebra Morón, "Sistemas Eléctricos de Distribución", Editorial Reverté. Mexico D.F., 2009.
- [6] B. S. Guru, H. R. Hiziroglu, "Máquinas Eléctricas y Transformadores", Oxford University Press. Mexico D.F., 2003.
- [7] Enrique. Ras, "Transformadores de Potencia, de Medida y de Protección", Marcombo Boixareu Editores. Barcelona, 1988.
- [8] S. E. Zocholl, D. W. Smaha, "Current Transformer Concepts", 46th annual GeorgiaTech protective relay conference. Atlanta, GA, April 29-May 1, 1992.
- [9] J. Roberts, S. E. Zocholl, G. Benmouyal, "Selecting CTs to Optimize Relay Performance", 23rd Annual western protective relay conference. Spokane, WA, Oct 15-17, 1996.
- [10] D. Costello, "Lessons Learned Through Commissioning and Analyzing Data from Transformer Differential Installations". Power systems conference:Advanced metering, protection, control, communication and distributed resources. Clemson, SC, March 13-16, 2007
- [11] Z. Gajic, F. Mekic, "Easy and intuitive method for testing transformer differential relays", 62nd annual GeorgiaTech protective relay conference. Atlanta, GA, May 21-23, 2008.
- [12] SEL-587-0,-1; Instruction manual. 2002
- [13] S.E. Zocholl, A. Guzmán, D. Hou, "Transformer Modeling as Applied to Differential Protection", 22nd Annual Western Protective Conference. Spokane, WA, Oct 20-22, 1996.
- [14] S.E.Zocholl, "Transformer Protection, An Analysis of Field Cases", 25 Annual Western Protective Relay Conference, Spokane, WA, Oct 13-15, 1998.
- [15] J. J. Kumm, M. S. Weber, E. O. Schweitzer, III, and D. Hou, "Philosophies for Testing Protective Relays," Proceedings of the 20th Annual Western Protective Relay Conference, Spokane, Washington, October 19-21, 1993.
- [16] M. Thomson, J. Closson, "Using Iop Characteristics to troubleshoot transformer differential relay misoperation", International Electrical Testing Association Technical Conference, Kansas City, Mo, March 13-16, 2001.
- [17] IEEE Std C37.91, "IEEE Guide for Protective Relay Application to Power Transformers"
- [18] W. Brokering, R. Palma, L. Vargas, "Ñom lüfke (El rayo domado) o Los Sistemas Eléctricos de Potencia", Prentice Hall-Pearson Education, Santiago de Chile, 2008.

[19] P.M. Anderson, "Power system protection", McGraw-Hill, New York, 1999.

# Anexo A

## Pruebas sesión 1.

Este set de tablas muestra los resultados de la primera sesión pruebas, en dicha ocasión la motivación fue simplemente recoger datos, de manera de comprender como el relé generaba los valores de corriente de operación y retención. Vale consignar que algunas de las predicciones planteadas por el autor para esta sesión de prueba no funcionaron.

<b>PRUEBA 1</b>	<b>IAW1</b>	<b>IBW1</b>	<b>ICW1</b>	<b>IAW2</b>	<b>IBW2</b>	<b>ICW2</b>
I (A-sec)	0,12	0,14	0,13	0,41	0,41	0,39
Angle (deg)	0	243,41	122,98	209,14	90,69	329,25
RZS=N	IOP1	IOP2	IOP3	IRT1	IRT2	IRT3
I (A-sec)	0,02	0,01	0,01	0,14	0,13	0,13

<b>PRUEBA 2</b>	<b>IAW1</b>	<b>IBW1</b>	<b>ICW1</b>	<b>IAW2</b>	<b>IBW2</b>	<b>ICW2</b>
I (A-sec)	1	1	1,01	6,33	6,36	6,36
Angle (deg)	0	240,22	119,29	209,54	89,31	329,22
RZS=N	IOP1	IOP2	IOP3	IRT1	IRT2	IRT3
I (A-sec)	1,14	1,17	1,16	1,59	1,58	1,58
Event:	TRP1	Targets:	87	C		

<b>PRUEBA 4</b>	<b>IAW1</b>	<b>IBW1</b>	<b>ICW1</b>	<b>IAW2</b>	<b>IBW2</b>	<b>ICW2</b>
I (A-sec)	0,10	0,10	0,10	6,98	0,0	0,40
Angle (deg)	0	240,25	290,58	208,78	90,90	328,60
RZS=Y	IOP1	IOP2	IOP3	IRT1	IRT2	IRT3
I (A-sec)	0,08	0,08	0,02	0,59	0,59	0,10
Event:	TRP1	Targets:	87	B		

<b>PRUEBA 5</b>	<b>IAW1</b>	<b>IBW1</b>	<b>ICW1</b>	<b>IAW2</b>	<b>IBW2</b>	<b>ICW2</b>
I (A-sec)	1	1,02	0,99	6,32	6,39	6,35
Angle (deg)	0	241,12	121,6	209,87	89,97	329,77
RZS=Y	IOP1	IOP2	IOP3	IRT1	IRT2	IRT3
I (A-sec)	1,16	1,17	1,16	1,58	1,58	1,59

<b>PRUEBA 6</b>	<b>IAW1</b>	<b>IBW1</b>	<b>ICW1</b>	<b>IAW2</b>	<b>IBW2</b>	<b>ICW2</b>
I (A-sec)	0	0	0	6	0	0
Angle (deg)	0	270	0	159,75	180	180
RZS=Y	IOP1	IOP2	IOP3	IRT1	IRT2	IRT3
I (A-sec)	1,18	1,18	0,01	0,59	0,59	0
Event:	TRP1	Targets:	87	A	B	

<b>PRUEBA 7</b>	<b>IAW1</b>	<b>IBW1</b>	<b>ICW1</b>	<b>IAW2</b>	<b>IBW2</b>	<b>ICW2</b>
I (A-sec)	1,17	0	0	0,01	0	0
Angle (deg)	0	24,29	24,29	128,07	204,29	204,29
	<b>IOP1</b>	<b>IOP2</b>	<b>IOP3</b>	<b>IRT1</b>	<b>IRT2</b>	<b>IRT3</b>
I (A-sec)	1,17	0	0	0,58	0	0
Event:	TRP1	Targets:	87	A		

<b>PRUEBA 8</b>	<b>IAW1</b>	<b>IBW1</b>	<b>ICW1</b>	<b>IAW2</b>	<b>IBW2</b>	<b>ICW2</b>
I (A-sec)	1,73	0	0	0	0	0
Angle (deg)	0	151,77	136,52	258,99	91,52	91,52
	<b>IOP1</b>	<b>IOP2</b>	<b>IOP3</b>	<b>IRT1</b>	<b>IRT2</b>	<b>IRT3</b>
I (A-sec)	1,17	0,57	0,59	0,58	0,29	0,29

<b>PRUEBA 9</b>	<b>IAW1</b>	<b>IBW1</b>	<b>ICW1</b>	<b>IAW2</b>	<b>IBW2</b>	<b>ICW2</b>
I (A-sec)	3,11	3,1	3,12	12,45	12,5	12,5
Angle (deg)	0	240,11	119,98	209,79	89,7	329,75
	<b>IOP1</b>	<b>IOP2</b>	<b>IOP3</b>	<b>IRT1</b>	<b>IRT2</b>	<b>IRT3</b>
I (A-sec)	1,13	1,14	1,15	3,68	3,68	3,68

<b>PRUEBA 10</b>	<b>IAW1</b>	<b>IBW1</b>	<b>ICW1</b>	<b>IAW2</b>	<b>IBW2</b>	<b>ICW2</b>
I (A-sec)	3,09	3,1	3,08	12,46	12,51	12,52
Angle (deg)	0	240,33	119,93	209,89	89,84	329,84
RZS=Y	<b>IOP1</b>	<b>IOP2</b>	<b>IOP3</b>	<b>IRT1</b>	<b>IRT2</b>	<b>IRT3</b>
I (A-sec)	1,13	1,14	1,16	3,67	3,68	3,68

<b>PRUEBA 11</b>	<b>IAW1</b>	<b>IBW1</b>	<b>ICW1</b>	<b>IAW2</b>	<b>IBW2</b>	<b>ICW2</b>
I (A-sec)	3,11	3,1	3,12	11,47	11,51	11,51
Angle (deg)	0	240,04	119,94	209,72	89,63	329,64
	<b>IOP1</b>	<b>IOP2</b>	<b>IOP3</b>	<b>IRT1</b>	<b>IRT2</b>	<b>IRT3</b>
I (A-sec)	0,79	0,82	0,81	3,5	3,5	3,51

<b>PRUEBA 13</b>	<b>IAW1</b>	<b>IBW1</b>	<b>ICW1</b>	<b>IAW2</b>	<b>IBW2</b>	<b>ICW2</b>
I (A-sec)	3,11	3,1	3,12	10,49	10,5	10,52
Angle (deg)	0	240,38	120,05	210,00	89,95	329,09
	<b>IOP1</b>	<b>IOP2</b>	<b>IOP3</b>	<b>IRT1</b>	<b>IRT2</b>	<b>IRT3</b>
I (A-sec)	0,88	0,88	0,88	3,35	3,35	3,34

<b>PRUEBA 14</b>	<b>IAW1</b>	<b>IBW1</b>	<b>ICW1</b>	<b>IAW2</b>	<b>IBW2</b>	<b>ICW2</b>
I (A-sec)	3,08	3,1	3,11	10,48	10,5	10,53
Angle (deg)	0	239,95	120,06	209,61	89,63	329,5
RZS=Y	<b>IOP1</b>	<b>IOP2</b>	<b>IOP3</b>	<b>IRT1</b>	<b>IRT2</b>	<b>IRT3</b>
I (A-sec)	0,47	0,46	0,47	3,33	3,34	3,34

<b>PRUEBA 15</b>	<b>IAW1</b>	<b>IBW1</b>	<b>ICW1</b>	<b>IAW2</b>	<b>IBW2</b>	<b>ICW2</b>
I (A-sec)	3,11	3,08	3,11	9,47	9,13	9,5
Angle (deg)	0	240,22	120,49	210	90,08	330,01
	<b>IOP1</b>	<b>IOP2</b>	<b>IOP3</b>	<b>IRT1</b>	<b>IRT2</b>	<b>IRT3</b>
I (A-sec)	0,14	0,08	0,05	3,16	3,13	3,13

<b>PRUEBA 16</b>	<b>IAW1</b>	<b>IBW1</b>	<b>ICW1</b>	<b>IAW2</b>	<b>IBW2</b>	<b>ICW2</b>
I (A-sec)	3,11	3,08	3,11	9,48	9,52	9,5
Angle (deg)	0	240,25	120,5	210	89,93	330,02
	<b>IOP1</b>	<b>IOP2</b>	<b>IOP3</b>	<b>IRT1</b>	<b>IRT2</b>	<b>IRT3</b>
I (A-sec)	0,12	0,13	0,13	3,17	3,17	3,17

<b>PRUEBA 17</b>	<b>IAW1</b>	<b>IBW1</b>	<b>ICW1</b>	<b>IAW2</b>	<b>IBW2</b>	<b>ICW2</b>
I (A-sec)	3,12	3,11	3,1	8,48	8,5	8,51
Angle (deg)	0	240,32	120,3	210,37	90,29	330,34
	<b>IOP1</b>	<b>IOP2</b>	<b>IOP3</b>	<b>IRT1</b>	<b>IRT2</b>	<b>IRT3</b>
I (A-sec)	0,2	0,24	0,22	2,98	3,01	3,01

<b>PRUEBA 18</b>	<b>IAW1</b>	<b>IBW1</b>	<b>ICW1</b>	<b>IAW2</b>	<b>IBW2</b>	<b>ICW2</b>
I (A-sec)	3,11	3,08	3,11	8,5	8,49	8,51
Angle (deg)	0	240,2	120,15	209,74	89,76	329,8
	<b>IOP1</b>	<b>IOP2</b>	<b>IOP3</b>	<b>IRT1</b>	<b>IRT2</b>	<b>IRT3</b>
I (A-sec)	0,22	0,2	0,2	3	2,99	3

## Pruebas sesión 2.

Set de resultados correspondientes a la segunda sesión de pruebas. Para esta ocasión se solucionaron algunos inconvenientes de las versiones previas de la planilla, pudiendo mantenerse dentro de las predicciones posibles.

Se contó con el afortunado accidente de ingresar corriente desequilibrada en la toma de media tensión en varias pruebas. Este hecho fue relevante en el perfeccionamiento de la planilla.

<b>PRUEBA 16()</b>	<b>IAW1</b>	<b>IBW1</b>	<b>ICW1</b>	<b>IAW2</b>	<b>IBW2</b>	<b>ICW2</b>
I (A-sec)	3,08	3,07	3,1	9,46	3,08	9,53
Angle (deg)	0	247,82	120,19	210,1	66,91	329,95
	<b>IOP1</b>	<b>IOP2</b>	<b>IOP3</b>	<b>IRT1</b>	<b>IRT2</b>	<b>IRT3</b>
I (A-sec)	0,25	1,42	1,29	3,11	2,72	2,62
Event:	TRP1	Targets:	87	B	C	

<b>PRUEBA 18()</b>	<b>IAW1</b>	<b>IBW1</b>	<b>ICW1</b>	<b>IAW2</b>	<b>IBW2</b>	<b>ICW2</b>
I (A-sec)	3,09	3,04	3,09	8,88	3,02	8,5
Angle (deg)	0	240,37	120,86	210,18	66,76	330,12
	<b>IOP1</b>	<b>IOP2</b>	<b>IOP3</b>	<b>IRT1</b>	<b>IRT2</b>	<b>IRT3</b>
I (A-sec)	0,11	1,43	1,42	2,94	2,62	2,52
Event:	TRP1	Targets:	87	B	C	

<b>PRUEBA 19()</b>	<b>IAW1</b>	<b>IBW1</b>	<b>ICW1</b>	<b>IAW2</b>	<b>IBW2</b>	<b>ICW2</b>
I (A-sec)	3,53	3,51	3,49	11,97	3,5	12,01
Angle (deg)	0	248,49	120,16	210,14	68,68	330,09
	<b>IOP1</b>	<b>IOP2</b>	<b>IOP3</b>	<b>IRT1</b>	<b>IRT2</b>	<b>IRT3</b>
I (A-sec)	0,55	1,79	1,2	3,8	3,22	3,03
Event:	TRP1	Targets:	87	B		

<b>PRUEBA 20</b>	<b>IAW1</b>	<b>IBW1</b>	<b>ICW1</b>	<b>IAW2</b>	<b>IBW2</b>	<b>ICW2</b>
I (A-sec)	3,1	3,12	3,09	5,49	5,52	5,52
Angle (deg)	0	240,04	119,34	209,83	89,69	329,42
RZS=Y	<b>IOP1</b>	<b>IOP2</b>	<b>IOP3</b>	<b>IRT1</b>	<b>IRT2</b>	<b>IRT3</b>
I (A-sec)	1,22	1,23	1,22	2,48	2,49	2,48
Event:	TRP1	Targets:	87	A	B	C

<b>PRUEBA 21</b>	<b>IAW1</b>	<b>IBW1</b>	<b>ICW1</b>	<b>IAW2</b>	<b>IBW2</b>	<b>ICW2</b>
I (A-sec)	3,08	3,11	3,11	5,49	5,52	5,5
Angle (deg)	0	240,46	120,73	210,61	90,3	330,31
	<b>IOP1</b>	<b>IOP2</b>	<b>IOP3</b>	<b>IRT1</b>	<b>IRT2</b>	<b>IRT3</b>
I (A-sec)	1,23	1,22	1,22	2,49	2,48	2,48
Event:	TRP1	Targets:	87	B	C	

<b>PRUEBA 22</b>	<b>IAW1</b>	<b>IBW1</b>	<b>ICW1</b>	<b>IAW2</b>	<b>IBW2</b>	<b>ICW2</b>
I (A-sec)	3,11	3,14	3,11	4,5	4,52	4,51
Angle (deg)	0	239,75	119,42	210,07	89,52	329,7
RZS=Y	<b>IOP1</b>	<b>IOP2</b>	<b>IOP3</b>	<b>IRT1</b>	<b>IRT2</b>	<b>IRT3</b>
I (A-sec)	1,57	1,56	1,57	2,32	2,32	2,32
Event:	TRP1	Targets:	87	A	B	C

<b>PRUEBA 23</b>	<b>IAW1</b>	<b>IBW1</b>	<b>ICW1</b>	<b>IAW2</b>	<b>IBW2</b>	<b>ICW2</b>
I (A-sec)	3,11	3,1	3,13	4,49	4,52	4,51
Angle (deg)	0	240,05	120,13	210,2	89,99	329,9
	<b>IOP1</b>	<b>IOP2</b>	<b>IOP3</b>	<b>IRT1</b>	<b>IRT2</b>	<b>IRT3</b>
I (A-sec)	1,57	1,53	1,56	2,31	2,31	2,32
Event:	TRP1	Targets:	87	A	B	C

### Pruebas sesión 3.

Para la tercera ronda de pruebas se cuenta con una versión bastante acabada de la planilla, Se tiene claridad respecto a los resultados esperados y se busca confirmar la exactitud de los mismos. Los valores escogidos de ingreso de corriente llevarán el punto de operación desde una operación holgada, hasta la frontera de activación y finalmente el disparo de la protección.

<b>PRUEBA 30</b>	<b>IAW1</b>	<b>IBW1</b>	<b>ICW1</b>	<b>IAW2</b>	<b>IBW2</b>	<b>ICW2</b>
I (A-sec)	3,5	3,51	3,51	12	12,02	12,01
Angle (deg)	0	240,14	119,8	210,17	89,93	330
RZS=Y	<b>IOP1</b>	<b>IOP2</b>	<b>IOP3</b>	<b>IRT1</b>	<b>IRT2</b>	<b>IRT3</b>
I (A-sec)	0,58	0,56	0,59	3,79	3,8	3,8

<b>PRUEBA 31</b>	<b>IAW1</b>	<b>IBW1</b>	<b>ICW1</b>	<b>IAW2</b>	<b>IBW2</b>	<b>ICW2</b>
I (A-sec)	3,51	3,51	3,5	11,97	12,01	12,01
Angle (deg)	0	240,41	120,08	210,14	89,93	329,96
RZS=Y	<b>IOP1</b>	<b>IOP2</b>	<b>IOP3</b>	<b>IRT1</b>	<b>IRT2</b>	<b>IRT3</b>
I (A-sec)	0,57	0,57	0,56	3,79	3,8	3,8

<b>PRUEBA 32</b>	<b>IAW1</b>	<b>IBW1</b>	<b>ICW1</b>	<b>IAW2</b>	<b>IBW2</b>	<b>ICW2</b>
I (A-sec)	1,08	1,18	1,1	3,57	3,63	3,3
Angle (deg)	0	237,8	113,58	210,03	84,54	326,59
RZS=Y	<b>IOP1</b>	<b>IOP2</b>	<b>IOP3</b>	<b>IRT1</b>	<b>IRT2</b>	<b>IRT3</b>
I (A-sec)	0,24	0,23	0,25	3,62	3,63	3,63

<b>PRUEBA 33</b>	<b>IAW1</b>	<b>IBW1</b>	<b>ICW1</b>	<b>IAW2</b>	<b>IBW2</b>	<b>ICW2</b>
I (A-sec)	3,5	3,51	3,51	11,01	11,01	11
Angle (deg)	0	240,09	120,34	210	90,01	329,91
RZS=Y	<b>IOP1</b>	<b>IOP2</b>	<b>IOP3</b>	<b>IRT1</b>	<b>IRT2</b>	<b>IRT3</b>
I (A-sec)	0,25	0,24	0,24	3,61	3,63	3,62

<b>PRUEBA 34</b>	<b>IAW1</b>	<b>IBW1</b>	<b>ICW1</b>	<b>IAW2</b>	<b>IBW2</b>	<b>ICW2</b>
I (A-sec)	3,51	3,49	3,52	8,98	9,02	9,01
Angle (deg)	0	240,19	120,06	209,96	89,83	329,91
RZS=Y	<b>IOP1</b>	<b>IOP2</b>	<b>IOP3</b>	<b>IRT1</b>	<b>IRT2</b>	<b>IRT3</b>
I (A-sec)	0,44	0,43	0,42	3,28	3,28	3,29

<b>PRUEBA 35</b>	<b>IAW1</b>	<b>IBW1</b>	<b>ICW1</b>	<b>IAW2</b>	<b>IBW2</b>	<b>ICW2</b>
I (A-sec)	3,5	3,51	3,5	8,98	9,03	9
Angle (deg)	0	240,11	120,02	210,24	90,05	329,95
RZS=Y	<b>IOP1</b>	<b>IOP2</b>	<b>IOP3</b>	<b>IRT1</b>	<b>IRT2</b>	<b>IRT3</b>
I (A-sec)	0,43	0,43	0,44	3,28	3,28	3,29

<b>PRUEBA 36</b>	<b>IAW1</b>	<b>IBW1</b>	<b>ICW1</b>	<b>IAW2</b>	<b>IBW2</b>	<b>ICW2</b>
I (A-sec)	3,49	3,54	3,52	6,99	7,01	7,02
Angle (deg)	0	240,5	119,77	210,18	90,15	330,2
RZS=Y	<b>IOP1</b>	<b>IOP2</b>	<b>IOP3</b>	<b>IRT1</b>	<b>IRT2</b>	<b>IRT3</b>
I (A-sec)	1,12	1,11	1,13	2,94	2,94	2,95

<b>PRUEBA 37</b>	<b>IAW1</b>	<b>IBW1</b>	<b>ICW1</b>	<b>IAW2</b>	<b>IBW2</b>	<b>ICW2</b>
I (A-sec)	3,49	3,5	3,49	6,98	7,03	7,02
Angle (deg)	0	239,33	119,54	209,61	89,47	329,54
	<b>IOP1</b>	<b>IOP2</b>	<b>IOP3</b>	<b>IRT1</b>	<b>IRT2</b>	<b>IRT3</b>
I (A-sec)	1,12	1,11	1,12	2,94	2,94	2,95

<b>PRUEBA 38</b>	<b>IAW1</b>	<b>IBW1</b>	<b>ICW1</b>	<b>IAW2</b>	<b>IBW2</b>	<b>ICW2</b>
I (A-sec)	3,51	3,52	3,51	4,97	5,03	5,01
Angle (deg)	0	240,16	119,95	210,29	90,13	329,94
RZS=Y	<b>IOP1</b>	<b>IOP2</b>	<b>IOP3</b>	<b>IRT1</b>	<b>IRT2</b>	<b>IRT3</b>
I (A-sec)	1,81	1,81	1,81	2,61	2,61	2,61
Event:	TRP1	Targets:	87	A	B	C

<b>PRUEBA 39</b>	<b>IAW1</b>	<b>IBW1</b>	<b>ICW1</b>	<b>IAW2</b>	<b>IBW2</b>	<b>ICW2</b>
I (A-sec)	3,52	3,53	3,52	4,98	5,02	5
Angle (deg)	0	240,07	119,68	210,02	89,73	329,87
	<b>IOP1</b>	<b>IOP2</b>	<b>IOP3</b>	<b>IRT1</b>	<b>IRT2</b>	<b>IRT3</b>
I (A-sec)	1,82	1,8	1,79	2,6	2,6	2,6
Event:	TRP1	Targets:	87	A	B	C

## Pruebas sesión 4.

Para la cuarta ronda de pruebas la inquietud es la respuesta del relé y de la planilla ante ingresos monofásicos. Se halla simplemente confirmación de los valores entregados por la planilla, mas es una veta que se deja de lado.

<b>PRUEBA 40.1</b>	<b>IAW1</b>	<b>IBW1</b>	<b>ICW1</b>	<b>IAW2</b>	<b>IBW2</b>	<b>ICW2</b>
I (A-sec)	1,01	0	0	0	0	0
Angle (deg)	0	306,67	306,67	271,85	306,67	306,67
	<b>IOP1</b>	<b>IOP2</b>	<b>IOP3</b>	<b>IRT1</b>	<b>IRT2</b>	<b>IRT3</b>
I (A-sec)	1	0,01	0,01	0,51	0	0

<b>PRUEBA 40.2</b>	<b>IAW1</b>	<b>IBW1</b>	<b>ICW1</b>	<b>IAW2</b>	<b>IBW2</b>	<b>ICW2</b>
I (A-sec)	1,02	0	0	0	0	0
Angle (deg)	0	168,12	10,74	92,16	213,12	213,12
RZS=Y	<b>IOP1</b>	<b>IOP2</b>	<b>IOP3</b>	<b>IRT1</b>	<b>IRT2</b>	<b>IRT3</b>
I (A-sec)	0,66	0,32	0,33	0,33	0,16	0,16

<b>PRUEBA 40.3</b>	<b>IAW1</b>	<b>IBW1</b>	<b>ICW1</b>	<b>IAW2</b>	<b>IBW2</b>	<b>ICW2</b>
I (A-sec)	0	0	0	0,98	0	0
Angle (deg)	0	45	45	47,17	225	225
	<b>IOP1</b>	<b>IOP2</b>	<b>IOP3</b>	<b>IRT1</b>	<b>IRT2</b>	<b>IRT3</b>
I (A-sec)	0,2	0,2	0,02	0,1	0,1	0,01

<b>PRUEBA 40.4</b>	<b>IAW1</b>	<b>IBW1</b>	<b>ICW1</b>	<b>IAW2</b>	<b>IBW2</b>	<b>ICW2</b>
I (A-sec)	0	0	0	1,01	0	0
Angle (deg)	0	225	225	236,83	0	0
RZS=Y	<b>IOP1</b>	<b>IOP2</b>	<b>IOP3</b>	<b>IRT1</b>	<b>IRT2</b>	<b>IRT3</b>
I (A-sec)	0,19	0,2	0	0,1	0,1	0

<b>PRUEBA 40.5</b>	<b>IAW1</b>	<b>IBW1</b>	<b>ICW1</b>	<b>IAW2</b>	<b>IBW2</b>	<b>ICW2</b>
I (A-sec)	1	0	0	1,01	0	0
Angle (deg)	0	132,56	42,56	212,58	42,56	42,56
RZS=Y	<b>IOP1</b>	<b>IOP2</b>	<b>IOP3</b>	<b>IRT1</b>	<b>IRT2</b>	<b>IRT3</b>
I (A-sec)	0,83	0,2	0	0,6	0,1	0

<b>PRUEBA 40.6</b>	<b>IAW1</b>	<b>IBW1</b>	<b>ICW1</b>	<b>IAW2</b>	<b>IBW2</b>	<b>ICW2</b>
I (A-sec)	1,01	0	0	0,97	0	0
Angle (deg)	0	36,92	63,48	211,1	36,92	36,92
RZS=Y	<b>IOP1</b>	<b>IOP2</b>	<b>IOP3</b>	<b>IRT1</b>	<b>IRT2</b>	<b>IRT3</b>
I (A-sec)	0,52	0,2	0,34	0,44	0,27	0,17

<b>PRUEBA 40.7</b>	<b>IAW1</b>	<b>IBW1</b>	<b>ICW1</b>	<b>IAW2</b>	<b>IBW2</b>	<b>ICW2</b>
I (A-sec)	0,99	0	0	5,95	0	0
Angle (deg)	0	230,89	346,6	210,11	95,89	95,89
RZS=Y	<b>IOP1</b>	<b>IOP2</b>	<b>IOP3</b>	<b>IRT1</b>	<b>IRT2</b>	<b>IRT3</b>
I (A-sec)	0,6	1,17	0,01	1,08	0,59	0
Event:	TRP1	Targets:	87	B		

<b>PRUEBA 40.8</b>	<b>IAW1</b>	<b>IBW1</b>	<b>ICW1</b>	<b>IAW2</b>	<b>IBW2</b>	<b>ICW2</b>
I (A-sec)	0,99	0	0	7,37	0	0
Angle (deg)	0	137,29	343,86	208,56	2,29	47,29
RZS=Y	<b>IOP1</b>	<b>IOP2</b>	<b>IOP3</b>	<b>IRT1</b>	<b>IRT2</b>	<b>IRT3</b>
I (A-sec)	0,93	1,18	0,32	1,06	0,89	0,16
Event:	TRP1	Targets:	87	B		

<b>PRUEBA 40.9</b>	<b>IAW1</b>	<b>IBW1</b>	<b>ICW1</b>	<b>IAW2</b>	<b>IBW2</b>	<b>ICW2</b>
I (A-sec)	1,34	0	0	1	0	0
Angle (deg)	0	190,92	190,92	209,06	100,92	100,92
RZS=Y	<b>IOP1</b>	<b>IOP2</b>	<b>IOP3</b>	<b>IRT1</b>	<b>IRT2</b>	<b>IRT3</b>
I (A-sec)	1,17	0,2	0,01	0,76	0,1	0
Event:	TRP1	Targets:	87	A		

<b>PRUEBA 40.10</b>	<b>IAW1</b>	<b>IBW1</b>	<b>ICW1</b>	<b>IAW2</b>	<b>IBW2</b>	<b>ICW2</b>
I (A-sec)	1,99	0	0	1	0	0
Angle (deg)	0	232,43	348,99	210,09	232,43	232,43
RZS=Y	<b>IOP1</b>	<b>IOP2</b>	<b>IOP3</b>	<b>IRT1</b>	<b>IRT2</b>	<b>IRT3</b>
I (A-sec)	1,16	0,5	0,66	0,76	0,43	0,33
Event:	TRP1	Targets:	87	A		

<b>PRUEBA 40.11</b>	<b>IAW1</b>	<b>IBW1</b>	<b>ICW1</b>	<b>IAW2</b>	<b>IBW2</b>	<b>ICW2</b>
I (A-sec)	4,22	4,21	4,23	8,44	8,48	8,48
Angle (deg)	0	239,79	119,86	209,88	89,65	329,79
	<b>IOP1</b>	<b>IOP2</b>	<b>IOP3</b>	<b>IRT1</b>	<b>IRT2</b>	<b>IRT3</b>
I (A-sec)	1,33	1,32	1,33	3,54	3,54	3,55
Event:	TRP1	Targets:	87	C		

<b>PRUEBA 40.12</b>	<b>IAW1</b>	<b>IBW1</b>	<b>ICW1</b>	<b>IAW2</b>	<b>IBW2</b>	<b>ICW2</b>
I (A-sec)	4,21	4,21	4,22	8,43	8,47	8,48
Angle (deg)	0	240,25	119,92	209,92	89,86	329,94
	<b>IOP1</b>	<b>IOP2</b>	<b>IOP3</b>	<b>IRT1</b>	<b>IRT2</b>	<b>IRT3</b>
I	1,34	1,33	1,33	3,54	3,54	3,54
Event:	TRP1	Targets:	87	C		

## Anexo B.

### Ajustes adicionales del relé SEL-587.

#### a) Second Harmonic Block Setting (PCT2)

Valor de ajuste: (10)

Las formas de onda de la corriente de inrush de magnetización del transformador contiene significativa cantidad de corriente de segunda armónica. El relé SEL-587 puede medir la cantidad de corriente de segunda armónica por el transformador. Se puede ajustar el relé para bloquear el elemento diferencial de porcentaje-restringido si la relación de corriente de segunda armónica respecto a la corriente fundamental ( $IF2/IF1$ ) es mayor que el ajuste de PCT2.

Simulaciones en transformadores muestran que la corriente de inrush usualmente produce sobre 30% de ( $IF2/IF1$ ) en el primer ciclo del inrush. Un ajuste de 15% provee un margen de seguridad.

#### b) Fifth Harmonic Blocking (PCT5, TH5, TH5D)

Valores de ajuste: (35 ; 0,3 ; 250)

La sobreexcitación es la razón del voltaje a frecuencia (V/Hz) aplicado a los terminales del transformador excede 1,05 en por unidad a plena carga o 1,1 por unidad sin carga. La sobreexcitación del transformador produce armónicas de orden singular, las que pueden aparecer como corriente diferencial en el relé diferencial del transformador.

El bloqueo de quinta armónica es utilizado principalmente en transformadores elevadores de unidades generadoras en plantas generadoras. El voltaje del transformador y frecuencia del generador pueden variar poco durante la partida, sobreexcitando el transformador.

El análisis de Fourier de estas corrientes durante la sobreexcitación indica que un 35% de ajuste de quinta armónica es adecuado para bloquear el elemento diferencial de porcentaje.

A plena carga, un ajuste de TH5 de 0,1 corresponde a 10% de la corriente fundamental.

Un ajuste de retardo, TH5D, previene que el relé indique presencia de corrientes de quinta armónica durante transientes.

#### c) Independent Harmonic Blocking Element (IHBL)

Valor de ajuste: (N)

Cuando un transformador trifásico es energizado, armónicas de inrush están presentes en corrientes de al menos dos (2) fases. En relés monofásicos tradicionales, cada relé desarrolla una comparación de la corriente armónica que circula a través de estas fases.

El relé SEL-587 puede efectuar bloqueo armónico de dos modos:

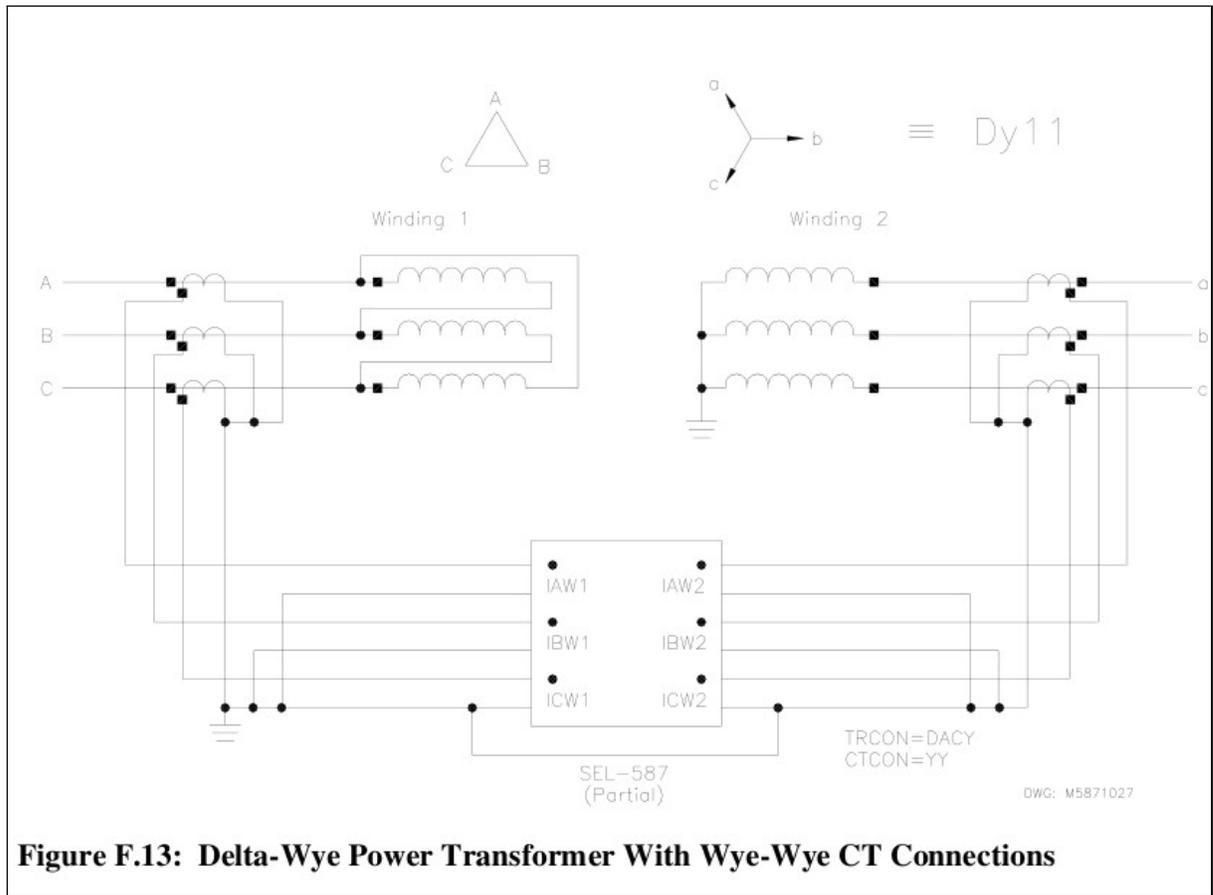
i) Independent Harmonic Blocking (IHBL=Y) bloquea el elemento diferencial de porcentaje para una fase particular, cuando la armónica (segunda o quinta) en esta fase se halla sobre el umbral de bloqueo. Los otros elementos no son bloqueados.

ii) Common Harmonic Blocking (IHBL=N) bloquea todos los elementos si alguna fase

tiene una magnitud armónica sobre el umbral de bloqueo.

Common Harmonic Blocking es el esquema más seguro, pero puede retardar un poco la operación del elemento diferencial, ya que las armónicas en las tres fases deben caer bajo los umbrales.

# Anexo C.



**Figure F.13: Delta-Wye Power Transformer With Wye-Wye CT Connections**