

REPUBLICA DE CUBA
INSTITUTO SUPERIOR MINERO METALÚRGICO Dr. ANTONIO NÚÑEZ JIMÉNEZ
FACULTAD ELECTROMECAÁNICA
DEPARTAMENTO DE ELÉCTRICA

Tesis presentada en opción al Título Académico de Master en
Ingeniería Eléctrica

TITULO: Laboratorio Virtual de Protecciones Eléctricas

Autor: **Ing. Orlys Ernesto Torres Breffe**

Tutor: **Dr. Luis Corrales Barrios.**

Tabla de Contenido

Introducción	1
Análisis Bibliográfico	4
Capítulo 1. Modelación matemática de las Protecciones Eléctricas por Relés	
1.1. Introducción	10
1.2. Relés de Sobrecorriente.....	11
1.3. Relés Direccionales.....	18
1.4. Relés Diferenciales de Corrientes.....	22
1.5. Relés de Distancia.....	26
1.6. Conclusiones.....	32
Capítulo 2. Relés Virtuales en LabView.	
2.1. Introducción.....	34
2.2. Características de LabView 3.1.....	35
2.3. Relés Virtuales.....	44
2.3.1 Relés Direccionales.....	45
2.3.2 Relés de Sobrecorriente.....	51
2.3.3 Relés Diferenciales.....	60
2.3.4 Relés de Distancia.....	63
2.4. Simulador de Fallos.....	66
2.5. Conclusiones.....	69
Capítulo 3. Validación de los Relés Virtuales.	
3.1 Introducción.	72
3.2 Descripción de la Instalación.....	72
3.3 Comprobación del funcionamiento de los Relés Virtuales.	76
3.3.1. Ajustes de los Relés.....	77
3.3.2. Comprobación de la Selectividad y la Sensibilidad.....	80
3.3.3. Comprobación de la Velocidad de Respuesta.....	85
3.4 Conclusiones.....	88
Conclusiones	90
Recomendaciones	93
Bibliografía	94
Anexos	
Anexo 1	101
Anexo 2	106
Anexo 3	126

Síntesis Curricular



Orlys Ernesto Torres Breffe, nació el 8 de octubre de 1972, en Moa municipio de Holguín, Cuba.

Obtuvo título de Oro en Ingeniería Eléctrica en el Instituto Superior Minero Metalúrgico de Moa en Julio de 1995, en el cual comenzó a estudiar en 1990.

Luego de graduado permanece trabajando como docente en el mismo Instituto y en 1999 opta por el grado de Master en Ciencias en la Universidad de Camagüey con la especialidad de Protecciones Eléctricas en Sistemas de Potencia.

Sus principales investigaciones se enmarcan en el análisis y simulación de los fenómenos transitorios ; así como la selección de las protecciones de los Sistemas Eléctricos Industriales, obteniendo resultados concretos en las industrias niqueleras de su territorio.

Agradecimientos

Existe una persona a la cual no podré resarcir todos los esfuerzos que realiza en aras de mi superación y es a la que en primer lugar deseo agradecer; mi esposa Marbelis Ramírez Reyes. Luego, sin ánimos de establecer prioridades, a todas aquellas personas que colaboraron e hicieron posible este resultado.

Resumen

En este trabajo se muestran los detalles de la construcción de un **Laboratorio Virtual** que permita facilitar las operaciones, así como la comprobación del funcionamiento de las Protecciones Eléctricas por Relés. La Herramienta Virtual está compuesta por las variedades más comunes de Dispositivos de Protecciones por Relés y por un Simulador de Perturbaciones. Se describen primeramente las ecuaciones matemáticas que modelan los tipos de Relés más utilizados en la actividad práctica y luego se muestran los detalles de su construcción y diseño.

Como plataforma de programación se utilizó LabView en su versión 3.1 que posee una gran variedad de opciones relacionadas con la adquisición de datos y por tanto permitirá continuar desarrollando este trabajo, permitiendo la conexión de estos relés al mundo real.

Los Relés Virtuales creados son: Relés de Sobrecorriente de tiempo definido y tiempo inverso, incluyendo en este grupo las gamas de Relés de Secuencia Negativa y Cero; Relés Direccionales de Potencia con todas las conexiones conocidas; Relés Diferenciales instantáneos y de porcentaje diferencial, así como los tipos comunes de Relés de Distancia.

El Simulador de Fallos simula los disturbios más conocidos en los Sistemas Eléctricos de Potencia: cortocircuitos trifásicos, bifásicos y monofásicos, los que pueden ser generados con o sin componentes de directa. También brinda la opción de provocar cambios súbitos en las fases de las señales; así como modificar los niveles de tensión. Las señales generadas pueden ser inyectadas con componentes de ruido que simulan los contenidos armónicos de las señales reales con que actúan los relés en la realidad.

Finalmente, se muestran un conjunto de pruebas realizadas a estos Relés Virtuales utilizando el Simulador de Fallos, las cuales permiten validar la exactitud de los algoritmos empleados. Para esto se tomaron los datos reales de los ajustes de las protecciones en la fábrica niquelera Cmdte. Pedro Sotto Alba de MOA y se calcularon diferentes perturbaciones eléctricas en dicha Empresa utilizando el software profesional **Easy Power**. Los diagramas que constituyen las fuentes de programación de estos relés son anexados.

INTRODUCCIÓN

Durante el estudio de las Protecciones Eléctricas por Relés un factor importante es el análisis del comportamiento de los dispositivos de protección frente a condiciones específicas de operación de los Sistemas Eléctricos de Potencia. Para realizar estas comprobaciones (desde el punto de vista docente) se necesitan, entre otras cosas: la presencia de dichos dispositivos en buen estado, una gran variedad de los mismos y una cantidad apreciable por cada tipo en existencia. Además, se necesitan determinados instrumentos especiales para generar o simular los fenómenos transitorios contra los cuales estos dispositivos operan y que los mismos estén en condiciones óptimas de funcionamiento.

Estos instrumentos deben ser rápidos y exactos, así como deben poseer una amplia gama de variación de sus parámetros para poder simular la mayor cantidad de perturbaciones posibles; cualquiera sea su severidad. En ocasiones, durante la realización de ensayos con determinados dispositivos de protección suelen ocurrir averías que provocan desperfectos tanto en los dispositivos de protección, como en los instrumentos destinados a simular las perturbaciones. Estas averías, aunque no es lo común, pueden llegar a ser peligrosas para la seguridad del personal, lo cual obliga a tomar todas las medidas técnicas y de seguridad necesarias para evitar daños tanto personales como al equipamiento.

Las condiciones de operación de muchos de estos dispositivos de protección son severas y muy variadas, debido en primer lugar a los elevados niveles que alcanzan los parámetros eléctricos durante las perturbaciones en los Sistemas Eléctricos de Potencia y en segundo lugar, a la gran cantidad de averías o perturbaciones que se conocen en los mismos. Estas características provocan que los laboratorios físicos potentes para realizar experimentaciones en el campo de las Protecciones Eléctricas sean muy costosos y escasos.

En ocasiones, los estudiosos de estas materias fabrican de forma individual los instrumentos necesarios para realizar sus experimentos; pero muchas veces, la calidad en las mediciones, la precisión y velocidad de los instrumentos no es la más adecuada. Finalmente los costos totales de las instalaciones no dejan de ser elevados.

Por las razones expresadas anteriormente, resulta muy complejo validar o comprobar el funcionamiento de algunas protecciones durante determinados fenómenos transitorios que puedan aparecer en los Sistemas Eléctricos de Potencia, y los ingenieros prescinden de ellas, o las realizan de forma analítica mediante trabajos de cálculos manuales.

Si se construye un **Laboratorio Virtual de Protecciones Eléctricas** compuesto por *Dispositivos de Protección y Generadores de Perturbaciones*, se podrá verificar el comportamiento de las Protecciones de los Sistemas Eléctricos de Potencia: en explotación o en fase de diseño; así como mejorar la calidad del proceso Docente - Educativo en Universidades o Instituciones dedicadas a la enseñanza e investigación de esta materia.

Los medios de este Laboratorio, por su naturaleza **Virtual**, podrán ser multiplicados y no sufrirán desperfectos cualquiera sea la severidad de la simulación ensayada. Tampoco habrá peligro para la seguridad del personal que lo utilice; en el caso de aplicación Docente pueden ser estudiantes poco experimentados.

Para lograr el Laboratorio Virtual el autor se propone los siguientes objetivos:

1. Obtener las expresiones matemáticas que modelen el funcionamiento de las Protecciones Eléctricas por Relés más utilizadas en la actividad práctica.
2. Diseñar y construir los programas que simulen los Relés, y el Simulador de Fallos en el cual estarían insertados los mismos.

Las posibilidades que brinda la simulación en el estudio de las protecciones eléctricas son conocidas y están siendo explotadas desde finales de la segunda mitad de este siglo. Se analizaron varias referencias bibliográficas donde los resultados que validan las protecciones eléctricas propuestas, fueron hechos basados en simuladores digitales (Berdy, 1998^{16,17}). Otros artículos se refieren a las ventajas de los simuladores digitales sobre los analógicos existentes (Alexander⁴). En el *análisis bibliográfico* se expone de forma crítica todas las consideraciones y experiencias obtenidas por anteriores investigadores de esta materia.

El *primer capítulo* está dedicado a la presentación de las expresiones matemáticas utilizadas para modelar las Protecciones Eléctricas por Relés. En algunos casos no son simples expresiones sino todo un algoritmo matemático formado por varias expresiones consecutivas.

El *segundo capítulo* especifica los detalles de programación de los distintos Relés y el Simulador de Fallos incluyendo las fuentes de los programas que se anexan al trabajo. Primeramente en este capítulo se proporciona una breve explicación de las características de LabView como Plataforma de Programación y de sus posibilidades para la simulación de dispositivos protecciones eléctricas.

El *tercer capítulo* muestra los procedimientos y las comprobaciones que validan el correcto funcionamiento de los Relés, utilizando para ello las condiciones reales de la fábrica niquelífera Pedro Sotto Alba de MOA. Antes de dar los detalles de la validación, se brinda un manual de usuario del Laboratorio Virtual con el objetivo de que los experimentos propuestos sean repetidos por cualquier otro investigador interesado.

Análisis Bibliográfico

Los diseños de Relés fueron evolucionando al unísono con el avance o el desarrollo científico técnico. Se conocieron desde principios de siglo, y aún siguen siendo utilizados, relés de inducción, electromecánicos, electromagnéticos, los cuales utilizan para su funcionamiento los resultados de las Teorías del Campo Electromagnético. Con la aparición de los primeros transistores y componentes semiconductores en la década 50, se desarrollaron primeramente relés mixtos y finalmente, relés totalmente electrónicos.

El desarrollo de los primeros chips digitales de propósito específico, motivó un nuevo avance en la construcción de Relés basados en la técnica digital. Estos fueron conocidos como relés digitales, hasta llegar a la explosión tecnológica de los años 70 con la aparición de los primeros relés que utilizaron chips inteligentes.

Existe mucha información sobre el funcionamiento de los relés de sobrecorrientes del tipo inducción y los del tipo electromecánico. Todos los trabajos encontrados hasta la década del 70 se dedican: al diseño y construcción de unidades de temporización, así como las características constructivas generales de los relés de sobrecorriente, sin abordar profundamente la temática de la modelación matemática de su funcionamiento ; el avance tecnológico de esa época no lo imponía.

Para la construcción de relés con características complejas (Relés Direccionales y de Distancia) se ha utilizado hasta estos días una teoría arrastrada desde las primeras variantes electromecánicas. Ellos son conocidos como relés que comparan la magnitud o la fase de alguna combinación de las señales de entrada. De forma general, aunque es cierto que esta teoría resolvió el problema de la construcción de diferentes tipos de relés complejos utilizando para ello un mismo circuito magnético, también incorpora coeficientes y conceptos adicionales para realizar el ajuste práctico de dichos relés, bastante alejados y no relacionados directamente con los ajustes teóricos de los mismos.

Este aspecto ha provocado un cierto divorcio entre los especialistas dedicados a las materias de las protecciones eléctricas, producto a la complejidad en los ajustes prácticos que en ocasiones presentan algunos relés, los cuales son fácilmente ajustados desde el punto de vista teórico.

No es hasta la aparición de los relés de sobrecorriente basados en sistemas a microprocesadores que surge la necesidad de dirigir la atención a la modelación matemática de los relés para poder convertirlos en códigos de programación comprendidos por el microprocesador. Algunos resultados en

este sentido (Altuve, 1986⁷) fueron publicados, y actualmente en muchos de los manuales de usuarios que brindan los fabricantes, aparecen las curvas que aproximan las funciones o características tiempo vs corriente de estos relés de sobrecorriente de tiempo inverso (GE Multilin, 1998^{29..33}).

No es necesario el conocimiento de las características constructivas de dichos relés para comprender su funcionamiento. A menos que se desee construir algún tipo o variante de relé basado en técnicas a microprocesadores, lo importante es conocer la expresión matemática que permite su simulación.

Los aspectos relacionados con la construcción y diseños de relés a microprocesadores es aún una tarea bastante confidencial dado que en muchos casos constituyen informaciones no documentadas por las compañías o fabricantes. Se observan dos variantes importantes en este proceso y las dos relacionadas con los órganos de medición de dichos aparatos (que tareas dedicar al hardware y cual al software). Muchos dispositivos que ejecutan pocas funciones de protección (Kezunovic, 1986⁵¹; Murty, 1990⁶⁵) garantizan el proceso de extracción de las componentes de una señal dada, mediante el hardware. Esto le permitirá ganar en velocidad y utilizar por tanto microprocesadores menos veloces y costosos. Esta variante aumenta los costos dado que el hardware es más costoso que el software.

Una segunda variante surge en la década del 90, debido a la disminución de los precios de las unidades procesadoras inteligentes. Gran parte de las tareas en el proceso de extracción de las componentes de las señales, es tratada mediante software, utilizando para ellos convertidores análogos - digitales más rápidos que muestren las señales sinusoidales varias veces por ciclos. Luego son extraídas, mediante *Procesamiento Matemático*, las componentes necesarias de las muestras correspondiente a la señal medida. Esta variante es muy utilizada en aquellos relés que realizan variadas funciones de protección en un mismo dispositivo (Telemecanique, 1988⁸⁶; GE Multilin, 1998^{29..33}).

Actualmente se estudian modelos matemáticos que permiten obtener el óptimo en un diseño a microprocesadores, dado que permiten identificar que parte de la tarea total debe ser garantizada mediante hardware y cual mediante software.

En la actualidad los fabricantes, primeramente simulan el relé antes de llevar a cabo el proceso de su construcción o en ocasiones los análisis preliminares de su funcionamiento no se realizan en la realidad sino a base de simuladores digitales o analógicos (Berdy^{16,17}). En este avance aún existe escepticismo, dado que el ingeniero debe decidir si utilizar un simulador de procesos transitorios analógico o digital (ALEXANDER⁴). En muchas ocasiones los investigadores mantienen la presencia física del relé pero simulan completamente las condiciones transitorias de operación.

Se han realizados investigaciones sobre el funcionamiento de los relés basado completamente en simuladores digitales pero siempre y cuando la simulación es ejecutada a pocos dispositivos de protección al mismo tiempo y bajo específicas condiciones de operación de los sistemas de potencia. Unos de los aspectos desfavorables de estas simulaciones digitales es la demora excesiva de los programas de simulación para ejecutar o modelar pocos ciclos en una condición específica. En los simuladores analógicos, las pruebas ocurren a tiempo real y las velocidades de los ensayos mayores.

A continuación se tratarán las referencias fundamentales utilizadas en la confección de este trabajo, haciendo un análisis crítico de los conocimientos que en ellas se encontraron:

- **Protective Relaying / N. CHERNOBROVOV. 1974 [20]**

Protección Por Relés De Los Sistemas Eléctricos /A. M. FEDOSEEV. 1984 [28]

Estos autores han estudiado con mucha profundidad los aspectos teóricos relacionados con las protecciones eléctricas. Tratan con claridad los principios de funcionamiento de las funciones de protección y abordan las expresiones matemáticas que se deben utilizar para calcular sus valores de ajuste, analizando minuciosamente los procesos transitorios provocados por los fallos que ellas protegen. Aunque son tratados en detalles los principios de funcionamientos de los Relés de Inducción, los Electromecánicos y algunos Electrónicos, no son tratadas de la misma forma las expresiones matemáticas que permitan simular sus funcionamientos.

- **The Art And Science Of Protective Relaying / C. RUSSELL MASON. 1975 [63]**

Protección De Distancia / V. L. FABRICANT. 1986 [27]

A uno de estos autores se les atribuye la creación del algoritmo de comparación de amplitud y fase utilizando una combinación de las señales de entrada. Este algoritmo permitió la construcción de Relés de Distancias y Direccionales del tipo Electromagnético con un mismo circuito magnético. Es un algoritmo novedoso que cuenta con expresiones matemáticas para su modelación, pero que en dichas expresiones están incluidas constantes que no tienen relación directa con el ajuste teórico de los relés. Estas constantes pueden ser números complejos que varían en dependencia del Relé que se quiera lograr.

- **GE. Multilin (Canada)_ Catálogos. 1998 [29..33]**

En estos catálogos de los Productos de Protección General Electric, se abordan en forma breve la teoría de operación de los Relés que realizan varias funciones de protección (Multifunction Relay).

Los órganos de medición de estos aparatos tienen un gran componente en software, dado que utilizan las muestras de las señales en un ciclo de frecuencia fundamental y luego utilizando el Procesamiento Digital de Señales obtienen los parámetros que necesitan para ejecutar las funciones de protección. En ellos aparecen también, las expresiones matemáticas que permiten modelar las curvas de tiempo vs corriente de los Relés de Sobrecorrientes de las diferentes Normas Internacionales (ANSI, IEC, IAC, GE).

- **Comparative Testing Using Analog Model Power Systems, Digital Model Power Systems And Portable Test Sets. General Electric Publication / (New York), GER - 3678. ALEXANDER G. E., ANDRICHAK J. G. [4]**

Estos autores trabajan la temática de los simuladores para su utilización en el ajuste y comprobación de las Protecciones Eléctricas por Relés. En esencia realizan una comparación entre los simuladores analógicos y digitales, expresando las ventajas de unos frente a otros, en condiciones específicas de investigación.

Muchas veces se obtienen simulaciones más reales utilizando modelos digitales, pero los ensayos se hacen muy lentos comparados con las velocidades de los ensayos en simuladores analógicos, aunque en estos últimos no se pueden incluir los errores introducidos por los transformadores de corriente y de potencial; por tanto, éste trabajo sirve como guía para escoger cual simulador utilizar en cada caso.

- **Application Of Out-Of-Step Blocking And Tripping Relays. General Electric Publication / (New York), GER - 3180. JOHN BERDY. [14]**

Loss Of Excitation For Modern Synchronous Generators. General Electric Publication / (New York), GER - 3183. JOHN BERDY.[16]

Out - Of - Step Protection for Generators. General Electric Publication / (New York), GER - 3179. JOHN BERDY.[17]

Estos artículos extraídos de las publicaciones técnicas de la General Electric constituyen un ejemplo que en la actualidad, para abordar el funcionamiento de algunas protecciones de características complejas se utilizan simuladores digitales. En estos trabajos el simulador utilizado es el EMTP, el cual permite hacer las simulaciones internamente en el software o extrapolar los datos numéricos de los fenómenos transitorios hacia el exterior utilizando para ello tarjetas interfaces. En este último caso los relés no son simulados, su presencia física es indispensable.

Aunque John Berdy utiliza la simulación digital para comprobar o validar la eficacia de algunas Protecciones en específico, no confecciona un sistema integral en forma de Laboratorio para realizar distintas pruebas a otros tipos de relés, sino que utiliza herramientas aisladas para lograr su objetivo.

- **Relés Estáticos de Protecciones de Líneas y Motores Eléctricos / HECTOR ALTUVE FERRER, MARTA BRAVO DE LAS CASAS, EMILIO GONZÁLEZ RODRÍGUEZ _ Santa Clara, Octubre 1986. [7]**

En este trabajo se muestra un estudio de las expresiones matemáticas que pueden utilizarse para modelar las curvas de temporización de los Relés de Sobrecorriente, utilizando para ello técnicas estadísticas y los datos ofrecidos por muchas firmas internacionales que se dedican a la fabricación de los mismos.

Las ecuaciones de tipo hiperbólicas y polinomiales fueron utilizadas para la simulación de las curvas de temporización y como método estadístico de ajuste de curva se utilizó el método de los mínimos cuadrados.

- **Generator Protection With A New Static Negative Sequence Relay. General Electric Publication / (New York), GER - 3181. GRAHAM D. J., BROWN P. G. WINCHESTER R. L. [38]**

En esta referencia se aborda un estudio de los fenómenos térmicos que tienen lugar en las Máquinas Eléctricas Rotatorias y se muestra una metodología utilizando las corrientes de secuencia negativa para la protección contra fallas asimétricas que es el fenómeno externo que mayor calentamiento puede provocar en los rotores de dichas máquinas.

Se extrajeron también las expresiones matemáticas que permite modelar la curva de temporización de las protecciones utilizadas para estos fines, que es diferente a las utilizadas en los Relés de Sobrecorriente clásicos porque están relacionadas directamente con el fenómeno del calentamiento excesivo de los rotores de dichas máquinas.

- **A New Type Of Differential Feeder Protection Relay. Using The Global Positioning System For Data Synchronization. IEEE Transaction on Power Delivery, 12(3). July 1997. LI H. Y., SOUTHERN E. P., CROSSLEY P. A. [56]**

Estos autores pretenden comprobar la eficacia de un nuevo tipo de Protección Diferencial, para líneas de transmisión de energía, utilizando simuladores digitales. Simulan los transformadores de corriente con y sin saturación, y obtienen las expresiones que permiten modelar los Relés de Porcentaje Diferencial. Este trabajo constituye una prueba más de que los modelos o simuladores digitales se pueden utilizar eficazmente en la comprobación de las características de operación de las protecciones eléctricas.

CAPÍTULO I. Modelación Matemática de las Protecciones Eléctricas por Relés

1.1. Introducción

Cuando se piensa simular utilizando **Computadoras Digitales** cualquier objeto de la realidad, una de las primeras tareas es realizar la modelación matemática de dicho objeto. El avance de la ciencia, en particular la física y la matemática, ha permitido representar en ecuaciones o expresiones el funcionamiento de los diferentes objetos que existen en el mundo real.

En este campo, la **Electricidad**, es una de las ciencias que goza de mayores privilegios, dado que casi todos los fenómenos que de ella se derivan han sido estudiados y modelados de una manera u otra mediante expresiones matemáticas. Se conocen muchos programas y modelaciones realizadas sobre máquinas eléctricas: motores, transformadores y generadores eléctricos (Berdy^{14,16,17}); las líneas de transmisión (Li, 1997⁵⁶), las redes de los sistemas eléctricos (Lund, 1987⁵⁸), etc.

La especialidad de **Protecciones Eléctricas** no ha escapado a este avance, y se conocen trabajos de modelaciones de Relés desde principio de siglo. Las expresiones que modelan los relés comúnmente utilizados en la práctica, ha sido una tarea desarrollada por los investigadores de las materias de Protecciones Eléctricas durante años, y hasta hoy, no se han agotado los avances en este sentido. En la actualidad es común encontrarse con modelos de relés operando en determinadas condiciones de fallos o regímenes de operación.

Los fabricantes de relés, muchas veces envían junto con los manuales de instrucción (GE Multilin, 1998^{29..34}); las expresiones que modelan el funcionamiento de los mismos, principalmente para los Relés de Sobrecorriente. Los otros de características complejas como los Relés de Distancia, también han sido modelados, pero en ocasiones las expresiones utilizadas lejos de esclarecer el funcionamiento de los mismos, oscurecen la comprensión con nuevos conceptos y parámetros.

Muchos de los trabajos encontrados en las referencias tratan la modelación de los Relés de Distancia (Berdy^{14,16,17}), modelando también las operaciones de los Sistemas Eléctricos de Potencia bajo ciertas condiciones como son : la pérdida de sincronismo, cortocircuitos alejados de las máquinas generadoras, pérdidas de excitación, etc., utilizando simuladores digitales tales como el EMTP (Kezunovie, 1994⁵⁰; Alexander⁴).

En este capítulo se mostrarán las expresiones matemáticas y los algoritmos que modelan el funcionamiento de las Protecciones por Relés más utilizadas en la actividad práctica, incluyendo las

clases de Relés de Sobrecorriente, Relés Direccionales, Relés Diferenciales y los Relés de Distancia. En ocasiones no son simples expresiones, sino todo un procedimiento de cálculo que incluye varias ecuaciones matemáticas. *Se trató, que estos modelos no introdujeran nuevos parámetros que no sean los que por naturaleza o necesidad se utilicen en el ajuste teórico de dichos relés.*

Antes de presentar las ecuaciones matemáticas y/o algoritmos que se utilizaron para modelar los relés, se explicarán de forma muy breve, los principios de funcionamiento de los mismos, sus conexiones, características de temporización, etc.; con el objetivo de que el lector de poca experiencia en este campo pueda introducirse sin muchos problemas. También se señalarán, constantemente, las referencias que se deben utilizar para alcanzar mayor profundidad en una materia dada.

1.2. Relés de Sobrecorriente

Los Relés de Sobrecorriente son una de las primeras funciones de protecciones que existieron, algunos dispositivos más antiguos que no son relés; tales como : fusibles, interruptores automáticos, etc., se comportan de manera similar.

Estos relés se comportan de la manera siguiente: cuando la corriente en la fase que se está protegiendo o la corriente que está midiendo el relé, supera el valor establecido o ajustado en él, operará pasado un tiempo que depende de la forma de temporización que posea dicho relé. Existen dos variantes de relés en cuanto a su temporización se refiere: los de Tiempo Definido y los de Tiempo Inverso (Beeman, 1969⁴⁴).

Los relés de Tiempo Definido son aquellos en los que el tiempo de acción del relé es ajustado por el usuario y no depende en que magnitud la corriente medida supera el valor establecido o ajustado en él. A éstos se le puede denominar **Relés de Sobrecorriente de Tiempo Independiente**.

Los relés de Tiempo Inverso son aquellos en que el tiempo de acción del relé si depende en cuantas veces el nivel de la corriente medida supera el valor ajustado en él. Estos pueden ser denominados **Relés de Sobrecorriente de Tiempo Dependiente**.

Convertir la corriente de entrada en una magnitud en por unidad (p.u) es una de las primeras expresiones que se utilizan y tiene la forma:

$$I = \frac{I_m}{I_{aj}} \text{ (p.u)} \quad (1.0)$$

donde:

Iaj: Corriente de ajuste establecida en el relé.

Im: Corriente que el relé está midiendo.

I Corriente en valores por unidad tomando como base el ajuste Iaj.

El resultado de esta ecuación será superior a la unidad, siempre y cuando la corriente medida supere el valor ajustado en el relé. El valor resultante de la expresión está expresado en por unidad (p.u) con respecto al valor ajustado en el relé que será tomado como base. El tiempo de acción del relé dependerá en cuantas veces la magnitud (I) supera la unidad.

En los Relés de Sobrecorriente de Tiempo Dependiente la relación entre el tiempo y la corriente tiene forma inversa; es decir, cuando aumenta la corriente el tiempo disminuye, y cuando disminuye la corriente el tiempo aumenta hasta llegar a infinito, lo que significa, que a ese nivel de corriente el relé nunca operará, ver figura 1 en el anexo 1.

Muchas veces la información que se posee de la relación entre el tiempo y la corriente (característica tiempo vs corriente) de un relé, es una lista de números de la forma mostrada en la tabla 1.2.0.

Tabla 1.2.0. Datos obtenidos de la curva tiempo vs corriente en un Relé de Sobrecorriente de la compañía General Electric.

Corriente (p.u)	Tiempo de acción del relé (segundos)
1.1	416.68
1.2	198.86
1.3	126.80
1.4	91.14
1.5	69.99
---	---
---	---
7	1.82
7.5	1.58
8	1.39
10	1.39
15	1.39

Esto sucede cuando el relé actúa o se comporta de esa única manera. En la actualidad los relés poseen muchas variantes de curvas de tiempo inverso, las que definen el grado de inversión de la característica (GE,1998^{29,34}). Se conocen las características : **Extremadamente Inversa, Muy Inversa,**

Moderadamente Inversa, Inversa y Poco Inversa o de Tiempo Corto. Esta definición es dada por el fabricante y varía entre uno y otro, aunque las anteriores son las más utilizadas a nivel mundial.

Otro parámetro, además del valor de ajuste de corriente y el tipo de curva, que se utiliza para ajustar el relé, es el Múltiplo; también conocido como palanca de tiempo en los relés electromecánicos antiguos. Este parámetro desplaza la curva hacia arriba; es decir, para un mismo valor de corriente, un múltiplo mayor al que se utiliza actualmente de ajuste en el relé, producirá un mayor tiempo de demora. Este valor en muchos casos es una constante, pero existen protecciones o relés que inciden en este parámetro para lograr dependencias del tiempo, no sólo con respecto a la corriente, sino también con respecto a la tensión (Beeman, 1969⁴⁴). Estos relés son conocidos como relés de sobrecorriente dependientes de tensión (51V en la numeración ANSI).

Estas características de tiempo vs corriente aparentan tener la forma de una exponencial decreciente, pero los estudios realizados (Altuve, 1986⁷), han demostrado que se pueden aproximar a curvas de tipo parabólicas, hiperbólicas y polinomiales, de la forma:

$$t = \frac{B}{I^A} \quad (1.1)$$

$$t = \frac{B}{I^A - 1} \quad (1.2)$$

$$t = \frac{B}{(I - A)} \quad (1.3)$$

$$t = A_0 + \frac{A_1}{(I-1)} + \frac{A_2}{(I-1)^2} + \dots + \frac{A_n}{(I-1)^n} \quad (1.4)$$

$$\ln(t) = A_0 + \frac{A_1}{\ln(I)} + \frac{A_2}{\ln(I)^2} + \dots + \frac{A_n}{\ln(I)^n} \quad (1.5)$$

Las Normas Internacionales establecen la forma de las características con que se fabrican algunos relés y a continuación se muestran las expresiones utilizadas en este trabajo (GE, 1997³⁴):

Norma ANSI

$$t = M \left(A + \frac{B}{(I-C)} + \frac{D}{(I-C)^2} + \frac{E}{(I-C)^3} \right) \quad (1.6)$$

donde :

- t : Tiempo entre la detección de la sobrecorriente y la actuación final del relé (demora de tiempo).
- M : Múltiplo de la función. Factor que desplaza la curva en dirección vertical.
- I : Corriente (p.u) tomando como base la corriente ajustada en el relé.

A,B,C,D,E : Valores constantes que dependen del grado de inversión que se esté utilizando y son tabulados seguidamente en la tabla 1.2.1.

Tabla 1.2.1. Coeficientes constantes que forman parte de la expresión de (t vs I) según ANSI.

Tipo de curva	A	B	C	D	E
Extremadamente Inversa	0,0399	0,2294	0,3	3,0094	0,7222
Muy Inversa	0,0615	0,7989	0,34	-0,2840	4,0505
Normalmente Inversa	0,0274	2,2614	0,3	-4,1899	9,1272
Moderadamente Inversa	0,1735	0,6791	0,8	-0,08	0,1271

Norma IEC

$$t = M \left(\frac{K}{I^E - 1} \right) \quad (1.7)$$

donde :

t : Tiempo entre la detección de la sobrecorriente y la actuación final del relé.

M : Múltiplo.

I : Corriente medida en p.u

K,E : Valores constantes que dependen del grado de inversión de la curva y se tabularán a continuación en la tabla 1.2.2.

Tabla 1.2.2. Coeficientes constantes que forman parte de la característica (t vs I) según IEC.

IEC (BS) Curva	K	E
IEC Curva A (BS142)	0,14	0,02
IEC Curva A (BS142)	13,5	1
IEC Curva A (BS142)	80,0	2
Poco Inversa	0,05	0,04

Norma IAC

$$t = M \left(A + \frac{B}{(I-C)} + \frac{D}{(I-C)^2} + \frac{E}{(I-C)^3} \right) \quad (1.8)$$

donde :

t : Tiempo entre la detección de la sobrecorriente y la actuación final del relé.

M : Múltiplo.

I : Corriente (p.u) tomando como base la corriente ajustada en el relé.

A,B,C,D,E : Valores constantes que dependen del grado de inversión que se esté utilizando y son tabulados seguidamente en la tabla 1.2.3.

Tabla 1.2.3. Coeficientes constantes que forman parte de la característica (t vs I) según IAC.

Tipo de curva	A	B	C	D	E
Extremadamente Inversa	0,004	0,6379	0,6200	1,7872	0,2461
Muy Inversa	0,09	0,7955	0,1	-1,2885	7,9586
Inversa	0,2078	0,8630	0,8	-0,418	0,1947
Corto Tiempo	0,0428	0,0609	0,62	-0,001	0,0221

Norma GE (para motores)

$$t = M \left(\frac{2,2116623}{0,025303373(I-1)^2 + 0,050547581(I-1)} \right) \quad (1.9)$$

donde :

t : Tiempo entre la detección de la sobrecorriente y la actuación final del relé.

M : Múltiplo.

I : Corriente medida en p.u.

En este último caso, la curva tiene un solo grado de inversión, y su nombre no fue definido por el autor de la publicación. Solo mediante el múltiplo y el ajuste de la corriente se puede influir sobre ella.

En las figuras 1,2,3,4 del anexo 1 se muestran estas dependencias en forma de gráficos las cuales fueron construidas con múltiplo igual a la unidad. En muchas ocasiones, estos gráficos son de mucha utilidad a la hora de realizar la coordinación entre protecciones.

Hasta ahora se han tratado las funciones de los Relés de Sobrecorriente, sin tomar en cuenta los detalles de las magnitudes que están midiendo; es decir, sus órganos de medición. Esto para la modelación es solamente importante con el objeto de saber que magnitud se debe analizar cuando se va a hacer el ajuste. Por ejemplo, la mayoría de los Relés de Sobrecorriente utilizan o extraen de la señal de entrada, el valor eficaz (la raíz media cuadrática) y con ella realizan todo el proceso que se ha explicado anteriormente. Otros operan con el valor eficaz, pero sólo del armónico fundamental de la señal de entrada, ver teoría de operación en GE Multilin (1998²⁹).

Muchos relés utilizan las señales de corriente de las tres fases y son conocidos como trifásicos. En ocasiones estos Relés Trifásicos no son más que un conjunto de tres Relés Monofásicos conectado a cada una de las fases, pero otras veces no es así.

Existen otros relés que entran en la categoría de trifásicos, y son aquellos que extraen las componentes de secuencia de las señales trifásicas que miden y realizan el proceso anteriormente explicado con el valor eficaz de la misma. En estos casos se encuentran los Relés de Secuencia Positiva, Negativa y Cero. Estos también se caracterizan según el tiempo de disparo en: Relés de Tiempo Definido y Tiempo Inverso.

Las expresiones que modelan las características de tiempo vs corriente en estos relés generalmente son las mismas que se mostraron anteriormente, pero antes de comparar la magnitud de corriente con la corriente ajustada en el relé (conversión en p.u), se deben extraer las componentes de secuencia (Stevenson,1986⁸⁴; Pelaez,1986⁷¹) de la forma siguiente:

$$I_{a_0} = \frac{1}{3}(I_a + I_b + I_c) \quad (1.10)$$

$$I_{a_1} = \frac{1}{3}(I_a + aI_b + a^2I_c) \quad (1.11)$$

$$I_{a_2} = \frac{1}{3}(I_a + a^2I_b + aI_c) \quad (1.12)$$

$$a = 1e^{j120^\circ} \quad (1.13)$$

$$a^2 = 1e^{j240^\circ} \quad (1.14)$$

Existen algunas diferencias, en cuanto a las características de temporización (tiempo vs corriente), de los relés de secuencia negativa utilizados para proteger las máquinas rotatorias y las expresadas hasta ahora; y tienen que ver con la función de protección que realizan.

Las componentes de secuencia negativa producidas por cualquier cortocircuito o sobrecorriente de carácter asimétrico, cuando aparecen en el rotor de la máquina, producen un calentamiento excesivo que puede, en caso de que no se desconecte la máquina, causar grandes daños en el aislamiento de ésta, hasta quemar los arrollamientos por completo. Esta particularidad del fenómeno de calentamiento de las máquinas, provoca que las características tiempo vs corriente en estos relés, dependan del tipo de máquina que se está protegiendo.

La expresión general que modela esta característica (Chernobrovov,1974²⁰; Fedoseev,1984²⁸) es la siguiente:

$$t = \frac{k}{I^2} \quad (1.15)$$

donde:

I: Valor eficaz de la componente de secuencia negativa expresado en valores p.u, tomando como base la componente de secuencia positiva ($I = \frac{I_2}{I_1}$).

k : Factor constante que incluye la dependencia del tipo de máquina que se está protegiendo, ver la tabla 1.2.4.

t : Tiempo entre la detección del fallo y la actuación del relé (demora de tiempo).

Tabla 1.2.4. Relación de los factores (k) en dependencia del tipo de máquina rotatoria.

Valor del factor k	Tipo de Máquina Rotatoria
40	Generadores de polos salientes
30	Condensadores sincrónicos
30	Generadores de rotor cilíndrico con enfriamiento indirecto
10	Generadores de rotor cilíndrico con enfriamiento directo

Este factor (k) será un valor de ajuste del relé y se debe escoger atendiendo al tipo de máquina que se protege según la tabla 1.2.4. Estos datos son valores promedios escogidos partiendo de simulaciones hechas a diferentes tipos de máquina rotatorias durante la ocurrencia de perturbaciones de carácter asimétrico en el estator (Graham³⁸), y otras muchas pruebas efectuadas a escala de laboratorio.

El tiempo de disparo del interruptor debido a la actuación de la protección debe ser menor que el tiempo máximo, límite, que pueda permanecer la máquina en funcionamiento durante la presencia de esta corriente de secuencia negativa y este por su parte depende del proceso de disipación del calor en el rotor de dicha máquina.

En la figura 1.2.0 se representa un diagrama en bloques que muestra el algoritmo general a seguir para simular los Relés de Sobrecorrientes de acuerdo al conjunto de expresiones que se han mostrado anteriormente (1.0...1.15).

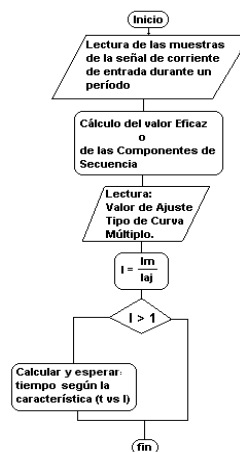


Figura 1.2.0. Diagrama en bloques utilizado para modelar los Relés de Sobrecorriente.

Primeramente se leen y almacenan las muestras que se extraen durante un período de las señales de corriente de entrada, luego se calcula el valor eficaz (en caso de los Relés de Sobrecorriente normales) o el valor eficaz de las Componentes de Secuencia (en casos de Relés de Secuencia; 1.10...1.14).

Seguidamente se leen los parámetros de ajuste del relé tales como : **Tipo de curva, Ajuste de corriente, Múltiplo**, etc. ; se calcula o se convierte el valor eficaz (RMS) la corriente de entrada en un valor por unidad (1.0) y en caso de que esta corriente supere la unidad, se evalúan las expresiones (1.6), (1.7),(1.8), (1.9) o (1.15) en dependencia de la norma con que se va a trabajar.

1.3. Relés Direccionales

Los Relés Direccionales surgen de la necesidad de tomar en cuenta, además de las magnitudes de las corrientes durante las perturbaciones, la dirección relativa de ésta con un cierto punto del circuito. Por ejemplo, se tiene un interruptor que está situado en una línea de transmisión que separa dos Sistemas de Potencia independientes, y se necesita conocer cual es el aporte de cada uno de los sistemas a un fallo en dicha línea o permitir que las protecciones actúen, sólo, cuando la corriente proveniente de uno de los sistemas supera un valor establecido; y no permitir el disparo si la sobrecorriente es aportada por el otro sistema (Chernobrovov,1974²⁰...[et al]). La coordinación de las protecciones en Sistemas Multimáquinas o en redes multilaterales son la causa fundamental de la aparición de estos relés.

Para medir la dirección en que se mueve un objeto, siempre hay que tomar un punto de referencia que no varíe su posición durante el fenómeno que está sucediendo, y compararlo con la posición del objeto del cual se quiere conocer la dirección. En estos casos, durante la ocurrencia de cortocircuitos en redes de transmisión de la energía eléctrica, uno de los parámetros que no varía su posición es la tensión de un punto cualquiera de la citada red y el elemento al que se le medirá la dirección es la corriente, que si depende del punto de ocurrencia del fallo.

Tomando en cuenta lo antes dicho, fueron fabricados relés que funcionaban utilizando la siguiente expresión:

$$P = U_r I_r \cos (\varphi_{\max} - \varphi_r) \quad (1.16)$$

donde:

φ_r Angulo de desfase entre las señales de tensión y corriente que mide el relé.

φ_{\max} Angulo que establece la sensibilidad máxima del relé.

U_r Valor eficaz de la tensión de entrada al relé.

I_r Valor eficaz de la corriente de entrada al relé.

P Potencia activa resultante de la expresión.

Estos relés son conocidos como Relés Direccionales de Potencia y operan si la potencia resultante es mayor que una pequeña magnitud positiva que generalmente es intrínseca al relé (aspectos constructivos). La magnitud P será mayor a medida que φ_r se acerque al valor de φ_{\max} ; por tanto, el relé operará en estos casos. Para más detalles del funcionamiento de estos relés se puede estudiar a Fedoseev (1984²⁸), Altuve (1990⁸) y otros.

El Relé Direccional Ideal es aquel que no depende de los valores eficaces de la tensión y la corriente, sino sólo de sus ángulos de desfases. Esto casi nunca se puede lograr y es por ello que algunos relés, principalmente los modernos, utilizan un sistema de memorias (Engelhardt,1982²⁴). Cuando ocurre un fallo que ha provocado un descenso de la tensión a niveles muy bajos, los relés (los modernos principalmente) comienzan a operar con la tensión que existía en unos instantes antes de la aparición de dicho fallo, que fue memorizado para este fin. Esto provoca que la operación del relé dependa del estado del flujo de potencia antes de la aparición del cortocircuito. Andrichak¹², tratando los fundamentos de la operación de los relés de distancia, aborda este fenómeno de dependencia. Por otro lado, cuando los niveles de corriente son muy altos durante un cortocircuito fuera de la zona de protección, los relés pueden operar incorrectamente y a este fenómeno se le llama “Marcha indeseada” (Fedoseev,1984²⁸)

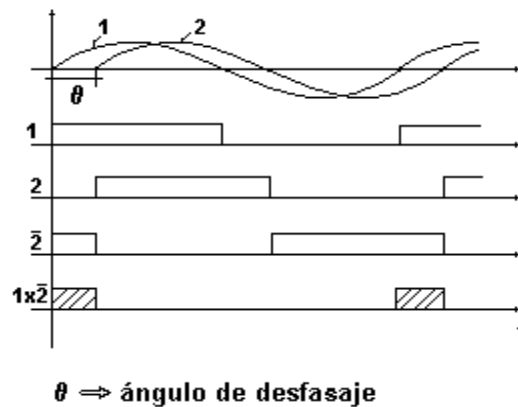


Figura 1.3.0. Proceso o algoritmo utilizado para modelar los Relés Direccionales:

En la figura 1.3.0 se muestra el algoritmo propuesto para la operación de un relé direccional que funciona comparando solamente el ángulo de desfase entre las magnitudes que está midiendo, sin tener en cuenta los valores eficaces (raíz media cuadrática) de las señales de Tensión y Corriente que llegan a sus bornes de entrada.

Algoritmo para la detección del desfase entre dos señales cualesquiera:

1. Convertir las señales sinusoidales en señales cuadradas de amplitud igual a la unidad. Esto se realiza sustituyendo todas las magnitudes positivas por el valor (1) y las negativas por el valor (0).
2. Negar la segunda señal (señal de corriente) intercambiando los valores, los que sean (1) se hacen (0) y viceversa.
3. Multiplicar la señal obtenida con la primera señal cuadrada (señal de tensión).
4. La función resultante es también una señal cuadrada de amplitud la unidad y la suma de cada intervalo de la señal resultante será proporcional al desfase dado entre las dos señales.

La proporcionalidad depende de la resolución con que se mida la señal sinusoidal; es decir la cantidad de muestras (máxima) por ciclo que se está utilizando para medir. En este trabajo el mínimo desfase que se puede medir es 1° y esto es debido a que el número máximo de muestras por ciclos de la señal después de filtrada, es 360.

El método explicado hasta ahora funciona correctamente mientras el ángulo de desfase está entre 0° y 180° . Si el ángulo sobrepasa los 180° , entonces el resultado comienza a disminuir a medida que se aleja de este valor, hasta llegar a 0° nuevamente en los 360° . Para un ángulo de 190° , el resultado será 170° , para 270° el resultado será 90° , y para 360° será 0° . Como se observa en este método, los ángulos superiores a 180° son devueltos como si fueran ángulos de valores negativos.

La tarea ahora es detectar cuando el ángulo es negativo y cuando es positivo. En la figura 1.3.0 se muestra dos señales desfasadas una de otra a un ángulo cualquiera, inferior a 180° y en ella se observa que cuando las señales cuadradas: la primera (señal de tensión) y la negada de la segunda (señal negada de corriente) ejecutan al mismo tiempo una subida (flanco de subida), el resultado es un ángulo positivo.

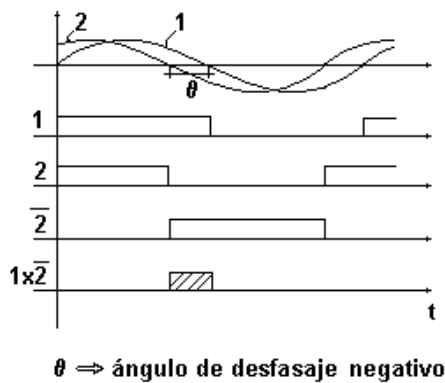


Figura 1.3.1. Señales desfasadas a un ángulo superior de 180° .

Se puede demostrar de forma gráfica, ver figura 1.3.1, que cuando la condición anterior no se cumpla, el resultado será expresado como un valor negativo y por tanto es un ángulo que supera los 180° eléctricos.

De forma general, el proceso de detección o extracción del ángulo del desfase entre dos señales, consiste en aplicar los 4 pasos del algoritmo propuesto y luego descubrir el signo de la forma que se explicó anteriormente.

Detectar el ángulo de desfase entre la tensión (señal fija) y la corriente (señal variable) no es la única tarea que realiza el Relé Direccional, sino que constituye una tarea intermedia. Luego de detectado el desfase, se resta éste al ángulo de máxima sensibilidad que fue ajustado en el relé y se verifica que está en un rango de -90° a 90° ; la función COSENO siempre devuelve un valor positivo cuando se evalúa en ese rango. Si está en el rango mencionado se puede decir que el fallo está en la zona, permitiéndose la actuación los Relés de Sobrecorriente explicados en 1.2.

Estos relés por lo general no se conectan a tensiones y corrientes de fases ; por lo general, se conectan a ciertas combinaciones de las señales fásicas. La conexión es libre para el usuario conociéndose las denominadas 90° , 60° y 30° ; que es el ángulo formado entre la tensión y la corriente que mide el relé suponiendo que el $\text{Cos}\phi$ es igual a la unidad.

Se diseñó un Relé Direccional Trifásico conectado en 90° ; que está compuesto por 3 relés monofásicos que funcionan de manera independiente. La conexión 90° es aquella que utiliza las siguientes señales: $U_{bc} - I_a$, $U_{ca} - I_b$, $U_{ab} - I_c$ (Altuve, 1990⁸...[et al]). Fueron diseñados también los Relés Direccionales Monofásicos genéricos que funcionan independientemente de la conexión. Con la combinación de 3 de éstos, se pueden realizar otros Relés Direccionales Trifásicos conectados en 60° o 30° .

Se conocen otros Relés Direccionales que no utilizan la tensión como valor fijo o de referencia para medir el desfasaje angular, como es el caso de los Relés Direccionales de Secuencia. En estos relés se compara el desfasaje que existe entre la corriente de secuencia cero de un ramal cualquiera del circuito (que varía su dirección en dependencia del lugar del cortocircuito) y una corriente que no varíe su posición durante el fallo monofásico a tierra. Por lo general es tomada como señal de referencia la corriente del neutro del transformador que se utiliza para alimentar o suministrar energía al circuito de potencia protegido (Fedoseev, 1984²⁸). Estos relés utilizan, como se ha explicado, dos señales de corriente y una de ellas es llamada corriente de Polarización o de referencia (Andrichak¹¹).

Cualquiera que sea la señal que se tome como señal de Polarización: tensión o corriente, el proceso inicial es la detección o extracción del ángulo de desfase y se puede realizar como se ha explicado al principio de éste epígrafe. En el caso de los Relé Direccionales de Potencia de fase, el rango de este ángulo medido debe estar a -90° o $+90^\circ$ del ángulo de sensibilidad máxima que se ajusta en el relé.

En caso de los Relés Direccionales de Secuencia Cero el ángulo medido puede estar en 0° (el fallo está en la zona de protección) o 180° (el fallo está fuera de la zona). Por tanto, como 0° y 180° son valores fijos, para la operación de este relé no se incluye ningún valor de ajuste (GE Multilin,1997³³).

En los Relés Direccionales de Potencia diseñados en este trabajo, las señales que llegan a sus bornes provienen de un filtro que solo permite el paso de la componente de armónico fundamental, eliminando por tanto todas las restantes componentes armónicas. Cuando la señal de entrada esté muy afectada o acompañada de grandes oscilaciones (ruidos), se notarán pequeñas variaciones en el valor angular detectado, lo cual es producido por este mismo hecho. El filtro también se encarga de aumentar el número de muestras por ciclos de las señales de entrada, de 36 a 360.

1.4. Relés Diferenciales de Corriente.

Los Relés Diferenciales de Corriente aparecieron por la necesidad de obtener una operación más sensible que la que proporcionan los Relés de Sobrecorriente contra fallos de bajas magnitudes. Su funcionamiento, como su nombre lo indica, se basa en la diferencia de las señales de corriente en los dos extremos del equipo que se va a proteger.

Existen varios tipos de Relés Diferenciales y los más divulgados son: Instantáneos, con Transformadores Saturables y de Porcentaje Diferencial. En la actualidad son mayormente utilizados los de Porcentaje Diferencial por su inmunidad casi absoluta hacia los cortocircuitos exteriores.

En este trabajo se modelaron los Relés Diferenciales Instantáneos y los Relés Diferenciales de Porcentaje Diferencial. El primer grupo de Relé es aún muy utilizado en la protección de motores potentes dado que la magnitud de los cortocircuitos exteriores en estos casos no es elevada; por tanto, los errores de los transformadores de corriente tampoco.

El Relé de tipo instantáneo opera de forma sencilla. Cuando la corriente de operación (I_{op}) supera el valor ajustado en el relé (I_{aj}), el relé accionará de manera instantánea o esperará un tiempo establecido por el operador. Esto último se ha hecho común en los dispositivos modernos de protección.

$$I_{op} = \text{Valor Eficaz}(i_1 - i_2) \tag{1.17}$$

$$I_{op} \geq I_{aj} \tag{1.18}$$

Durante un fallo o un régimen de sobrecorriente exterior, estas magnitudes tienen el mismo valor eficaz y el mismo desfase; por tanto, I_{op} tiende a ser 0. En la realidad I_{op} no llega a ser 0 producto a los errores en las mediciones de los transformadores de corriente. Cuando estamos en presencia de un cortocircuito interno, las corrientes cambian sus valores en dependencia de las fuentes que aporten a los cortocircuitos por los diferentes extremos y en estos casos la magnitud I_{op} se eleva y el relé operará (Chernobrovov, 1974²⁰; Fedoseev, 1984²⁸; Altuve, 1990⁸).

En este trabajo las corrientes de ambos extremos del equipo que se protege son filtradas, eliminando las componentes de todos los armónicos menos las componentes del armónico fundamental. Esto permite disminuir los errores debido a la saturación de los transformadores de corrientes.

Durante la ocurrencia de fallos externos elevados, en los brazos de los Relés Diferenciales aparecen corrientes también elevadas y debido a esto, se producen errores en los transformadores de corrientes (saturaciones) que provocan las falsas operaciones de los mismos. Si se pudiera elevar el valor ajustado en el relé (I_{aj}) durante cortocircuitos exteriores y disminuirlo durante la presencia de fallos internos, se mejoraría la selectividad del relé en estos casos.

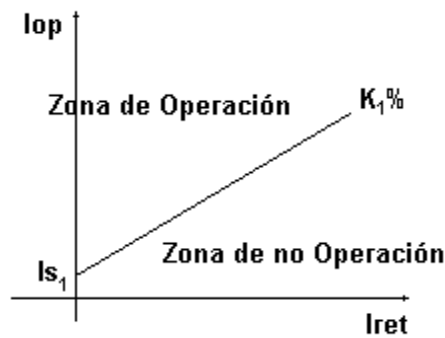


Figura 1.4.0. Relación entre la corriente de operación y la corriente de retención del Relé Diferencial de Porcentaje

Los Relés de Porcentaje Diferencial aparecieron como necesidad de evitar las falsas operaciones de los de tipo instantáneo hacia los fallos externos de elevada magnitud. Estos relés aprovechan las diferencia existente entre las magnitudes de las corrientes en los brazos de la protección durante los fallos externos e internos, tomándolas como referencia para modificar el valor de ajuste del relé.

En estos relés, la corriente de operación no tienen que ser superiores a un valor constante ajustado por el operador; sino que dicho valor de ajuste dependerá ahora de las magnitudes de las corrientes en los

brazos del relé (i_1, i_2). Cuando aumenta el valor medio de las corrientes en los brazos del relé (corriente de retención I_{ret}), aumentará proporcionalmente el valor de ajuste del relé y viceversa. Esta relación se muestra en la figura 1.4.0.

En los Relés de Porcentaje Diferencial de una sola rampa (Li,1997⁵⁶), se cumple que :

$$I_{op} = \text{Valor Eficaz}(i_1 - i_2) \tag{1.19}$$

$$I_{ret} = \text{Valor Eficaz}\left(\frac{i_1 + i_2}{2}\right) \tag{1.20}$$

$$I_{aj} = K_1 I_{ret} + I_{s1} \tag{1.21}$$

$$I_{op} \geq I_{aj} \tag{1.22}$$

donde :

I_{ret} : Valor promedio de las corrientes en los brazos del relé (corriente de retención).

K_1 : Coeficiente de proporcionalidad que establece cuantas veces crecerá el valor de ajuste del relé con relación a I_{ret} . Es un valor constante que fungirá como un nuevo ajuste en el relé y generalmente se establece en %, del cual se deriva el nombre del relé.

I_{s1} : Valor que define el nivel mínimo que debe tener la corriente de operación para que provoque la actuación del relé en caso de que la (I_{ret}) sea igual a 0. Este valor se deberá ajustar los más pequeño posible.

I_{aj} : (Corriente abstracta de ajuste). Valor que debe ser superado para que se efectúe la operación del relé y que depende de la I_{ret} .

Casi todos los Relés de Porcentaje Diferencial modernos que se utilizan para proteger Generadores, Transformadores, Barras Colectoras, etc., poseen doble rampa, figura 1.4.1. Esto quiere decir, que mientras el valor de la (I_{ret}) permanezca por debajo de un valor preestablecido por el usuario I_{s2} , el relé operará bajo una dependencia K_1 , y si este valor es superado la dependencia es cambiada a K_2 .

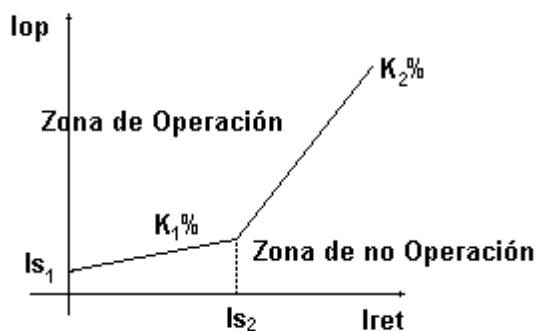


Figura 1.4.1. Representación de la operación del Relé de Porcentaje Diferencial que posee dos rampas.

Podemos expresar lo anterior en forma matemática (Li,1997⁵⁶) como sigue:

$$I_{op} = \text{Valor Eficaz}(i_1 - i_2) \quad (1.23)$$

$$I_{ret} = \text{Valor Eficaz}\left(\frac{i_1 + i_2}{2}\right) \quad (1.24)$$

$$\text{Si } I_{ret} < I_{s2} \text{ entonces } I_{aj} = K_1 I_{ret} + I_{s1} \quad (1.25)$$

$$\text{Si } I_{ret} \geq I_{s2} \text{ entonces } I_{aj} = K_2 I_{ret} - (K_2 - K_1) I_{s2} + I_{s1} \quad (1.26)$$

$$I_{op} \geq I_{aj} \quad (1.27)$$

donde :

I_{op} : Corriente de operación de la protección.

I_{ret} : Valor promedio de las señales de corrientes en los brazos del relé, (corriente de retención).

K_1, K_2 : Coeficientes que establecen la dependencia entre el valor de I_{aj} y I_{ret} .

I_{s1} : Valor que especifica el nivel mínimo que debe alcanzar la I_{op} para que el relé opere en caso de que I_{ret} sea igual a 0.

I_{s2} : Valor que define cuando el relé cambia la dependencia.

I_{aj} : Corriente de ajuste del relé.

El valor de I_{s2} se establece tomando en cuenta los errores de los transformadores de corrientes ; es decir, a partir de que valor de corriente los transformadores de corrientes comienzan a aumentar su error (saturación). Este punto es el umbral entre los fallos pequeños y los de elevada magnitud.

En estos Relés Diferenciales el ajuste dejó de ser una simple magnitud (I_{aj}), sino que aparecieron nuevos valores de ajuste tales como : K_1 , K_2 , I_{s1} e I_{s2} . Para más información de como seleccionar estos nuevos parámetros, puede ser estudiado a Aggarwal (1990²) y la publicación técnica de la General Electric representada por GER - 3134⁴².

En este Relé, al igual que en los de tipo instantáneos, las corrientes de entradas fueron filtradas para disminuir los errores de operación debido a las oscilaciones o presencias de armónicas indeseadas.

Existen otros tipos de Relés Diferenciales donde las señales a comparar no son precisamente corrientes sino magnitudes o señales de tensión, a estos últimos se les denomina Relés Diferenciales de Tensión. Otros muchos métodos de Protección Diferencial han sido utilizados para evitar las falsas operaciones de estos relés durante la magnetización de los transformadores de Potencia (Kuniaki,1997⁵⁴), éstos no son comúnmente empleados por tanto no fueron tratados en este trabajo.

Otros tipos de Relés Diferenciales de Corriente que funcionan similares a los del tipo instantáneos son los que utilizan un transformador de saturación profunda. Estos, aunque ya no muy utilizados, son bastantes inmunes a las sobrecorrientes producidas en el proceso de magnetización en los transformadores de potencia y en la protección de estos elementos han encontrado alguna aplicación (Feedoseev, 1984²⁸; Altuve 1990⁸).

1.5. Relés de Distancia

Los relés explicados anteriormente son clasificados como relés sencillos (Relés de Sobrecorrientes) y semicomplejos (Relés Direccionales y Diferenciales), pero el que se tratará en este epígrafe, el Relé de Distancia, entra en la categoría de los Relés complejos.

La causa principal de este nominativo radica en la cantidad de variantes de Relés de Distancia que se pueden encontrar y la dificultad en realizar su ajuste práctico. El principio de funcionamiento no es complejo y está basado en la medición del cociente entre la tensión y la corriente que llegan a sus bornes. Como esta relación es proporcional a la impedancia, cuando ocurre un fallo; desde el punto donde está situada la protección hasta el punto de fallo, entonces a estos relés se le denomina Relé de Distancia, dado que la impedancia en una línea es proporcional a la longitud de la misma (Fabricant, 1986²⁷...[et al]).

Cuando la impedancia de fallo o producto al fallo, disminuye por debajo de un valor preestablecido, el relé operará pasado un tiempo que, generalmente, es independiente del valor de la impedancia. Se conocen muchas características de operación que establecen el funcionamiento de este relé y son un tanto diferente a la explicada de manera general.

Estos relés tomando como punto de referencia la característica de operación o detección del fallo se pueden denominar: Relés de Impedancia, Relés de Resistencia, Relés de Resistencia desplazado, Relés Elípticos, Relés de Reactancias, Relés de Impedancia - Ángulo (direccionales), Relés Direccionales desplazados, etc. Esta enorme clasificación es una de las razones por la que son catalogados como relés complejos.

Para explicar estas características de detección del fallo, primeramente se debe introducir un nuevo concepto, que es el Plano Complejo en que se representan los mismos. Este no es más que un plano de coordenadas cartesianas donde la ordenada está formada por la reactancias y la abscisa por las

resistencias; esta es una de las formas en que se puede representar una impedancia ($Z = R + jX$) en forma binomial.

Las distintas características mencionadas no son más que diferentes figuras geométricas (Circunferencias, Elipses, Rectas, Cuadriláteros) insertadas en el plano complejo que definen la zona de operación del relé. En la figura 1.5.0 se muestran las que comúnmente se utilizan en la práctica y con esto se podrá corroborar lo dicho hasta aquí.

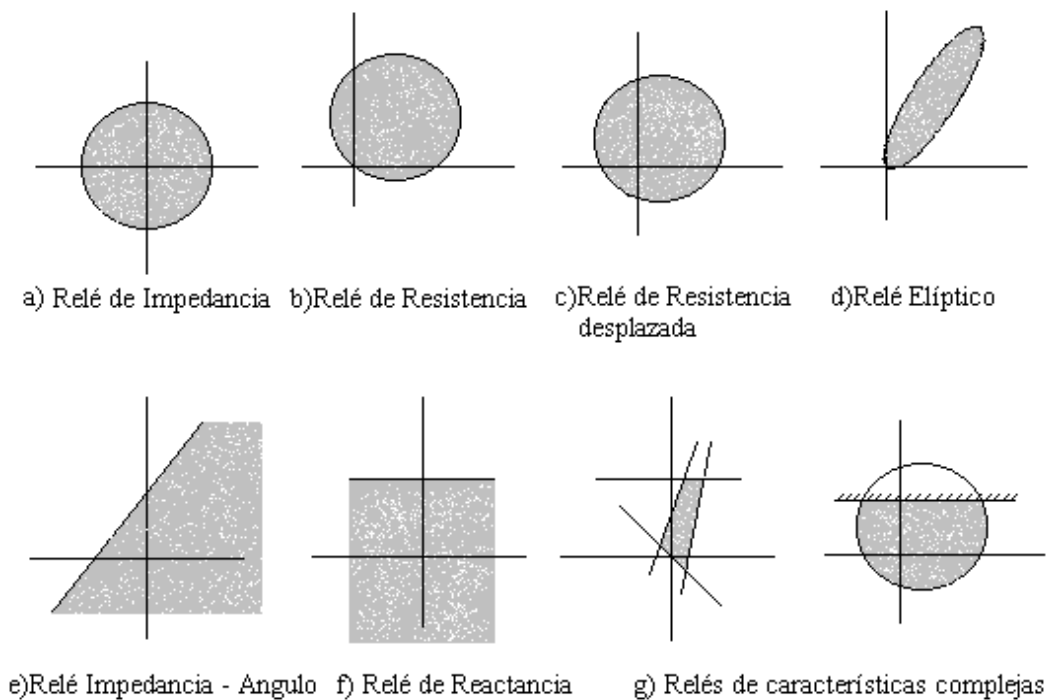


Figura 1.5.0. Características de los Relés de Distancia en el plano complejo.

El Relé de Impedancia está constituido por una circunferencia situada en el origen de coordenadas y con un radio fijo igual a (r); que constituye el ajuste del relé. Este operará cuando el módulo de la impedancia de fallo (Z_{fallo}), sea menor que el radio de la circunferencia, independientemente del ángulo que posea ; de ahí su nombre.

El Relé de Resistencia está formado por una circunferencia, al igual que el anterior, pero desplazada hasta un punto en que el perímetro de la misma pase por el mismo centro del origen. En este relé se ajusta tanto el diámetro como el ángulo con respecto al eje de las resistencias. Si el punto de impedancia de fallo está dentro de la característica entonces el relé operará.

Cuando el punto formado por la impedancia de fallo tiene el mismo ángulo que el ajustado en el relé, solo se necesita comparar los valores modulares de las impedancias (ajuste y fallo). Pero en la mayoría

de los casos esto no es así, debido entre otras cosas a la resistencia de arco que aparece en el punto del cortocircuito.

A medida que el ángulo del punto de impedancia de fallo se aleje del ajustado en el relé, se cumplirá :

$$Z_{op\text{ fallo}} \leq Z_{op\text{ ajustada}} \text{Cos}(\varphi_{\text{ajustado}} - \varphi_{\text{fallo}}), \quad (1.28)$$

El módulo de impedancia del fallo tiene que ser menor que el módulo de la impedancia ajustada multiplicada por el coseno de la diferencia angular entre el ajuste y el fallo. De ahí el nombre del relé, dado que coincide con la forma de extraer la resistencia cuando se tiene la impedancia expresada en números complejos del tipo módulo - ángulo (representación polar).

El Relé de Resistencia desplazada no es más que una circunferencia desplazada cierto valor del origen de coordenadas, en este caso los ajuste son similares a los hechos en el relé de resistencia solo que ahora el perímetro no pasará por el origen de coordenadas sino por un valor de impedancia inversa que también fungirá como valor de ajuste en este relé (Z_2 figura 1.5.1). A diferencia del anterior, este relé no es direccional por completo sino que tendrá una zona de protección de respaldo constituida por el valor que se le asigne a esta impedancia inversa.

Los Relés Elípticos son similares a los Relés de Resistencia y Resistencia desplazados solo que en vez de una circunferencia ahora se sitúa una elipse con su radio horizontal ajustado por el usuario. Al igual que en los demás relés, operará si el punto de impedancia de fallo está dentro de la elipse.

En este trabajo se muestra un algoritmo general para el tratamiento de los relés de características circulares, sin incluir ningún valor de ajuste más de los expresados anteriormente que son los que por su constitución necesita el relé. En general todos pueden ser modelados por la expresión matemática general de la elipse, de la forma :

$$\frac{(X-h)^2}{a^2} + \frac{(Y-k)^2}{b^2} \leq 1 \quad (1.29)$$

Se mostrarán a continuación las expresiones que permiten calcular los valores : h, k, a, b, X, Y ; mediante las cuales se podrá evaluar dicha función, partiendo de los valores de ajuste propios del relés ($Z_1, Z_2, \varphi_{\text{ajuste}}, \text{Div}$).

Para hacer la modelación de cualquier relé de distancia de característica circular, se trabajo con una elipse desplazada sobre el eje de las reactancias; para la que se cumple :

$$h = 0 \quad (1.20)$$

$$k = \frac{(Z_1 - Z_2)}{2} \quad (1.31)$$

$$b = \frac{(Z_1 + Z_2)}{2} \quad (1.32)$$

$$\text{como } 0 \leq a \leq b \text{ entonces } a = \frac{b}{Div} \quad (1.33)$$

$$X = Z_{fallo} \text{Cos}(90^\circ - \varphi_{ajuste} + \varphi_{fallo}) \quad (1.34)$$

$$Y = Z_{fallo} \text{Sen}(90^\circ - \varphi_{ajuste} + \varphi_{fallo}) \quad (1.35)$$

donde :

a y b: Radio menor y mayor de la elipse tratada.

Z_1 : Impedancia de ajuste en sentido directo.

Z_2 : Impedancia de ajuste en sentido inverso, respaldo.

φ_{ajuste} : Angulo de inclinación de la elipse con respecto al eje de las resistencias.

Div : Factor que establece la relación entre los radios de la elipse.

Z_{fallo} ,

φ_{fallo} : Impedancia de fallo representada en coordenadas polares.

En la figura 1.5.1 se muestran todos los ajustes y la zona que establece la operación del relé de característica elíptica partiendo de ellos (el interior de la elipse).

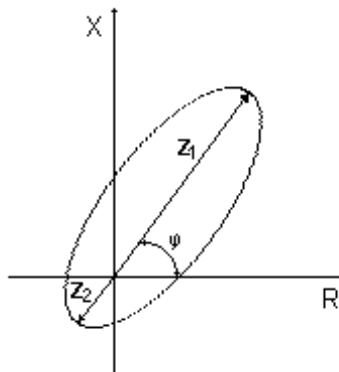


Figura 1.5.1. Zona de operación del Relé con característica elíptica.

Hasta ahora se ha hablado de relés con características circulares y se ha referido, a que el modelo general explicado anteriormente servirá para modelar todas estas características. En lo adelante mostraremos las transformaciones necesarias para utilizar este modelo y representar todos las características de los relés de distancias circulares.

Para un *Relé de Impedancia*, deben hacerse las siguientes restricciones:

$$Z_2 = Z_1 \tag{1.36}$$

$$\text{Div} = 1 \tag{1.37}$$

Para un *Relé de Resistencia (Mho)* :

$$Z_2 = 0 \tag{1.38}$$

$$\text{Div} = 1 \tag{1.39}$$

El valor de Z_2 indica si es un relé de resistencia es desplazado o no.

Como se observa, aquí solo ha aparecido un valor (Div) que no se encontró en la literatura revisada y fue introducido con el objetivo de permitir al usuario variar el radio horizontal de la elipse. Si este valor se toma igual a la unidad se estará trabajando con una circunferencia, y a medida que se incrementa se irá disminuyendo el radio horizontal de la elipse en la misma proporción. Este parámetro constituye una magnitud abstracta, pero mucho más fácil de asimilar que las constantes introducidas por Rusell MASON (1975⁶³) o V. L. Fabricant (1986²⁷).

Los Relés de Distancia de características rectilíneas fueron también tratados en este trabajo y a continuación se abordará una metodología general con la cual se puedan modelar los relés de tipo Reactancia, los Impedancia - Angulo (direccionales) y los Direccionales desplazados, ver figura 1.5.2.



Figura 1.5.2. Valores de ajuste del Relé de Distancia de característica rectilínea.

Todos estos relés se pueden representar por la ecuación general de la recta, de la forma :

$$X = mR + X_0 \tag{1.40}$$

$$m = \tan(\varphi) \tag{1.41}$$

es decir :

$$X = \tan(\varphi) R + X_0 \quad (1.42)$$

Algoritmo para la detección del fallo:

$$X_{\text{fallo}} = Z_{\text{fallo}} \text{Sin}(\varphi_{\text{fallo}}) \quad (1.43)$$

$$R_{\text{fallo}} = Z_{\text{fallo}} \text{Cos}(\varphi_{\text{fallo}}) \quad (1.44)$$

$$R = \frac{(X_{\text{fallo}} - X_0)}{\tan(\varphi)} \quad (1.45)$$

$$D = R_{\text{fallo}} - R \quad (1.46)$$

$$\text{Si } \varphi \geq 180 \text{ entonces } D = -D \quad (1.47)$$

$$\text{Si } D \geq 0 \text{ entonces el relé operará.} \quad (1.48)$$

donde :

$Z_{\text{fallo}}, \varphi_{\text{fallo}}$: Impedancia del fallo representada en coordenadas polares.

φ : Angulo de inclinación de la recta con respecto al eje de las resistencias. Este valor figurará como ajuste en los relés.

X_0 : Valor que desplaza la recta con respecto al eje de las reactancias. Desde el punto de vista matemático, es el punto donde la recta corta el eje de las reactancias.

Como se ha dicho este algoritmo permite modelar todos los relés de características rectilíneas, solo con cambiar los parámetros que se mencionaron antes. Pero existen sus particularidades en cada tipo.

Para los *Relés de Reactancias* :

$$\varphi = 0 \quad (1.49)$$

Para los *Relés Impedancia - Angulo* (direccionales) sin desplazamiento:

$$X_0 = 0 \quad (1.50)$$

Para los Relés Direccionales con desplazamiento, ambos ajustes se deben utilizar, operando siempre cuando los puntos que se encuentren entre la recta y el eje de las resistencias. Este es un aspecto importante para cuando el ángulo de ajuste (φ) es mayor que 180° .

Otras características de operación presentadas en la figura 1.5.0, como es el caso de las cuadrilaterales y otras muy complejas, como las empleadas para la protección de unidades generadores contra pérdidas de sincronismo y pérdida de la excitación pueden ser creadas con la combinación de las explicadas anteriormente.

Un Relé de Distancia con característica cuadrilateral fue construido en este trabajo para mostrar la forma de combinar los restantes Relés y de esta misma forma se podrán crear otros de características más complejas, figura 1.5.0 g).

1.6. Conclusiones

En este capítulo fueron abordados las expresiones que modelan la mayoría de los relés utilizados en la práctica : Relés de Sobrecorriente, Relés Direccionales, Relés Diferenciales y los Relés de Distancia, mostrando las ecuaciones y algoritmos que pueden ser convertidos en programas utilizando cualquier lenguaje de programación.

Estos modelos tienen como característica general que no incorporan ningún parámetro a no ser aquellos que por su naturaleza sean intrínseco al relé en cuestión. *Para ello se representarán los relés como bloques que realizan funciones, sin prestar mucha atención a ¿cómo la realizan ?. Esta es la síntesis del trabajo, modelar los relés según la forma en que el fabricante los realiza no es viable, cada realizador incluye técnicas propias que les parecen más económicas y fiables, lo que provocaría realizar una gran variedad de modelos sobre un mismo relé; en caso de que se pretenda confeccionar los modelos siguiendo exactamente las características constructivas de los mismos.*

En los Relés de Sobrecorriente y los Diferenciales, las expresiones fueron encontradas en las referencias mostradas y al autor les parecieron correctas, pero en el caso de los Relés Direccionales y Distancia, los algoritmos mostrados son creados por el autor, dado que los encontrados en las referencias les parecieron poco adecuados para convertirlos en instrucciones de programación y en muchos casos introducen nuevos parámetros que lejos de aclarar el funcionamiento del relé lo oscurecen.

Los modelos fueron realizados partiendo del principio que a los relés le llegarán un conjunto de datos que conforman los puntos medidos (muestras) durante un ciclo de frecuencia fundamental (36 muestras por ciclos), por lo tanto se deben extraer los diferentes valores que conforman las señales ; tales como: módulos, fases, armónicos, etc., según las que necesite el relé en cuestión. En casi todos los relés menos los de Sobrecorriente, antes de realizar las operaciones mostradas en los modelos, las señales de entrada fueron filtradas (utilizando la transformada rápida de Fourier) en el cual se le extrajeron las componentes de los armónicos diferentes al de frecuencia fundamental.

Otro parámetro que se tomó en cuenta, para hacer el ajuste de los relés, es el tipo de contacto; que establece, como se comportarán los contactos del relé luego de eliminado el fallo. Se utilizaron dos opciones : contactos mantenidos y no mantenidos, los cuales como su nombre lo indica, obligan al relé a mantener sus contactos cerrados o no, respectivamente, luego de detectado el fallo.

Las expresiones matemáticas y/o algoritmos, tales y como fueron tratados en este capítulo, fueron utilizadas en la creación de Relés Virtuales utilizando el Sistema de Desarrollo **LabView 3.1**, que es una plataforma de programación que ofrece muchas ventajas en los procesos de simulación y consta de funciones potentes para la posterior inserción de éstos relés en el mundo real. En el capítulo siguiente se tratarán los detalles de la implementación de cada uno de estos relés y las principales ventajas de la **Programación Gráfica de LabView** para estos fines.

2.1. Introducción

Luego que se tienen los algoritmos sobre un proceso dado, la tarea inmediata será escoger el Lenguaje de Programación que se utilizará para convertir estos algoritmos en programas auténticos. Este es un problema que no solo incluye las facilidades que este lenguaje ofrezca en la ejecución o escritura del algoritmo dado, sino que también figuran otros aspectos como: la velocidad de compilación, minimización del código *y otras ventajas que puedan ofrecer estos lenguajes, en futuras ampliaciones del programa.*

Este último aspecto fue el que verdaderamente influyó en la decisión de escoger **LabView** como plataforma de programación para construir los **Relés Virtuales**. Posee potentes opciones relacionadas con la adquisición de datos, al igual que posee unas muy fuertes herramientas de filtros. En la programación modular es casi insuperable. Además, simula muy bien la Multitarea.

Posee un lenguaje G (denominado así por su característica totalmente visuales o **Gráfica**), que es diferente a la lógica de programación utilizada en los lenguajes de programación profesionales como Visual BASIC, Borland Delphi, etc. Este Lenguaje fue creado para realizadores ingenieros, no para especialista en informática. Los ingenieros están acostumbrados a trabajar con diagramas de flujos y diagramas de bloques, en vez de utilizar instrucciones y procedimientos consecutivos.

En este capítulo se mostrarán las características fundamentales de LabView como lenguaje para la creación de aplicaciones, lo que permitirá al lector comprender los detalles de la programación que serán presentados. Seguidamente se mostrarán los gráficos que muestran los flujos de datos correspondiente a cada relé por separado (programas), conformando así variados **Instrumentos Virtuales (VI)** independientes, que pueden ser utilizados por alguna aplicación.

Un epígrafe se ha dedicado por completo a los Relés Virtuales, en ellos se concentra el mayor peso innovador del trabajo. Se tratarán en detalles aquellas partes que no fueron abordadas en el capítulo 1, como son los temporizadores, los filtros y los visualizadores que fueron incluidos en algunos de los Relés de características complejas de funcionamiento.

Para comprobar el funcionamiento de estos Relés diseñados en forma de VI, se hizo necesario la construcción de un Simulador de Fallos que brindara la posibilidad de generación de todas las señales

que servirán como entrada a los Relés. Se le incorporaron distintas posibilidades como: la generación de sobrecorrientes con componentes de directa, cambios súbitos de fases, y señales con determinados componentes de ruido. Se mostrarán también los detalles de la programación que se utilizaron para la implementación de este Simulador.

2.2. Características de LabView 3.1

Existen muchos sistemas o lenguajes de programación utilizados para modelar procesos y fenómenos de la realidad, y en la Especialidad de Eléctrica, son internacionalmente conocidos el PSIC, PSPICE, WORKBENCH, EMTP y uno que en los últimos tiempos posee la mayor afición por sus potentes herramientas matemáticas es MATLAB.

De todos estos paquetes de simulación conocidos, el único que por su programación se asemeja a LabView es el MATLAB, con su herramienta **Simulink**. Se han escrito muchas versiones de LabView y hasta este año se conoce como la más avanzada la versión 5.2 (Internet,1998¹) con potentes opciones de simulación, paquetes matemáticos, VI de adquisición de datos, herramientas de análisis estadísticos, filtros, etc. Se cuenta con la **versión 3.1** y en ella se realizaron los **Relés Virtuales**, pudiéndose luego convertir a las versiones más avanzadas puesto que en este capítulo se explicará lo necesario para lograrlo.

LabView 3.1 se compone por dos ventanas, una denominada Panel y la otra Diagrama. El Panel se utiliza para insertar los objetos prediseñados por los creadores de LabView, tales como: botones de desplazamiento, Visualizadores de agujas, Pulsadores, Graficadores, etc.

Con respecto a la colocación de los objetos en el Panel, LabView se parece mucho a los lenguajes de programación visuales más utilizados en la actualidad; tales como: Visual BASIC, Borland Delphi, Borland C++, etc. Creando un nuevo VI, aparece un panel sobre el cual el usuario puede insertar los objetos que desea y confeccionar de manera muy fácil el ambiente de su aplicación o de su instrumento, desplazando de un lugar a otro estos objetos con ayuda del ratón.

Al igual que en los lenguajes de programación más avanzados y potentes, a los objetos se les denomina **Controles** y se puede acceder a ellos mediante el menú principal del Panel Frontal. Los controles están divididos en grupos:

- Numéricos:

En esta categoría se encuentran todos aquellos controles que devuelven números cualquiera sea su dominio; es decir, reales, enteros, enteros largos, etc (LabView le asigna un color diferente según el dominio). Se pueden encontrar todos los botones desplazables tipo resistencia variable, medidores con agujas que simulan instrumentos de medición analógicos, medidores de nivel que simulan aparatos tipo termómetro, etc., figura 2.2.1.

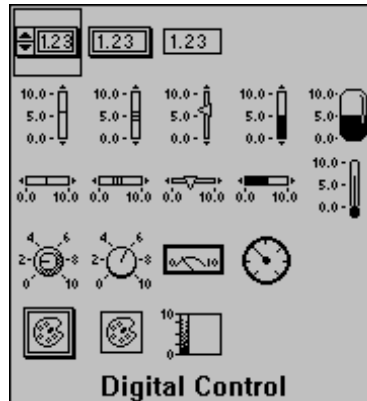


Figura 2.2.1. Controles numéricos

Color	Dominio de las variables
Azul	Enteros
Verde	Booleanos
Rojo	Reales
Violeta	Cadenas de caracteres

Tabla 2.2.0 Paleta de colores de LabView.

- Booleanos o lógicos:

Entre estos se encuentran los controles relacionados con variables booleanas o lógicas (Verdadero o Falso). Se encuentran toda clase de interruptores, lámparas para señalizar, botones, etc., figura 2.2.2.

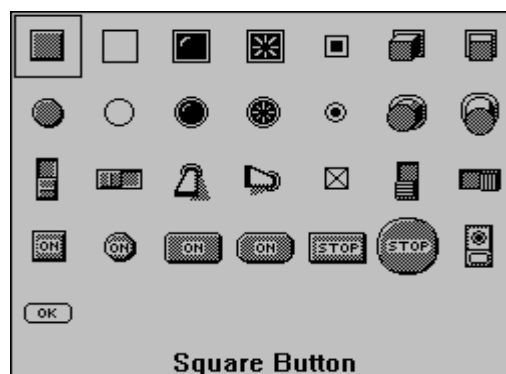


Figura 2.2.2 Controles lógicos

- Listas y objetos de desplazamiento

En casi todas las aplicaciones que funcionan sobre el Sistema operativo Windows se han hecho comunes aquellos objetos o controles que permiten ver una lista de cadenas de caracteres, así como agregar o reducir elementos de dichas listas. Por ejemplo, cuando se utiliza Microsoft Word en el

momento de abrir un fichero, generalmente se busca su nombre en uno de esos objetos conocidos en el argot de la programación como **ListBox**. El conjunto de controles que realizan funciones similares a las explicadas, se encuentran aquí, figura 2.2.3.

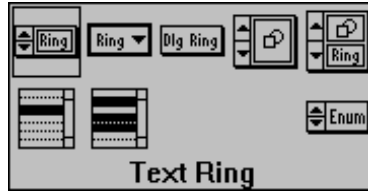


Figura 2.2.3 Controles de listas desplazables.

- Arreglos y Cluster (Estructuras).

Un arreglo es un tipo de variable muy utilizada en el almacenamiento de números del mismo tipo cuando se quiere que estos permanezcan en la memoria. Por ejemplo, las muestras extraídas durante un período de frecuencia fundamental estarán almacenadas en un arreglo para luego ser utilizadas en el cálculo del valor eficaz, los armónicos, etc. Los clusters son también utilizados para almacenar números en memoria, pero estos no tienen necesariamente que ser del mismo tipo. Se pueden almacenar en un cluster datos del tipo: enteros, reales, cadenas de caracteres, etc., para luego utilizarlos cada uno por separado. En el argot de la informática estos tipos de funciones o datos se les denominan **Estructuras**. En la figura 2.2.4 se muestran sus símbolos para que se les pueda reconocer en los diagramas que se mostrarán en epígrafes posteriores.



Figura 2.2.4 Arreglos y Clusters.

- Gráficos

Este tipo de controles no podía faltar, entre éstos se encuentran todos los controles relacionados con las posibilidades gráficas de LabView; Existen en formas de ejes de coordenadas y otros que permiten formar figuras variadas o irregulares mediante un arreglo de puntos (X,Y). En este trabajo se utilizaron para visualizar el método de operación de los Relés de Distancia y Diferenciales. En la figura 2.2.5 se muestran los símbolos que los caracterizan.

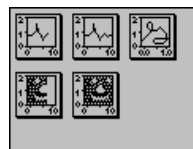


Figura 2.2.5. Controles para gráficos.

- Decoración

En este grupo se encuentran los objetos que permiten decorar los Instrumentos virtuales: bordes, marcos, etc. En la figura 2.2.6 se encuentran todos las formas posibles.

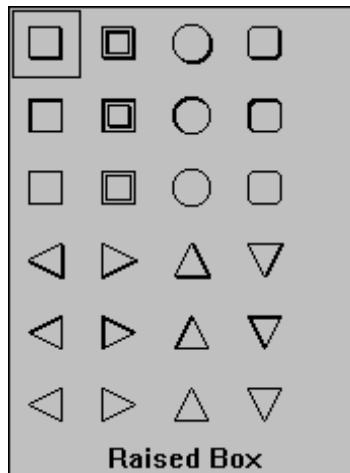


Figura 2.2.6 Controles para la decoración.

- Otros controles.

LabView posee muchos otros controles, pero como no fueron utilizados en este trabajo, no serán explicados con profundidad. Bastará con mencionar que se permiten crear nuevos controles, personalizados por el usuario, que posean nuevas características logradas con las combinaciones de los controles standard.

Todos estos objetos poseen sus formas características y son muy similares a los existentes, de sus mismos tipos, en las aplicaciones de Windows. Para conocer el total de controles que existen en LabView 3.1 se pueden revisar los manuales de usuarios.

Cada vez que se inserta uno de estos controles en la ventana Panel Frontal, automáticamente aparece un símbolo que lo representa en la Ventana Diagrama. En esta ventana es donde se realizan o confeccionan los programas. Un programa en LabView está formado por una serie de símbolos relacionados o conectados entre sí de una forma lógica que responda a un algoritmo dado.

Estos símbolos pueden representar a los controles que han sido insertados en la Ventana Panel u otras funciones intrínsecas de LabView, a las cuales se pueden acceder mediante el menú. Estas al igual que los controles del Panel están clasificadas en grupos:

- Estructuras y constantes

En este conjunto además de encontrarse una gran variedad de constantes generalizadas como: la constante de Gravitación Universal, la constante de Avogadro, Pi, etc.; también se pueden encontrar otras funciones muy útiles para la programación como son: lazos de repetición, secuencias, símbolos condicionales y un módulo donde se pueden insertar expresiones matemáticas denominado Nodo de Fórmulas. Además se encuentran las funciones que permiten insertar en el programa constantes numéricas y de cadenas de caracteres, ver la figura 2.2.7

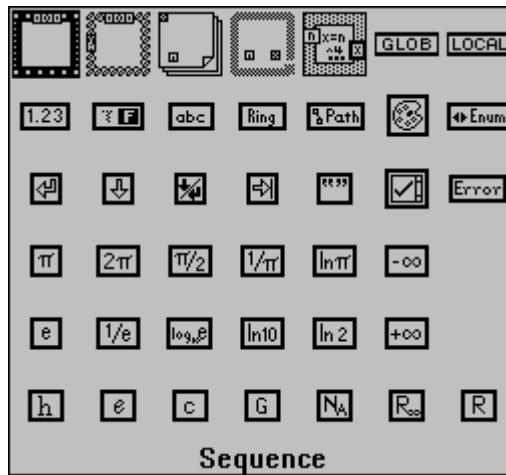


Figura 2.2.7. Funciones relacionadas con estructuras y constantes.

- Aritméticas

Se encuentran las funciones aritméticas simples; tales como: suma, resta, división, multiplicación, etc. También hay otras de mucha utilidad como incrementos, decrementos de números y el conjunto de operaciones lógicas básicas para el trabajo con variables booleanas (Verdadero - Falso).

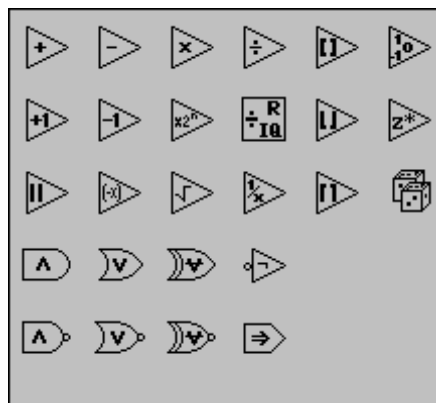


Figura 2.2.8. Funciones aritméticas.

- Trigonómicas y logarítmicas

En este grupo se encuentran todas las funciones trigonométricas básicas tales como: senos, cosenos, tangentes, etc.; los ángulos son devueltos y asimilados en radianes.

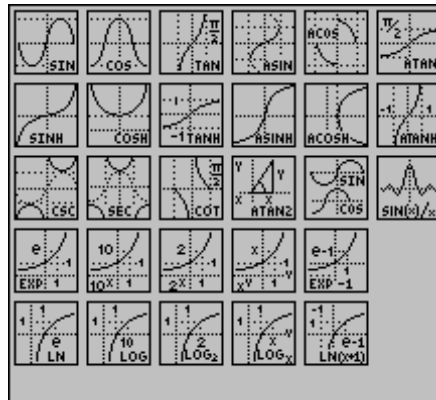


Figura 2.2.9. Funciones trigonométricas y logarítmicas.

- Comparaciones

Se pueden encontrar aquí las funciones de comparación entre números; tales como: mayor igual, menor igual, diferente, etc. Muchas otras funciones más complejas, pero de mucha utilidad aparecen aquí, como es el caso del **Rango** (devuelve si un número está dentro de un rango establecido) y el **Selector** (permite el paso entre dos entradas en dependencia de una variable lógica). En la figura 2.2.10 se muestran los símbolos que representan a estas funciones.

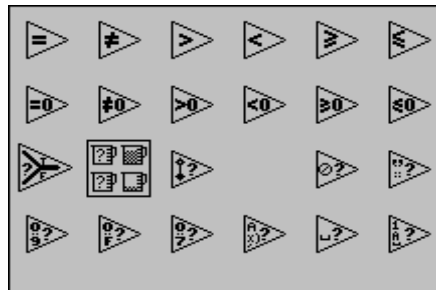


Figura 2.2.10. Funciones para hacer comparaciones.

- Arreglos y cluster

Aquí se encuentran el conjunto de funciones para el trabajo con los controles Arreglos y Clusters que fueron explicados anteriormente. Estas funciones fueron muy utilizadas en este trabajo, entre las que se encuentran: Crear un arreglo, Extraer el tamaño de un arreglo, Insertar un número en un arreglo, Buscar un número en un arreglo, Reemplazar un número por otro, Extraer los datos de un Cluster, Crear un Cluster, etc. Sus símbolos son mostrados en la figura 2.2.11

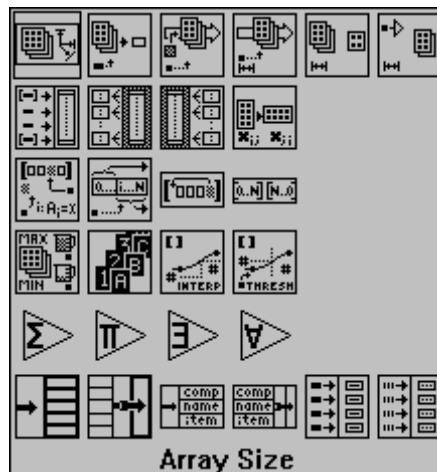


Figura 2.2.11. Funciones para trabajar con Arreglos y cluster.

- Tiempo y Ventanas de diálogos

En este grupo aparecen funciones relacionadas con el tiempo, tales como: esperar un tiempo, devolver el tiempo en milésimas de segundos, devolver la fecha y la hora del día actual, así como otras funciones para mostrar ventanas de diálogos con botones de aceptación, figura 2.2.12.

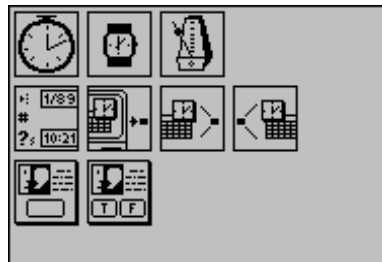


Figura 2.2.12. Funciones relacionadas con la temporización y las ventanas de Diálogo.

- Procesamiento de Señales

En este grupo se encuentran las transformadas de Fourier directa a inversa, las funciones de convolución y desconvolución para polinomios, integrales y derivadas, etc. Las primeras fueron utilizadas en la creación de los filtros que se emplean en casi todos los relés. Una muestra de los símbolos que la caracterizan se puede encontrar en la figura 2.2.13.

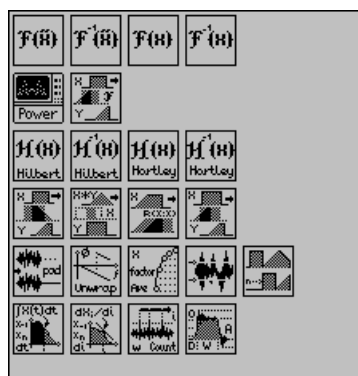


Figura 2.2.13. Funciones de Procesamiento de señales.

- Análisis Estadísticos

Las Medias, las Medianas, la Desviación Standard, las distintas funciones de distribución Normal, Fisher, T-Student, así como algunas funciones de interpolación pueden encontrarse en este grupo, ver la figura 2.2.14. Además se encuentra el cálculo de la Raíz Media Cuadrática (**RMS**) que fue utilizado ampliamente en este trabajo.

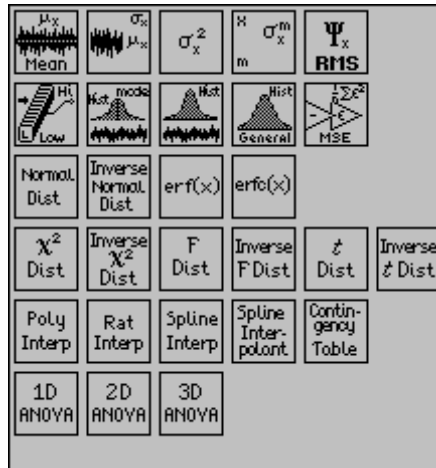


Figura 2.2.14. Funciones para el análisis estadísticos.

- Control de Instrumentos virtuales

LabView permite manipular otros Instrumentos Virtuales (programas) durante la ejecución de un programa (abrir, cerrar, mostrar el Panel, etc. figura 2.2.15), lo que permite visualizarlos durante la ejecución, o mostrar varios a la vez. Esta opción fue utilizada ampliamente en este trabajo.

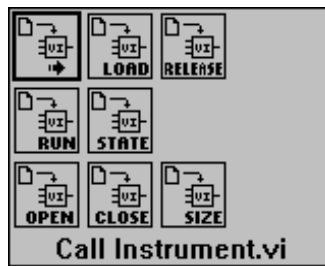



Figura 2.2.15. Funciones para el control de VI.

LabView posibilita insertar algunos Instrumentos Virtuales dentro de otros, a los cual se le llama




SubVIs y se representan por el símbolo ; el número dentro del cuadro varía, y depende de cuantos VIs insertados había antes de la inserción de éste (para el caso mostrado es el primero). Esta característica permitirá realizar Relés Virtuales más complejos con la combinación de otros con características de funcionamiento más sencillas; por ejemplo, hacer los Relés Trifásicos con la combinación de tres Relés Monofásicos conectados a cada una de las fases.


LabView diferencia los objetos que devuelven datos y los que reciben datos como : controles e indicadores respectivamente, aunque en la ventana Diagrama poseen el mismo símbolo, se pueden diferenciar por la tonalidad del color ; los indicadores son más claros.

Existen otras funciones que no fueron mostradas porque no se utilizaron directamente en el trabajo. Para la comprensión del principio de funcionamiento de las funciones, así como para la comprensión de los programas o diagramas que se mostrarán a continuación se pueden utilizar los manuales y la ayuda de LabView.

Algunos controles de uso temporal o aquellos que su aspecto visual no sea de importancia, pueden ocultarse y solo parecerá su símbolo en la ventana diagrama.

Hasta aquí se ha hecho una breve revisión de las funciones y controles de LabView que fueron utilizados en la creación de los Relés Virtuales, pero no se han mostrado los detalles de la creación de un programa.

Luego de introducir los controles y/o las funciones que participaran en el trabajo, se deben conectar unos con otros utilizando el botón siguiente  (en el diagrama). Se recomienda abrir el cuadro de ayuda en línea, en ella se muestran los tipos de datos y es muy útil cuando aparecen los errores de conexión.

Luego de conectados los símbolos entre sí, se debe ejecutar el programa mediante el botón . La persona que ha trabajado en Simulink con anterioridad, no tendrá muchos problemas en la confección de programas en LabView. Para aquellos programadores acostumbrados a ver una lista de instrucciones consecutivas en sus programas, este lenguaje gráfico le parecerá incómodo inicialmente.

Con el botón derecho del ratón se puede acceder a una serie de opciones adicionales muy útiles durante el trabajo; por ejemplo, en caso de los controles gráficos, utilizando el botón derecho se pueden acceder a las opciones de Autoescalado de los ejes de coordenadas (X, Y).

Cada símbolo en la ventana Diagrama está identificado con un texto que coincide con la Etiqueta o nombre del control. Esta se puede eliminar o insertar utilizando la opción Show - Label que aparece presionando el botón derecho sobre el símbolo. Esta identificación es muy útil para poder diferenciar los controles unos de otros ; pudieran estar representados en el Diagrama por un mismo símbolo. Esto no sucede así con las funciones, dado que se pueden diferenciar por su icono.

LabView tiene una característica peculiar en su funcionamiento que es necesario tomar en cuenta, y es el hecho de que se comporta con un gran **ciclo repetitivo** (muy parecido a la programación secuencial de los autómatas) en el cual se ejecuta todo lo programado. Este ciclo es ejecutado rápida y constantemente, lo que hace pensar que los eventos están ocurriendo al mismo tiempo y a la misma vez (simulación de Multitarea).

Otro aspecto importante es que en LabView se pueden establecer *prioridades*; es decir, que un VI puede ejecutarse primero que los otros de menor prioridad dentro del ciclo de programación; aunque a primera vista esta característica parece muy útil, no ha ofrecido muchas ventajas para este trabajo.

2.3. Relés Virtuales

En la mayoría de los trabajos encontrados que tratan sobre la modelación y simulación de Relés no se presentan los códigos de los programas que conforman dichos relés, por tanto es imposible repetir los experimentos. En lo adelante se tratará de explicar la lógica seguida en la implementación de los algoritmos mostrados en el capítulo 1 utilizando LabView como plataforma de programación.

Se le dedicará un apartado a cada clase de relé: Relés de Sobrecorrientes, Relés Direccionales, Relés Diferenciales de Corriente y por último los Relés de Distancia que es donde radica el mayor peso innovador del trabajo.

Todos los relés reciben sus señales de entrada por medio de arreglos, donde se almacenan y transmiten desde el Simulador de Fallos (ver epígrafe 2.4) 36 muestras por ciclos de la señal de entrada. Es por eso que ningún relé funciona por sí solo; al igual que las funciones explicadas en 2.2, necesitan ser conectados para no generar errores de programación. Cada relé funciona como un VI independiente y debe ser cargado como tal, en la aplicación que se desee instalar.

Se hará un cambio en el orden que hasta ahora se ha llevado, se explicará primero el Relé Direccional debido a que estos influyen sobre los Relés de Sobrecorriente si la dirección del fallo detectado no es la establecida. Algunas partes integrantes de los Relés de Sobrecorrientes trifásicos corresponden con actualizaciones hechas por los Relés Direccionales.

2.3.1 Relés Direccionales.

El algoritmo que modela estos tipos de relés se mostró en la figura 1.3.0 y el Panel diseñado que servirá de interfase al usuario como un Relé Direccional Monofásico se muestra en la figura 2.3.1.0.

Mediante este Panel el usuario puede acceder a cambiar el **Angulo de Máxima Sensibilidad** (φ_{max}) por medio del botón variable o por el editor que se ha instalado, justo, de bajo del botón. El Relé estará mostrando el ángulo de desfase entre las dos señales que llegan a sus terminales en el editor de **Desfasaje**, y activará la lampara de **Dirección** cuando el ángulo esté en el rango establecido. El botón **Resetear** se utiliza para mantener activo el relé aunque el ángulo esté o no en la zona establecida.



Figura 2.3.1.0. Panel de los Relés Direccionales Monofásicos.

En la figura 2.3.1.1 se muestra el diagrama (programa) de este relé que corresponde con el algoritmo anteriormente planteado. Los símbolos representados como Tensión y Corriente son los arreglos que contienen las 36 muestras por ciclo de las señales de entrada. Estos símbolos están conectados a los filtros en los cuales son eliminados los armónicos de frecuencia diferentes a la fundamental. Las señales después de filtrada son introducidas a un VI que extrae el ángulo de desfase, en el cual se realiza todo el proceso explicado en 1.3.

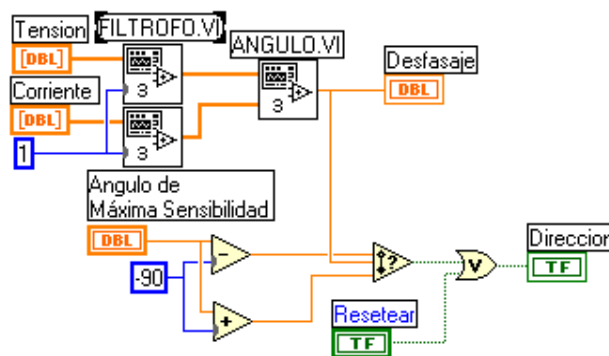


Figura 2.3.1.1. Diagrama del Relé Direccional.

La señal proveniente del VI detector del ángulo de desfase, es chequeada ; si está en el rango determinado entre $-90^\circ \leq \varphi_{max} \leq 90^\circ$ o el botón de **Resetear** está activo, se activará la lámpara de **Dirección**.

En el diagrama de la figura 3.3.1.1 se observan unos símbolos de VI insertados que corresponden a los Filtros (FILTROFO.VI) y al módulo de cálculo del desfase (ANGULO.VI), estos VI serán explicados a continuación.

(VI) ANGULO

El detector de ángulo es utilizado en otros Relés, pero sigue la lógica mostrada en la modelación del Relé Direccional y por tanto se explicará en este apartado. Está compuesto por dos arreglos de entrada (Array1 y Array2) y un editor numérico (Desfazaje) que devolverá el ángulo de desfase (en grados) que existe entre las dos señales que se le conectan a la entrada.

El diagrama que contiene los detalles del algoritmo, es mostrado en la figura 2.3.1.2. Las señales que están contenidas en los arreglos en forma de números aislados (muestras), son convertidas en señales cuadradas utilizando una función cíclica del tipo FOR $I = 0$ TO $N-1$, donde N es la cantidad de elementos del arreglo. Dentro del ciclo, los números contenidos en el arreglo 1 son comparados individualmente con 0, y si son mayores se reemplazan por 1; en caso contrario por 0. Para el arreglo 2 este proceso se hace de forma inversa, los números mayores que 0 son reemplazados por 0 y en caso contrario por 1, esto último corresponde al proceso de inversión o negación de la señal cuadrada de corriente, ver 1.3. Estas señales son multiplicadas y la señal resultante será proporcional a los grados de desfase entre las dos señales iniciales de entrada.

Como la señal resultante tiene amplitud igual a la unidad, la suma de todos sus elementos es K veces 360° . Este factor de proporcionalidad K es igual a la relación entre 360 y el número de muestras que en nuestro caso coincide con el tamaño del arreglo (36 muestras por ciclo, antes del filtro y 360 muestras después del ciclo); esta relación es 10 en caso de que la señal no esté filtrada, pero para evitar resultados erróneos del VI cuando se cambie la cantidad de muestras por ciclos, entonces se calcula constantemente la relación $K = 360 / N$. Luego es multiplicada por el número resultante de la suma anterior y se obtendrá el ángulo en grados que existe entre las dos señales de entrada.

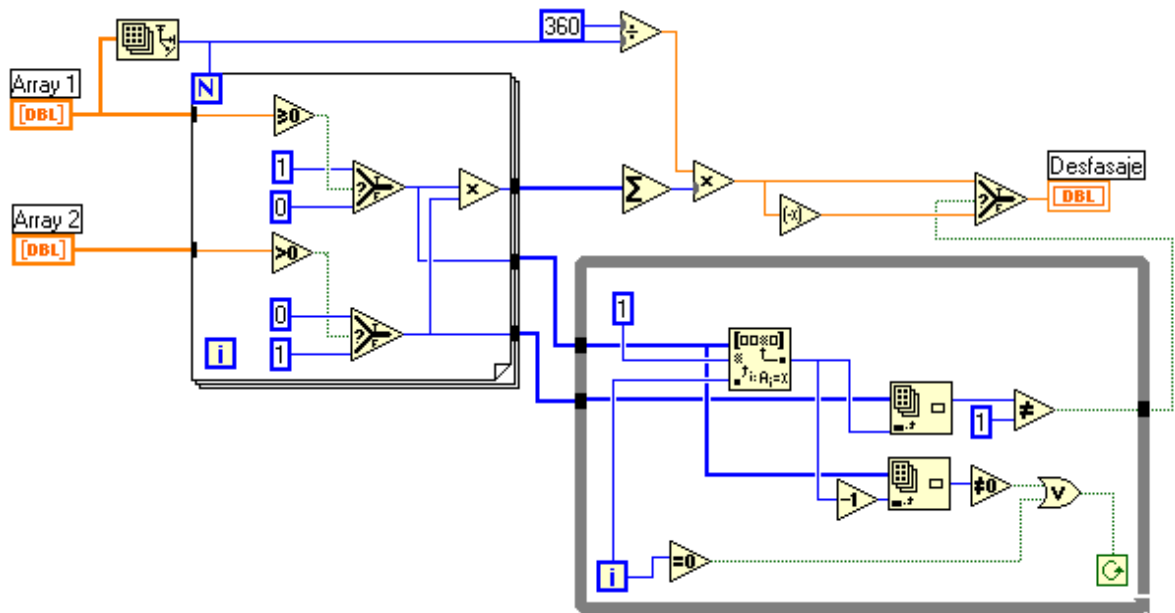


Figura 2.3.1.2. Diagrama del VI Detector de ángulo.


Hasta aquí el proceso de obtención del ángulo, pero como se explicó en 1.3 para desfases superiores a 180° , el resultado será como un ángulo negativo y entonces hay que detectar esta condición e invertir el signo del resultado.

El próximo ciclo que se muestra en la figura (While Loop) es el encargado de detectar éste signo. Se utilizan las señales provenientes del ciclo anterior donde fueron convertidas en señales cuadradas. Primeramente se busca el elemento del arreglo de la primera señal que contenga un “1”. Luego de encontrado, se chequea que en ese mismo elemento del arreglo, pero de la segunda señal, también halla un “1”. Si esto ocurre, y antes del “1” encontrado en la primera señal hay un “0” (flanco de subida), entonces se puede decir que el ángulo detectado es menor que 180° . Puede darse el caso que ambas señales coincidan en “1”, pero que ésta coincidencia no corresponda a un flanco de subida; entonces el proceso se repetirá hasta encontrarlo. La función cíclica explicada devolverá **Verdadero** en caso de que el ángulo sea menor que 180° y falso en caso contrario. La función Selector utilizada seguidamente, se encarga de realizar esta última función antes de entregar el número al editor numérico representado por la etiqueta **Desfasaje**.

Este VI es utilizado en muchos otros relés pero en todos los casos funciona como se ha explicado. Para eso se declaró como un VI Reentrante; es decir, que LabView entrará a él varias veces en un mismo ciclo de ejecución.

(VI FILTRO)



En el diagrama de la figura 2.3.1.1 se observa el símbolo . El cual corresponde al símbolo de un SubVI y que se llama FILTRO. Este corresponde con el filtro que posee el relé y fue diseñado para eliminar de la señal de entrada todos las componentes armónicas diferentes a la especificada.

El Filtro no es un instrumento virtual que se muestre; es decir, jamás aparecerá en el Panel de ninguno de los Relés, por lo tanto la estética de su Panel Frontal no tiene ninguna importancia. Solo se necesita conocer que está formado por 2 arreglos (uno que almacena la **Señal de Entrada** y el otro la **Señal de Salida**), y un editor numérico (**Armónico**) en el que se almacena la componente armónica que no será eliminada mediante el filtro .

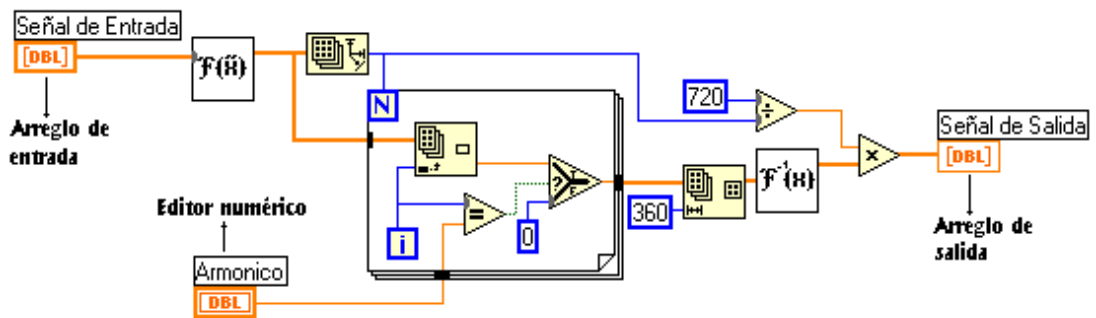


Figura 2.3.1.3 Diagrama de bloques del FILTRO

La Señal de Entrada se transforma del dominio del tiempo al dominio de la frecuencia utilizando la Transformada Rápida de Fourier, se le eliminan todas las componentes diferentes a la especificada y luego se antitransforma nuevamente al dominio del tiempo utilizando la Transformada Inversa Rápida de Fourier.

En el arreglo de números, luego de Transformado al dominio de la frecuencia, cada elemento representa un múltiplo de frecuencia con respecto a la fundamental. El 1 significa la componente fundamental, 2 una frecuencia del doble de la fundamental y así sucesivamente. Si se hacen cero todos los elementos del arreglo, menos el elemento especificado en el editor numérico (Armónico), cuando se Antitransforme al dominio del tiempo, la señal quedará filtrada y contendrá únicamente una componente igual a la especificada.

La señal entrante al filtro es un arreglo de 36 muestras por ciclo que es la resolución con la que se trabajará en nuestro caso. Esta característica provoca que el Relé Direccional pueda detectar como

mínimo un ángulo de 10 grados; es decir, el Relé detectará intervalos de variación del desfase entre dos señales superiores a 10 grados; no menores.

Si la señal de frecuencia fundamental tiene un período $T = \frac{1}{60} = 16,6$ milésimas de segundo, entonces para poder extraer 36 muestras por ciclos se deberá medir con una rapidez de aproximadamente 0,46 milésimas de segundos. Para poder medir una señal sinusoidal cualquiera, 36 veces por ciclo será necesario utilizar un conversor análogo - digital de $F = 60 \cdot 36 = 2160$ conversiones por segundos. Como la cantidad de señales a medir en nuestro caso, ver el epígrafe 2.4, son nueve, entonces se necesitará un conversor de 19,440 KHz.

Aumentar el número de muestras por ciclo significa aumentar mucho más la velocidad del conversor Análogo - Digital y en éstos se cumple: "A MAYOR VELOCIDAD, MAYOR PRECIO". Por esta razón y siguiendo las experiencias aplicadas en Relés Modernos (GE Multilin, 1997^{29..33}), se decidió utilizar 36 muestras por ciclos, aunque se encuentran algunos relés que utilizan 16 muestras permitiendo con esto disminuir la velocidad total a 8,640 kHz.

Este filtro además de eliminar los armónicos diferentes al especificado en el editor numérico, también devuelve una señal con mayores muestras que las entrantes; es decir, la señal de entrada es un arreglo de 36 elementos y el Filtro devuelve un arreglo de 360 elementos; siendo esto ventajoso a la hora de captar el desfase, dado que aumenta la resolución; es decir, el desfase mínimo que puede ser detectado mediante el método explicado antes (sec. 1.3).

Luego que se termina el proceso de eliminación de los elementos diferentes al armónico que se desea mantener mediante la función cíclica del tipo FOR I = 0 TO N-1 (ver figura 3.3.1.3), el arreglo es aumentado a 360, con elementos nulos. Lo que permitirá, al Antitransformarlo, obtener una señal filtrada, pero con 360 muestras por ciclos. Esta es la razón por la cual el Relé Direccional mostrado pueda detectar un desfase hasta de 1°.

En este trabajo se utilizó el Filtro para eliminar todos los armónicos diferentes del armónico de frecuencia fundamental por lo que siempre se encontrará como entrada para el **Armónico**, una constante igual a 1.

Fueron explicadas todas las partes que integran el diagrama (programa) del Relé Direccional genérico y a continuación se explicará un nuevo Relé Direccional de Potencia trifásico, formado por tres Relés Direccionales monofásicos como el anterior.

En la figura 2.3.1.4 se muestra el Panel Frontal del Relé Direccional de Potencia el cual está formado por una botón desplazable por medio del cual el usuario especifica el **Angulo de máxima sensibilidad máxima**, 3 editores numéricos que indican el **Desfasaje angular** y 3 lámparas que indicarán cuales de los relés monofásicos ha actuado (**Dirección**). Además posee 6 arreglos de entrada en los cuales el Relé almacena las señales de tensión y corriente de cada una de las fases (**Tensión A, Tensión B, Tensión C, Corriente A, Corriente B, Corriente C**). La señal de **Resetear** activará las lámparas de Dirección aunque no se cumplan las condiciones de operación del relé.



Figura 2.3.1.4. Panel del Relé Direccional de Potencia Trifásico.

La conexión que utiliza el Relé es la más utilizada por su alta sensibilidad en la gran mayoría de los fallos que se presentan en los sistema eléctricos, conexión 90° . En la figura 2.3.1.5 se muestra el programa del Relé Direccional de Potencia. A cada Relé Direccional Monofásico le llega la diferencia de las tensiones de las fases (tensiones de líneas) y las corrientes de las fases protegidas, como se ha establecido anteriormente en el epígrafe 1.3 (Altuve,1990⁸).

Luego de calculadas las señales utilizando las funciones aritméticas sencillas de substracción, se conectan con cada relé en específico. Cada relé monofásico detecta por separado e individualmente si el ángulo de desfase de las dos señales que llegaron a sus bornes está en el rango establecido. Las señales lógicas que generan cada relé son conectadas a las lámparas de detección y además, su valor es

almacenado en variables globales que luego serán utilizadas en los Relés de Sobrecorrientes (**Dirección Fase A, Dirección Fase B, Dirección Fase C**).

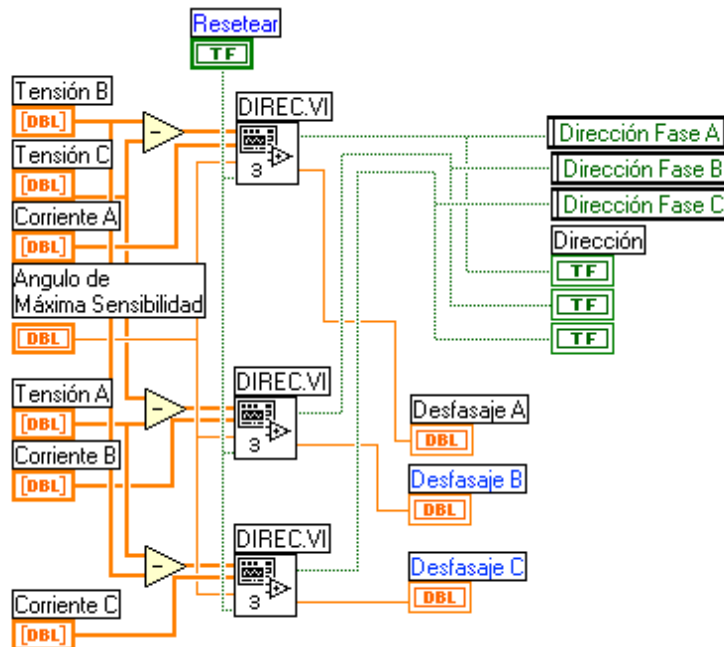


Figura 2.3.1.5. Diagrama del Relé Direccional de Potencia Trifásico.

Siguiendo el mismo procedimiento se pueden realizar todos los Relés Direccionales Trifásicos cualquiera sean sus conexiones. Sólo se necesitan cambiar las funciones aritméticas por su equivalente en la conexión dada. Una muestra de esto se puede encontrar en las primeras figuras anexo 2 donde son representados los Paneles y diagramas de los Relés Direccionales conectados en 30° y 60°.

2.3.2 Relés de Sobrecorrientes

En este epígrafe se explicará el funcionamiento del Relé de Sobrecorriente de Tiempo Inverso que rige su curva de temporización según ANSI (sec. 1.1). Dado que los otros Relés de Sobrecorrientes que funcionan según otras normas, son similares al que se explicará seguidamente. Por existir alguna diferencia de estos con los Relés de Secuencia con respecto a sus órganos de medición, se explicarán también el Relé de Sobrecorrientes de Secuencia Negativa de Tiempo Inverso para la protección de máquinas rotatorias.

En la figura 2.3.2.0 se muestra la Ventana Panel del Relé de Sobrecorriente según ANSI. Está formado por un control mediante el cual se establece el **múltiplo** (botón desplazable), el **tipo de curva** y el **tipo de contacto** (listas) y la corriente de ajuste del Relé (**Ajuste**, editor numérico). Otros controles son

utilizados para devolver el tiempo de espera que se calcula para una sobrecorriente dada y las lámparas que indican cuando se ha detectado la sobrecorriente y el **Estado** final de los contactos del Relé.



Figura 2.3.2.0. Ventana Panel del Relé de Sobrecorriente según ANSI.

El funcionamiento de estos Relés de Sobrecorrientes de Tiempo Inverso no es complejo. Se calcula el valor eficaz **RMS** con las muestras de la señal de entrada. Este valor es dividido por el valor de corriente ajustado en el Relé (convertir la corriente en p.u). Con este valor de corriente se calcula un tiempo que será esperado si la corriente calculada supera la unidad. El tiempo de espera depende del tipo de curva que se elija por el usuario según las constantes A,B,C,D y E. Cuando ocurra una sobrecorriente $I > 1$, se activará una lámpara y luego de excedido el tiempo de espera calculado, se activará la lampara de **Estado** que podrá desactivarse utilizando el botón **Resetear**.

El algoritmo general que modela estos relés se muestra en la figura 1.2.0 y el programa que se diseñó para esto, es el mostrado en la figura 2.3.2.1. El símbolo representado por la etiqueta **Corriente de Fase** es un arreglo en el cual se almacenan las muestras de la señal de entrada. Estas muestras son filtradas utilizando el filtro explicado en el epígrafe anterior. Con la señal ya filtrada se calcula el valor eficaz y se divide este valor por el ajustado en el Relé utilizando la función aritmética de división. El tiempo de retardo es calculado siguiendo la expresión 1.6 con las constantes que dependen del tipo de curva con que se quiere operar. Se diseñó un VI que según el tipo de curva seleccionada por el usuario devuelve la constante adecuada para ese caso (SELECT.VI), su diagrama se muestra en anexo 2.

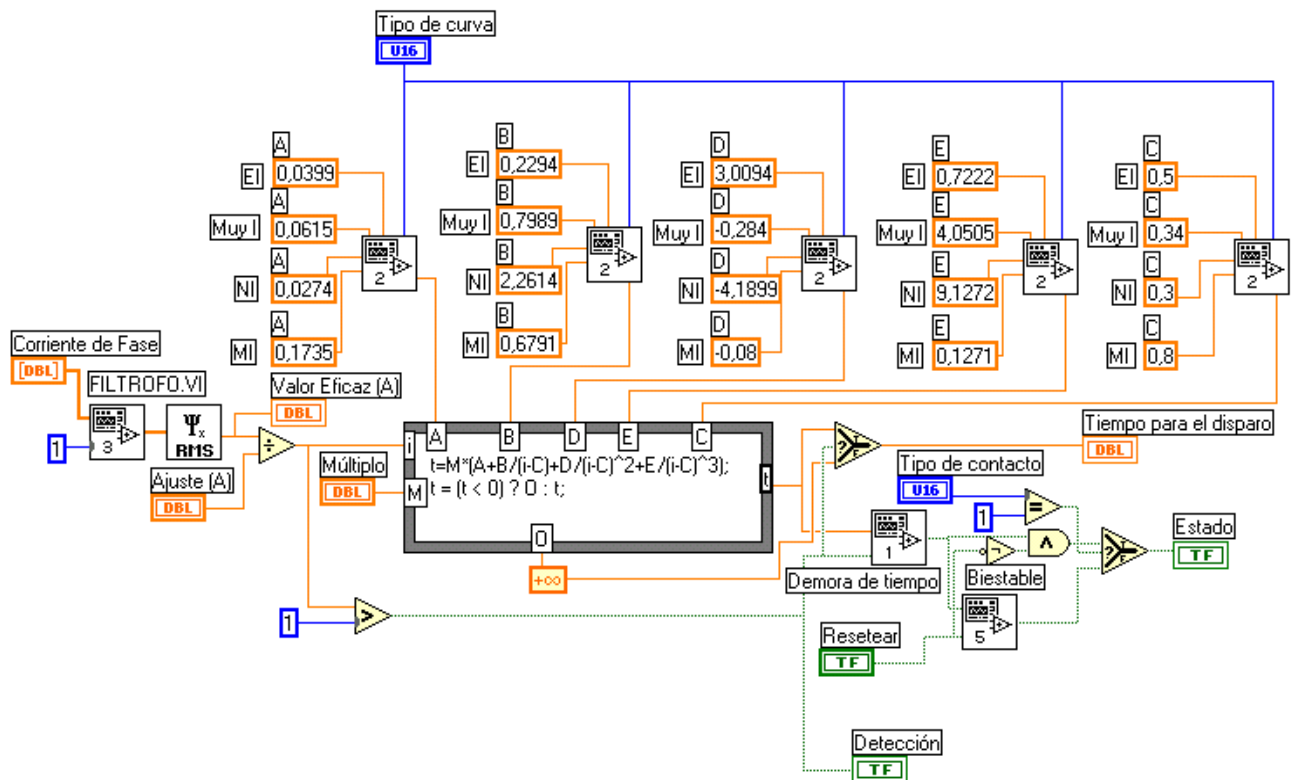


Figura 2.3.2.1. Ventana Diagrama del Relé de Sobrecorriente según ANSI.

La expresión del tiempo es evaluada en la función NODO FORMULA y su salida está conectada directamente a un VI diseñado expresamente para realizar la demora calculada. Este VI se representa por la Etiqueta TIMER.VI y es utilizado por casi todos los Relés.

(VI) Tiempo

LabView posee funciones de demora de tiempo, las cuales fueron mencionadas en el epígrafe 2.2, pero estas demoras de tiempo no puede ser utilizadas en la construcción de los programas de los relés porque tienen como características detener el ciclo de ejecución mientras están contando. Esto trae consigo que la acción de un Relé detenga la operación de los otros y esto no es admisible.

Como se explicó anteriormente, LabView funciona siguiendo un ciclo iterativo en el cual son ejecutadas todas las funciones que existen en el programa, si se detienen por algunas razones este ciclo, todos los procesos que se realicen por cualquier VI que esté insertado en este ciclo, también será detenido. *Por tanto, cualquier ciclo que se haga dentro de este gran ciclo, producirá una demora adicional indeseada.*

La tarea consiste en hacer un contador de tiempo que no sea cíclico (sin utilizar funciones cíclicas) y que responda a los cambios que durante la cuenta puede haber en las señales de entrada de dicho contador como son: cambio del tiempo de cuenta, la habilitación o no del contador, etc.



Figura 2.3.2.2 Panel frontal del Temporizador.

Este Temporizador debe operar sin que su funcionamiento afecte al de los demás VIs que se puedan encontrar trabajando. Las funciones existentes en LabView, que permiten hacer una demora de tiempo, detienen el ciclo de ejecución de LabView mientras permanezcan contando. Esto es intolerable para el caso del trabajo con Relé, dado que un Relé no debe afectar el funcionamiento de otro, además a este temporizador se le puede ordenar detener la cuenta sin haber expedido el tiempo que se le especificó; y en otro caso, éste tiempo especificado puede variar durante un proceso de cuenta y por tanto el temporizador debe asimilar el cambio.

Como las funciones de LabView no pueden ser utilizadas para crear el Temporizador entonces se diseñó un VI que cumpla con las condiciones que fueron explicadas. En la figura 2.3.2.2 se muestra el Panel donde se podrán observar los controles que fueron utilizados para su realización.

Este módulo al igual que el Filtro nunca aparecerá mostrando su Panel en ningún Relé; es decir, que trabajará como una tarea de fondo (background como se conoce en el argot de la informática). Cada control está representado por una etiqueta que lo identificará en el Diagrama mostrado en la figura 2.3.2.3. El funcionamiento general del temporizador consiste en que cuando la señal de permiso es activada, primeramente se almacena el número correspondiente al tiempo actual (secuencia 0) y seguidamente a esta señal se le adiciona el tiempo que se desea esperar y se compara con el tiempo actual corriente (secuencia 1). Cuando el tiempo actual corriente supere al resultante de la suma del tiempo deseado y el tiempo que se almacenó inicialmente, entonces se activa la señal de salida (**Acción**); en caso contrario, la señal de salida estará en Falso.

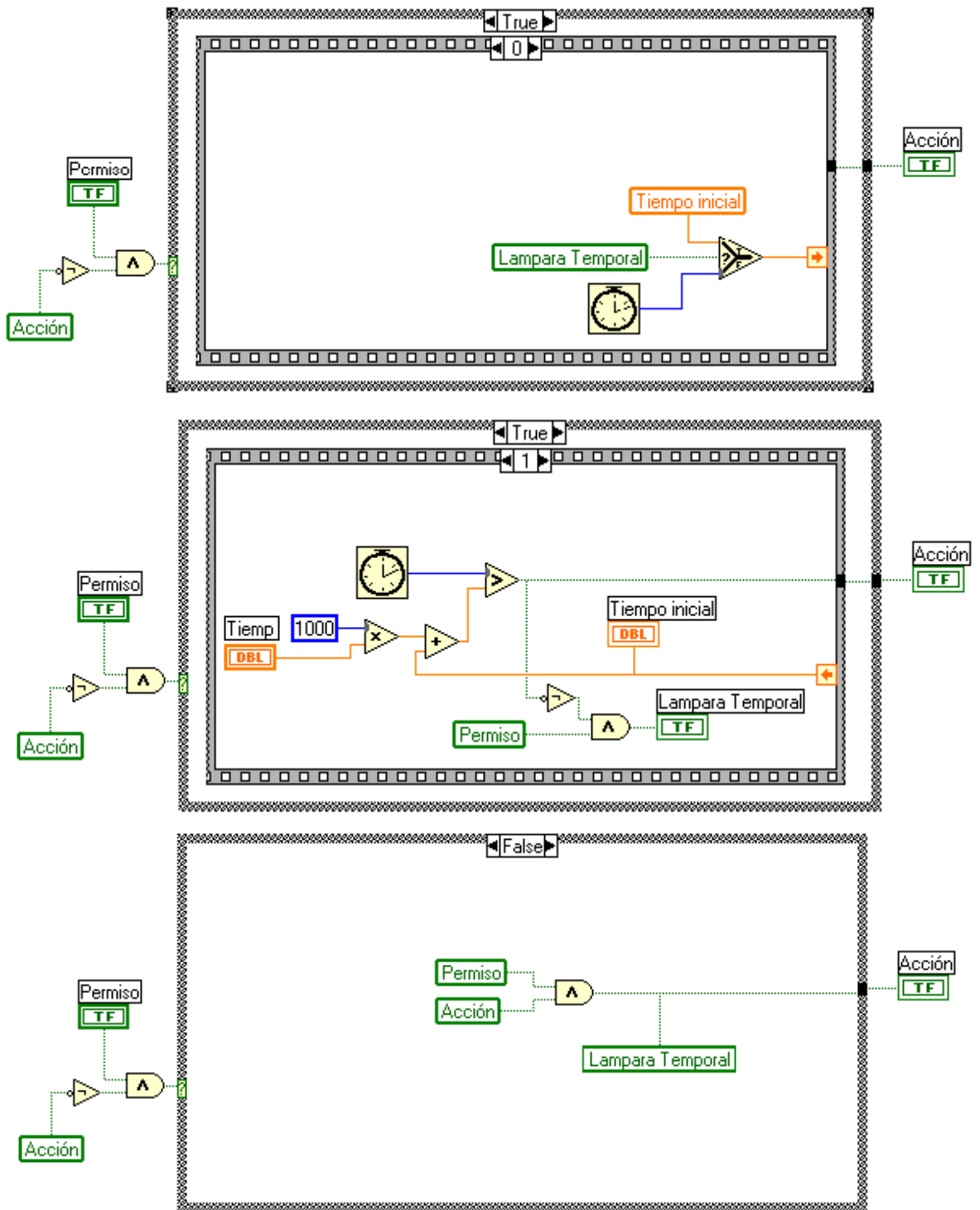


Figura 2.3.2.3. Diagrama de bloques del temporizador.

Se utilizó una función CASE que en su opción de **Verdadero** posee una función del tipo SECUENCIA. En el primer paso (SECUENCIA 0) se guarda el tiempo corriente en este momento y se envía a la SECUENCIA 1 mediante un registro de desplazamiento. En el próximo ciclo de ejecución se pasa al segundo paso o a la próxima secuencia (SECUENCIA 1), que guarda en el indicador

Tiempo Inicial el número correspondiente al tiempo medido en la secuencia 0 y se compara el tiempo actual con el resultado de la suma del número almacenado y el tiempo que se desea contar multiplicado por 1000 porque está expresado en milésimas de segundo. En la opción **Falso** del CASE prepara las condiciones para una nueva corrida.

Cuando se ejecute un nuevo ciclo de programación de LabView y las condiciones para contar sean verdaderas, se repetirán las secuencias comenzando por la primera (SECUENCIA 0), pero en este caso fue instalado un selector que enviará hacia la secuencia 1 el mismo número almacenado en Tiempo Inicial y que es igual al almacenado en el ciclo de ejecución anterior. Al pasar a la próxima secuencia (SECUENCIA 1) se volverá a hacer la comparación. Este uso de las secuencias permite contar y comparar el tiempo actual con el tiempo en el momento que fue inicializado el contador sin necesidad de hacer un ciclo de espera independiente. Si durante la comparación se varían los parámetros del temporizador, éste lo detectará y actuará asumiendo los nuevos parámetros.

Como se observa, este proceso no incluye ninguna función cíclica, dado que cualquiera de estas funciones detienen el ciclo general de LabView. Este VI utiliza los ciclos generales de ejecución y por tanto en vez de afectar el funcionamiento de los demás VIs ; por el contrario, si otro VI provoca una demora en el ciclo de LabView lo pueden afectar a él (demoras excesivas).

El temporizador es Reentrante dado que es usado por casi todos los Relés Virtuales diseñados en LabView. Varios Relés de Sobrecorrientes pueden estar esperando tiempos diferentes para el disparo y esto no influye en la ejecución de ninguno, *todos trabajan de manera totalmente independiente*.

Fueron diseñados Relés de Sobrecorrientes siguiendo las normas expuestas en el capítulo 1, pero su funcionamiento es similar al de la NORMA ANSI, cambiando solo las constantes y las expresiones para el cálculo del tiempo, ver anexo 2. No se mostraran los diagramas de los Relés de Sobrecorrientes trifásicos debido a que sus Paneles son exactamente iguales a los monofásicos y están constituidos por tres de ellos conectados a cada una de las fases. Cualquier otro VI que aparezca insertado en estos diagrama y que no se halla explicado en este epígrafe, se mostrará en las figuras contiguas del anexo 2.

Un aspecto importante se observa en los diagramas de los Relés Trifásico, y es el hecho de que las variables globales que fueron actualizadas en el Relé Direccional trifásico (Dirección Fase A, Dirección Fase B, Dirección Fase C) aparecen aquí inhabilitando la operación de los relés de las fases. Siempre que se conecte un Relé de Sobrecorriente y un Direccional de Potencia en una misma

aplicación, el primero dependerá del segundo sin que el operador tenga que hacer ninguna operación al respecto.

Otros Relés que funcionan de manera similar pero que están extrayendo las componentes de secuencia de las señales trifásicas de corrientes son los Relés de Secuencias. En particular el Relé de Secuencia Negativa es muy utilizado en aplicaciones con máquinas rotatorias para la protección de éstas contra fallas de carácter asimétrico.

El algoritmo que permite simular este Relé fue abordado en 1.2 y el Panel diseñado como interfase de éste Relé se muestra en la figura 2.3.2.4. No posee controles del **Tipo de curvas y múltiplo**, en su lugar posee un editor numérico para que el usuario elija el **Factor K** mediante la tabla 1.2.4, según el tipo de máquina rotatoria que se esté protegiendo.

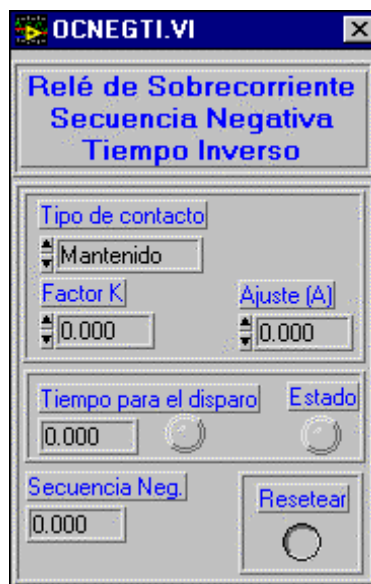


Figura 2.3.2.4. Panel Frontal del Relé de Secuencia Negativa de tiempo Inverso

Las señales trifásicas de corrientes son filtradas y se calculan las componentes de secuencia negativa y positiva por medio de VIs insertados que fueron diseñados para este fin (se explican más adelante). El resultado de la división de estas componentes es comparado con el ajuste especificado por el usuario. Si es superior, se hace una demora del tiempo calculado mediante la función NODO FORMULA (ecuación 1.14), utilizando el VI TIMER.

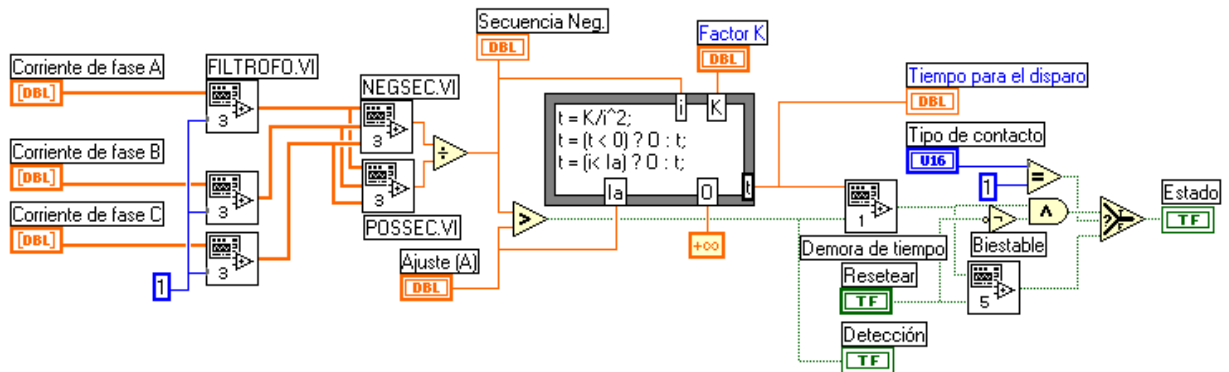


Figura 2.3.2.5. Diagrama del Relé de Secuencia Negativa de Tiempo Inverso.

En la figura 2.3.2.5 se muestra el diagrama del Relé de Secuencia negativa. Los aspectos relacionadas con el botón **Resetear** y las señales luego de activada la demora de tiempo son iguales a los Relés de Sobrecorrientes tratados con anterioridad.

Los otros Relés de Secuencia Virtuales diseñados son muy similares a éste y para su comprensión solo se necesita ver sus Paneles y Diagramas en las figuras del anexo 2.

VI de Secuencia Negativa

Las expresiones que rigen este proceso son (1.10 - 1.13) del capítulo 1. Su Panel Frontal se muestra en la figura 2.3.2.6. Está compuesto por 3 arreglos que almacenan las señales trifásicas (**Corriente Fase A**, **Corriente Fase B**, **Corriente Fase C**) y dos editores numéricos que devuelven el **módulo** (Valor eficaz) y el **ángulo** (grados) de la componente de secuencia negativa de esas señales. Otros 6 editores numéricos fueron insertados pero tienen función temporal, cada uno de ellos guarda el módulo y el ángulo de cada una de las señales de las fases. Este VI trabaja como tarea de Fondo y es Reentrante. La estética de este Panel Frontal no es un factor importante dado que nunca es abierto.

Como el VI de ángulo necesita dos señales para detectar el desfase entre ellas, se supuso que la primera señal estaba desfasada a 0° y que el desfase que se detectaría entre las señales correspondería al que las señales de la fase B y C formarían con respecto a la fase A. En la figura 2.3.2.7 se muestra el diagrama de este VI.

Luego de detectado el desfase de cada una de las señales de las fases, se convierten a números complejos a coordenadas polares de la forma $\underline{A} = A \angle \theta$, antes de realizar la sumatoria correspondiente de las fases, se multiplican las fases B y C por el correspondiente factor (a) y (a^2) que aparece en la fórmula 1.13 y el resultado se divide entre 3. Finalmente se convierte otra vez a valores aislados de módulo y ángulo, y este último se lleva a grados utilizando un VI diseñado con ese fin.

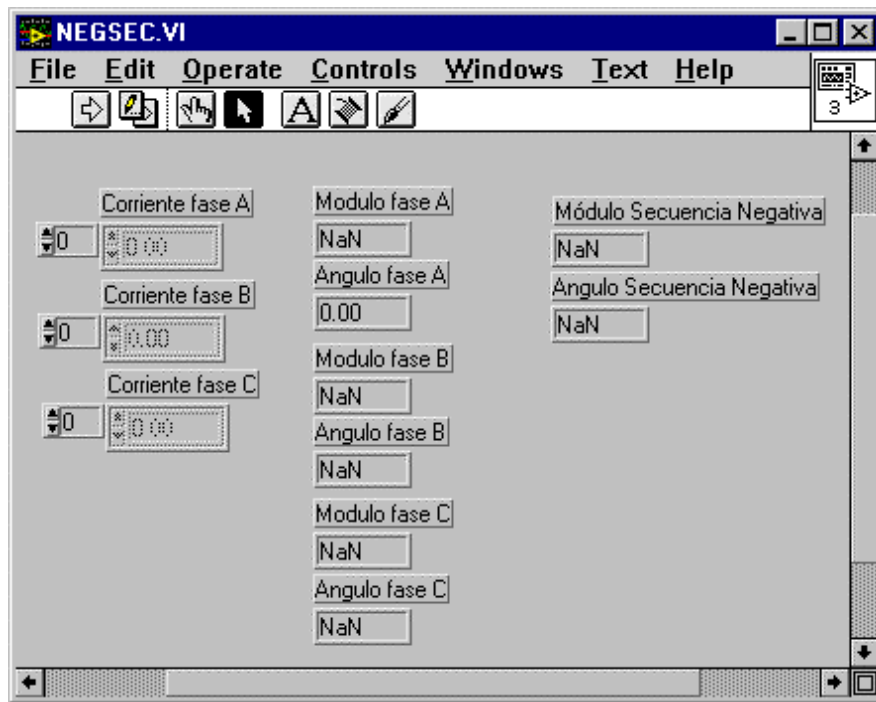


Figura 2.3.2.6. Panel Frontal del VI de Secuencia Negativa.

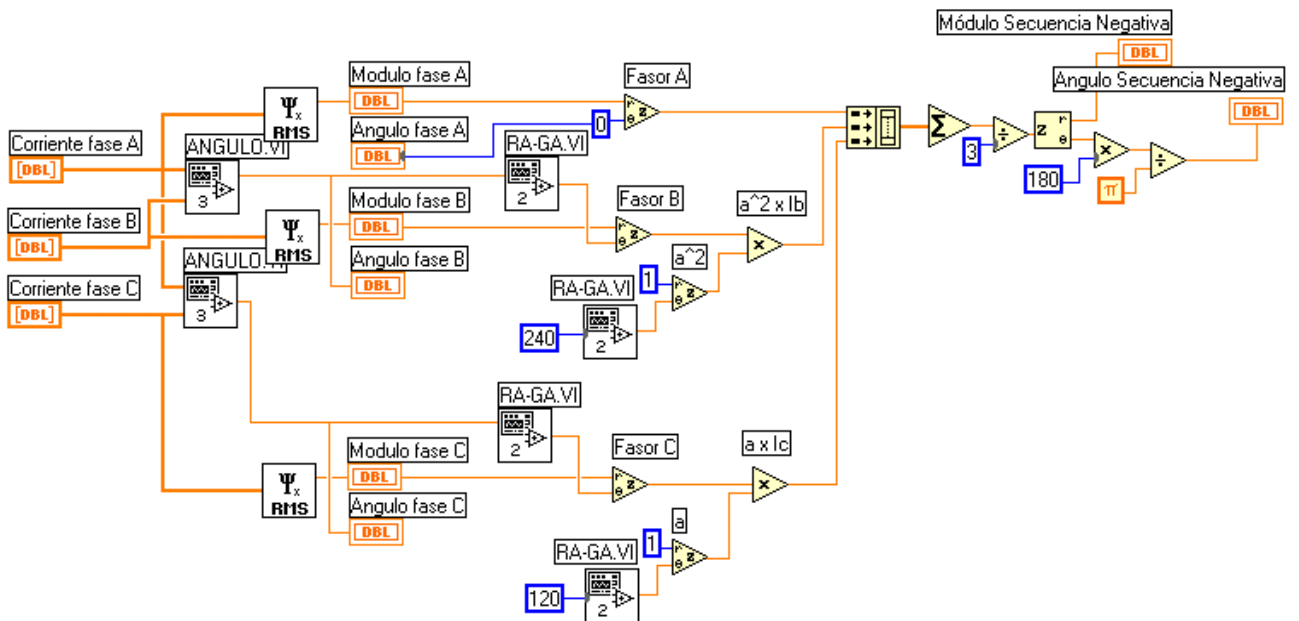


Figura 2.3.2.7 Diagrama del VI de Secuencia Negativa.

Entre las figuras del anexo 2 se pueden encontrar los diagramas y Paneles Frontales de los Relés de Secuencia Negativa de Tiempo Definido y Secuencia Cero. El funcionamiento de ambos es similar al explicado anteriormente, sólo que con las particularidades de cada relé. En estos diagramas se observarán unos VIs que calculan las secuencia positivas y ceros, pero funcionan de manera similar al VI que extrae la componente de secuencia negativa, insertado en el Diagrama del Relé de Secuencia Negativa de Tiempo Inverso. Sus diagramas se encuentran en figuras contiguas del anexo 2.

2.3.3 Relés Diferenciales

El funcionamiento de estos Relés se basa en las diferencias de las corrientes que entran en sus bornes y todas las expresiones que permiten modelar las diferentes variantes de éste, fueron mostradas en la sección 1.4.

El Panel Frontal, que sirve de interfase con el usuario, en los relés diferenciales del tipo instantáneos se presenta en la figura 2.3.3.0. Está constituido por los controles de ajustes clásicos que se han utilizados en casi todos los relés: **Tipo de Contactos**, **Corriente de Ajuste**, etc.

El **Tipo de Contacto** define la posición del contacto de **Estado** del relé luego de detectado y eliminado el fallo. Mediante el botón **Resetear** se podrán desactivar o abrir los contactos del relé cualquiera sea la condición.



Figura 2.3.3.0. Panel Frontal del Relé Diferencial Instantáneo.

La Corriente de operación del Relé (I_{op}) se mostrará constantemente en el editor numérico (**Operación(A)**) y mediante él se podrá comparar con el valor ajustado en el Relé. Las lámparas permiten visualizar los estados de detección y disparo respectivamente.

El diagrama o programa realizado para ejecutar las funciones de este Relé se muestra en la figura 2.3.3.1. Los nombre (Etiquetas) que poseen los controles en la ventana Panel, representan sus símbolos correspondiente en el Diagrama. Los símbolos representados por los nombre **Corrientes de Fase A** y **Corriente de Fase A1** son los arreglos que almacenan las muestras de corriente de la señales entrantes.

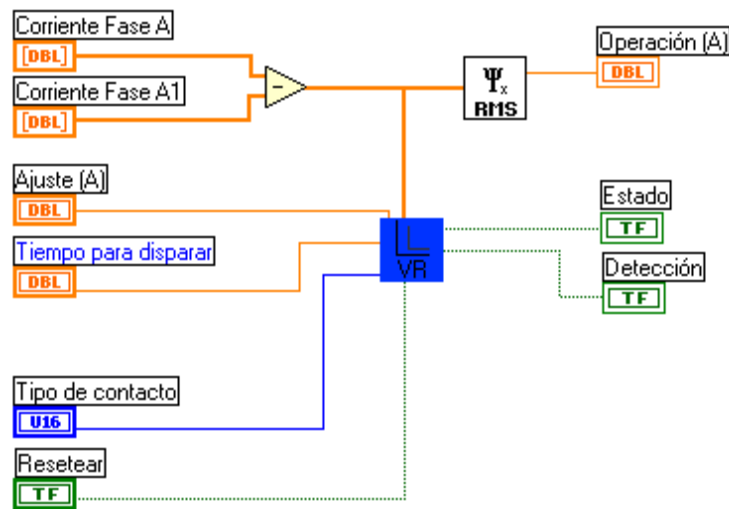


Figura 2.3.3.1. Diagrama de los Relés Diferenciales Instantáneos.

En la confección de este diagrama se insertó el VI correspondiente al Relé de Sobrecorriente de Tiempo Definido, pero este operará con una corriente igual a la diferencia de las corrientes que llegan a los bornes del Relé Diferencial. El diagrama correspondiente al VI insertado es mostrado en el anexo 2 y su explicación o funcionamiento es similar a los Relés de Sobrecorrientes explicados anteriormente.

El Relé Diferencial Trifásico es similar al anterior pero con 3 Relés de Sobrecorriente de Tiempo Definido y su Panel Frontal con su diagrama se muestra en la figuras del anexo 2. Cualquiera de los Relés de Sobrecorrientes que detecte el fallo activará los contactos del Relé Diferencial trifásico

Otros tipos de Relés Diferenciales que fueron diseñado fueron los del tipo de Retección. Las ecuaciones (1.18 - 1.25) que rigen estos tipos de relés, fueron mostradas y explicadas en el epígrafe 1.4. En este trabajo se diseñó sólo el relé de 2 rampas dado que mediante sus ajustes se puede convertir en un Relé de Porcentaje Diferencial de 1 rampa.

El panel frontal para este relé se muestra en la figura 2.3.3.2. Este relé posee varios controles que permiten al usuario hacer los ajustes correspondiente. El editor numérico representado por la etiqueta **Ajuste 1 (A)** constituirá I_{s1} , el control representado por el **Ajuste 2 (A)** es I_{s2} que representa el punto donde el relé cambia de dependencia. Los editores representados por **Factor K_1** y **Factor K_2** representan los factores o pendientes de las rampas, ver figura 1.4.1. Los otros controles son ya conocidos de los relés anteriores.

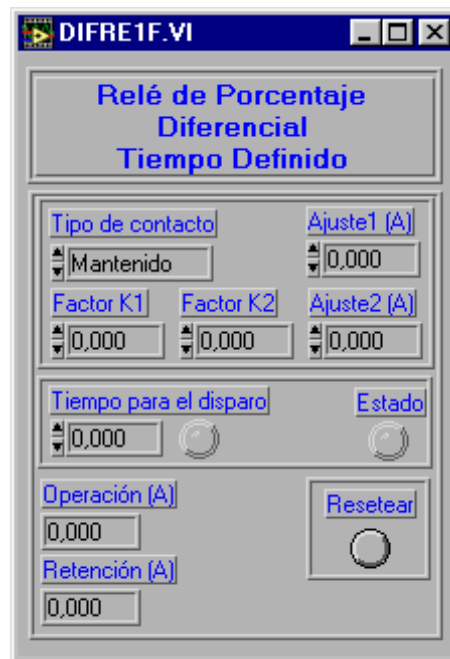


Figura 2.3.3.2. Panel Frontal del Relé de Porcentaje Diferencial.

Este relé también posee dos arreglos por donde recibe las muestras de corriente de las entradas y que están representado, en el diagrama que se presenta en la figura 2.3.3.3, como **Corriente de Fase A1** y **Corriente de Fase A**. En el Panel estos controles no se presentan dado que no contienen datos de interés para el usuario.

Las corrientes de retención (I_{ret}) y de operación (I_{op}) son calculadas usando funciones aritméticas sencillas según las expresiones (1.21) y (1.22). Fueron utilizadas las funciones de NODO FORMULA para evaluar las expresiones (1.23) y (1.24) mostradas en el capítulo 1 y que corresponden a las distintas rampas del relé.

Ambas expresiones devuelven los resultados de su evaluación pero se tomará en cuenta solo aquella que corresponda según la rampa. Si el valor de la corriente de retención (I_{ret}) es mayor que el valor ajustado en Ajuste 2 (I_{s2}), entonces se tomará en cuenta el resultado de la expresión que modela la segunda rampa y en caso contrario, el resultado de la primera función NODO FORMULA. Las restantes funciones que aparecen en lo adelante son conocidas de los otros relés y están dedicadas a ejecutar la demora de tiempo y las operaciones de activación de la lámpara de detección.

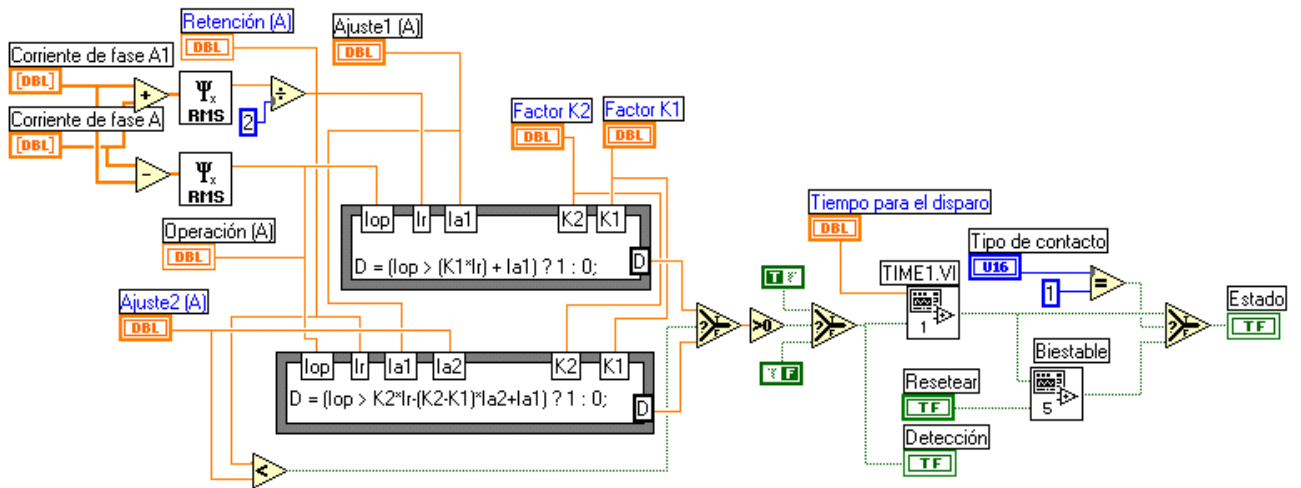


Figura 2.3.3.3. Diagrama del Relé de Porcentaje Diferencial de 2 rampas.

Los Relés de Porcentaje diferenciales trifásicos están constituidos por 3 relés de porcentajes monofásicos como el explicado anteriormente y cualquiera de estos relés, conectados a las distintas fases, que detecte un fallo activará la lámpara del relé trifásico. Se ha insertado un Visualizador en el Relé de Porcentaje Diferencial, mediante el cual se muestra la forma de operación de este relé en un Graficador del tipo (X,Y). Los valores de ajuste modificados por el operador son asimilados y visualizados en cada ciclo de ejecución, ver anexo 2.

2.3.4 Relés de Distancia

El principio de funcionamiento y las expresiones que modelan estos relés fueron tratados el capítulo 1 (sec.1.5). En este algoritmo solo aparece un parámetro que no tiene relación directa con los valores que generalmente se ajustan en estos relés y es **Div**.

En este trabajo se diseñaron 3 tipos diferentes de relés de distancia, los de características Elípticas, Rectilíneas y uno de característica compleja e irregular como los del tipo Cuadrilátero. Pero se explicará solo el primero y los demás se mostrarán en el anexo.

Relé de Distancia de característica Elíptica

Las expresiones que modelan el comportamiento de este relé están enumeradas desde 1.27 hasta 1.33 y el Panel Frontal diseñado para estos relés se muestra en la figura 2.3.3.4. Los controles numéricos **Ajuste 1 (A)** y **Ajuste 2 (A)**, corresponden a los mismo parámetros mencionados en las expresiones, Z_1 y Z_2 respectivamente. Los controles **Angulo** y **Divisor** corresponden a ϕ_{ajuste} y Div de las

expresiones del capítulo 1, los cuales también pueden ser modificados por el operador. Los otros controles fueron tratados en Relés anteriores.



Figura 2.3.3.4. Panel Frontal de los Relés de Distancia del tipo Elipsoidal.

Además de los controles mencionados anteriormente, en el Panel están insertados dos arreglos que almacenan las muestras de **Tensión** y la **Corriente** que les serán conectadas en sus bornes de entrada. En la figura 2.3.3.5 se muestra el programa construido al respecto y inicialmente las señales provenientes de los arreglos son filtradas quedando solamente para el cálculo las componentes del armónico de frecuencia fundamental.

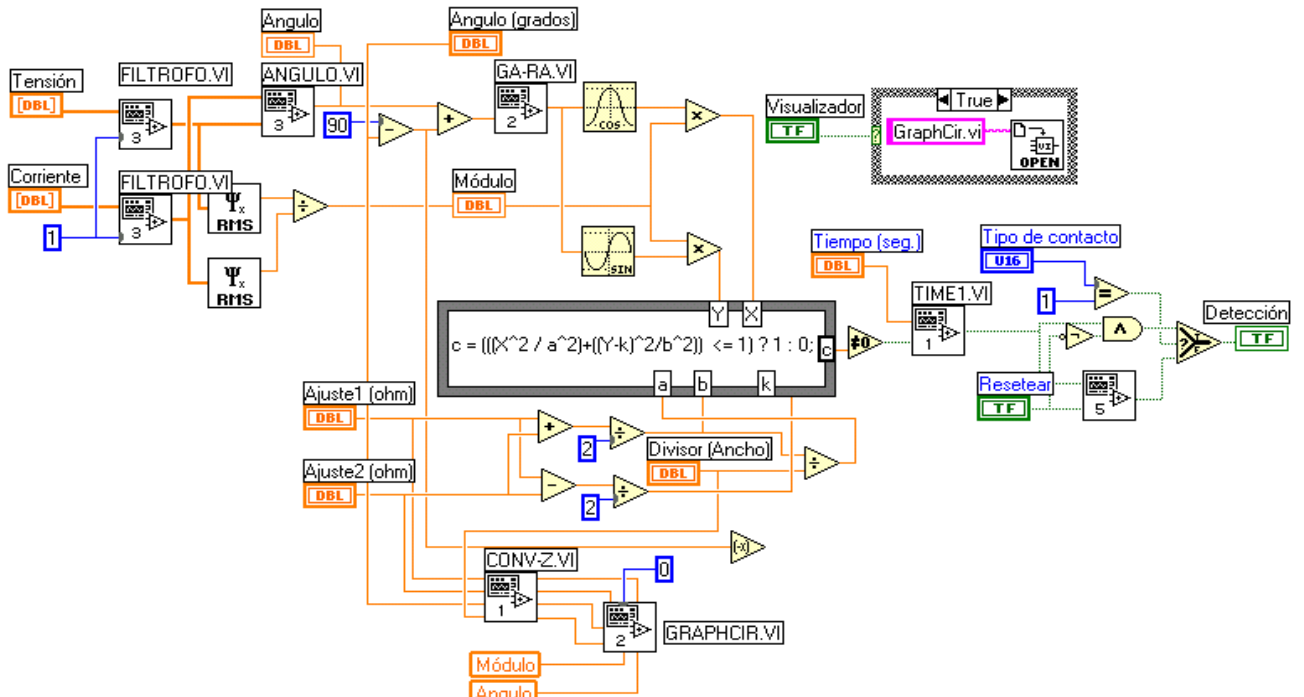


Figura 2.3.3.5. Diagrama del Relé de Distancia del tipo Elipsoidal.

Luego se halla el módulo y el ángulo de la impedancia, utilizando para esto el VI ANGULO que fue explicado en este mismo capítulo. Luego de obtenido el valor complejo de la impedancia, utilizando las expresiones 1.27 - 1.32, se insertan todos los datos en un NODO FORMULA que es quien finalmente evalúa si el punto está o no en la zona de operación o lo que es lo mismo en el interior de la elipse.

Las restantes funciones utilizadas son las mismas que se utilizan en todos los Relés con el objetivo de realizar o ejecutar las demoras de tiempos correspondientes y todo el proceso de activación y desactivación de la lámpara de estado.

Dentro de una función CASE controlada por el botón Visualizador se encuentra la función OPEN que abre un VI que está siendo ejecutado. En este caso corresponde con GRAPHCIR.VI que no es más que un módulo encargado de la visualización del la elipse dependiente de los ajustes y del punto correspondiente a la impedancia. Esto permite mostrar de forma gráfica cuando el fallo está o no en la zona de disparo. Un ejemplo de esto se muestra en la figura 2.3.3.6.

Este ejemplo corresponde al caso de un Relé de Distancia de tipo elipsoidal ajustado a:

$$Z_1 = 1$$

$$Z_2 = 0$$

$$\varphi_{\text{ajuste}} = 60$$

$$\text{Div} = 4$$

Donde:

Z_1 Impedancia de alcance en sentido directo.

Z_2 Impedancia en sentido inverso.

φ Ángulo con respecto al eje de las resistencias de la elipse.

Div Divisor del radio horizontal con respecto al radio vertical de la elipse

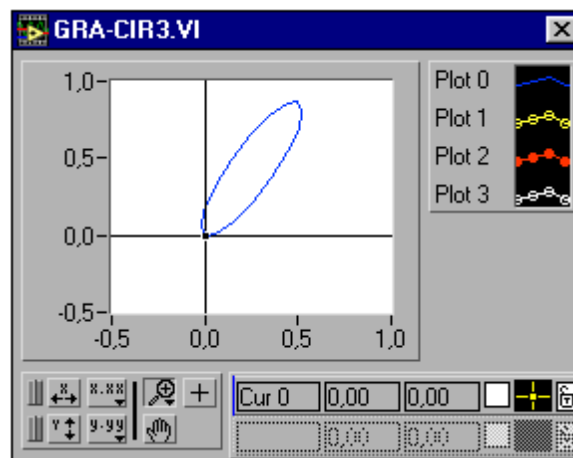


Figura 2.3.3.6. Panel del Visualizador del Relé de tipo Elipsoidal.

El diagrama para la confección de este relé se muestra en la figura 2.3.3.7. La primera función es un ciclo del tipo FOR I = 0 TO N-1, en la cual están insertados todas las funciones necesarias para crear una circunferencia desplazada a un ángulo cualquiera del eje de las resistencias. En la función NODO FORMULA están todas las expresiones que representan la elipse en forma paramétrica.

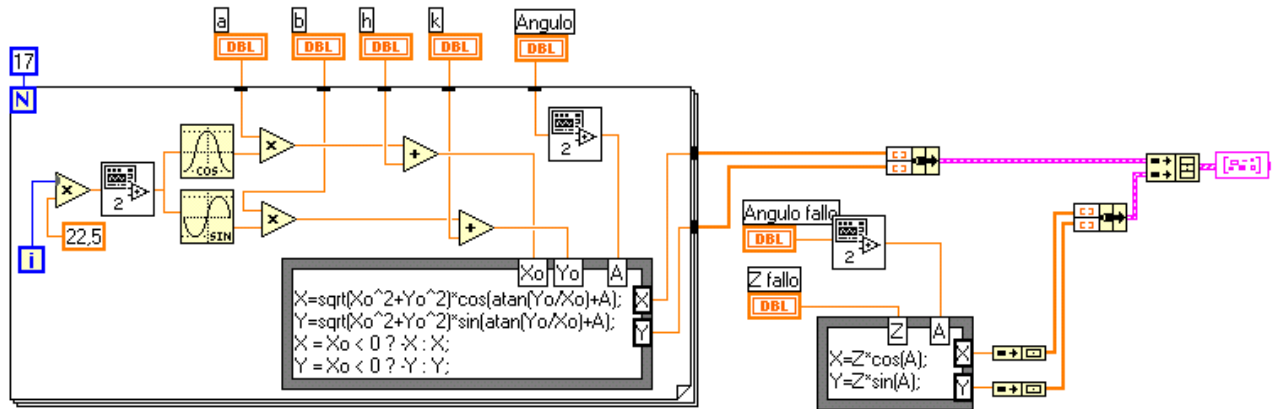


Figura 2.3.3.7. Diagrama del Visualizador de Ajuste del relé de Distancia tipo Elipsoidal.

En la salida del ciclo, en conjunto con el punto de la impedancia, se obtienen los arreglos que contienen los puntos que se mostrarán en el Graficador del tipo (X , Y). Los cambios en los ajustes son captados en cada ciclo de ejecución de LabView. Este VI de representación de los ajustes de los Relés de Distancia detiene momentáneamente la ejecución de LabView, mientras dure el ciclo del cálculo parametrizado de la elipse, y esto afecta la ejecución de los restantes relés. Por esta razón estos VIs se configuraron con las más baja prioridad de ejecución.

El Panel Frontal y el Diagrama de los restantes Relés de Distancia con características diferentes a las elipsoidales se podrán encontrar en el anexo 2.

2.4. Simulador de Fallos

Todos estos Relés fueron diseñados y para su comprobación fue necesario construir un Simulador de Fallos. Este simulador genera constantemente un señal senoidal de 36 muestras por ciclos. Se incluyen las posibilidades de cambiar súbitamente las amplitudes y las fases de estas señales senoidales. También se le puede inyectar unas componentes de ruidos a las señales senoidales que se están generando mediante lo cual se simulan las oscilaciones normales que existen en las tensiones y corrientes en la realidad.

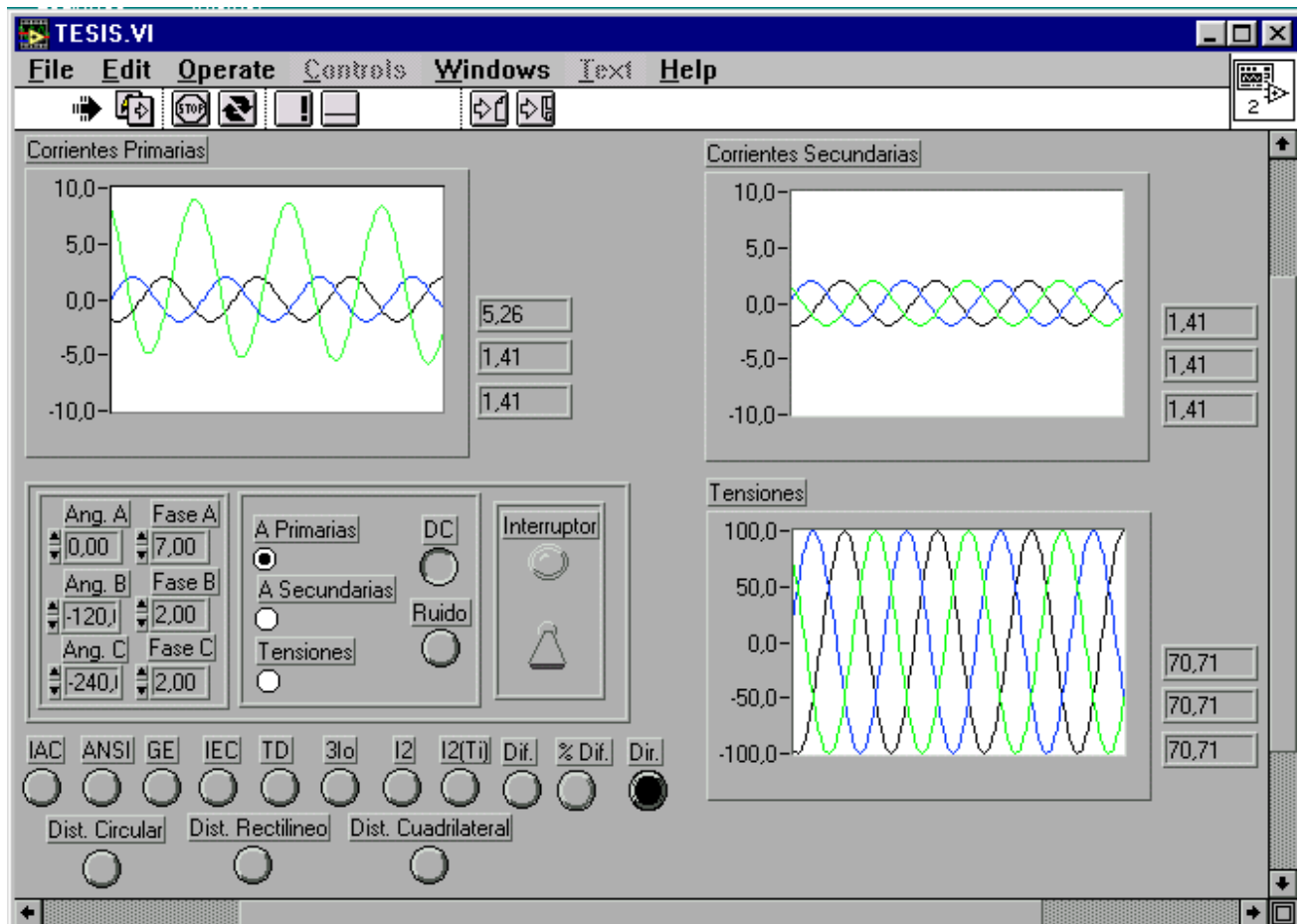


Figura 2.4.0. Panel Frontal del Simulador de Fallos.

Este simulador será obviado cuando en próximos trabajos los Relés se conecten al mundo real mediante tarjetas de adquisición con convertidores Análogos - Digitales y sus señales provengan de generadores de señales o de modelos analógicos de sistemas de potencias (Alexander⁴).

En la figura 2.4.0 se muestra el Panel Frontal del Simulador de Fallos. Se incluyeron 3 señales trifásicas, dos de corrientes y una de tensión. Las señales trifásicas de corrientes se definen como **Corrientes Primarias** y **Corrientes Secundarias**, las cuales simulan las señales del terminal de entrada y del terminal de salida de un elemento cualquiera de un sistema de potencia. Así como **Tensión** simula el voltaje en la barra principal.

Estas señales pueden variarse de forma independiente y sus valores no influyen en ninguna de las otras señales. Esto permite colocar los Relés Diferenciales, los Relés Direccionales y todos aquellos que en su conexión utilicen más de una señal de entrada.

En este simulador se incluyeron los VIs (Relés Virtuales) que fueron explicados anteriormente. Todos los Relés de Sobrecorrientes fueron conectados a las Corrientes Primarias. Los Relés Diferenciales se

conectan a las Corrientes Primarias y las Secundarias. El Relé Direccional, así como todos los tipos de Relés de Distancia fueron conectados a las Corriente Primarias y a las Tensiones.

En el anexo 2 se muestra el Diagrama del Simulador de Fallos o regímenes. Estas señales se generan utilizando un ciclo del tipo FOR $I = 0$ TO $N-1$ donde cada I representa un ángulo determinado del período de una onda senoidal. En esta aplicación se trabajó con 36 muestras por ciclo $N=36$ y los ángulos varían en intervalos de 10 hasta llegar a 360 grados que completan el ciclo.

En la figura 2.4.0, los botones que representan cada relé insertado, están controlando las funciones CASE que en la opción de Verdadero activan la función OPEN que abre el Panel del relé en cuestión. Esto permite abrir los relés luego de pulsado los botones mientras se ejecute la aplicación. Estos botones se desactivan solos, luego que dejen de ser presionados.

Los relés virtuales fueron insertados en esta aplicación y están representados por una etiqueta los que permite reconocer la forma de conexión a las señales generadas en el simulador. En la tabla 2.4.0 se muestran los nombres que identifican a cada relé en particular.

Tabla 2.4.0. Identificación de los Relés Virtuales en el Simulador.

Etiquetas de Identificación de los Relés	Tipos de Relés
OCGE3F.VI	Relé de Sobrecorriente Trifásico según la norma GE
OCIAC3F.VI	Relé de Sobrecorriente Trifásico según la norma IAC
OCANSI3F.VI	Relé de Sobrecorriente Trifásico según la norma ANSI
OCIEC3F.VI	Relé de Sobrecorriente Trifásico según la norma IEC
OCDT3F	Relé de Sobrecorriente Trifásico de Tiempo Definido
OCZERO.VI	Relé de Sobrecorriente de Secuencia Cero
OCNEG.VI	Relé de Sobrecorriente de Secuencia Negativa de Tiempo Definido
OCNEGTVI.VI	Relé de Sobrecorriente de Secuencia Negativa de Tiempo Inverso
DIF3F.VI	Relé Diferencial Trifásico del tipo Instantáneo
DIFRE3F.VI	Relé de Porcentaje Diferencial Trifásico de doble rampa
DIR3F90.VI	Relé Direccional Trifásico con conexión 90°
ELLIPCE3F.VI	Relé de Distancia Trifásico con característica elíptica
RECTA3F.VI	Relé de Distancia Trifásico con característica rectilínea
QUADRI3F.VI	Relé de Distancia Trifásico con características cuadrilateral

Fue construido una variante monofásica de cada uno de estos relé mencionados y la diferencia radica en que el nombre en vez de tener los caracteres 3F se sustituyen por su correspondiente 1F. Así por ejemplo, para seleccionar el Relé de Distancia de característica elipsoidal monofásico se debe buscar el nombre o el VI llamado ELLIPCE1F.VI. En todos los relés se cumple lo mismo.

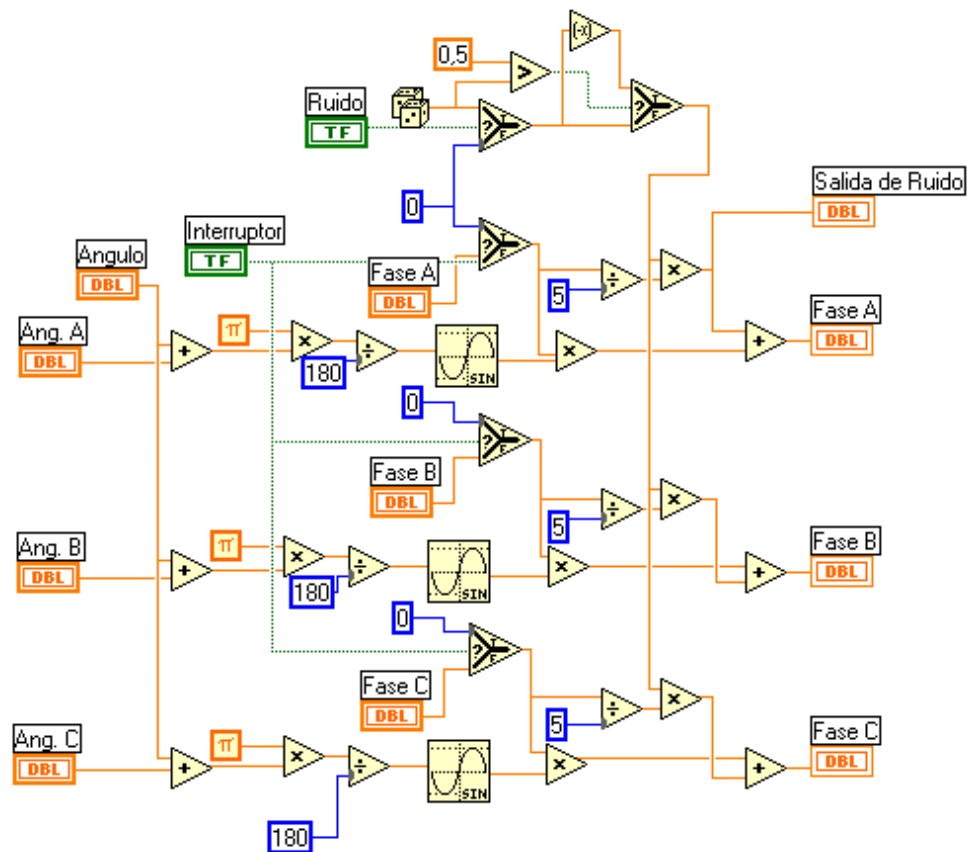


Figura 2.4.1. Diagrama de las fuentes trifásicas sinusoidales.

Dentro de la función cíclica se insertaron unos VIs que corresponden con las fuentes senoidales trifásicas, ver su diagrama en la figura 2.4.1. Funciones trigonométricas y aritméticas fueron utilizadas para generar las señales. La función de generación de un número aleatorio se utilizó para generar las componentes de ruidos que se le sumaran a las ondas senoidales generadas. El signo del ruido también tiene un carácter caótico.

2.5 Conclusiones

En este capítulo primeramente fueron mostradas las características de LabView como plataforma de programación, el cual brinda una serie de opciones como son: la posibilidad de crear y utilizar VIs unos dentro de otros, permitir prioridades de ejecución entre los VIs, poseer variadas funciones aritméticas y matemáticas, etc. Es un lenguaje sencillo y permite que los ingenieros o especialistas en materias no relacionadas con la informática puedan programar los algoritmos sin tener que dominar a fondo los aspectos más complicados de la programación; como por ejemplo, la Programación Orientada Objeto, Programación Visual, Arquitectura de computadoras, etc.

Otras funciones importantes que están incluida en la plataforma de programación escogida, son las relacionadas con las posibilidades de comunicación entre máquinas y con el medio exterior por medio de puertos o interfaces programables (tarjetas de adquisición de datos, puerto serie, puerto paralelo, etc.) que en futuras ampliaciones del trabajo serán de utilidad. Los programas en LabView más que un cúmulo de instrucciones ordenadas siguiendo la sintaxis de un lenguaje en específico representan exactamente el diagrama de flujos o de bloques del proceso dado; por tanto, su comprensión luego de realizado el programa es más sencilla.

Las expresiones y algoritmos planteados en el capítulo 1 fueron implementadas y con ellas se construyeron los Relés Virtuales siguientes: Relés de Sobrecorriente (tiempo definido y tiempo inverso), Relés de Secuencia (secuencia cero y secuencia negativa de tiempo definido, y secuencia negativa de tiempo inverso para la protección de máquinas eléctricas rotatorias), Relés Direccionales de Potencia (conexión 30°, 60° y 90°), Relés Diferenciales (instantáneos y de porcentaje diferencial) y finalmente Relés de Distancia (impedancia, mho o resistencia, mho desplazado, elípticos, reactancia, impedancia - ángulo).

Algunos Relés Trifásicos y otros de características más complejas fueron diseñados con la combinación de otros más sencillos utilizando la opción Reentrante; es decir, LabView los ejecutará varias veces en un mismo ciclo de operación. Dentro de estos VIs más sencillos diseñados fue necesario insertar otros tales como: Temporizadores, Filtros, Detectores de Angulo de desfase, etc.

En los Relés de Distancia y Diferenciales se construyeron unos Visualizadores que permiten ver los cambios de ajuste en forma gráfica y además, analizar y observar la operación del relé bajo ciertas condiciones de funcionamiento. Esto es una ventaja que no se ha encontrado todavía en los Relés reales debido a la poca capacidad de sus pantallas (de forma general son pantallas de caracteres) y al temor de la pérdida de información producto a demoras innecesarias. La posibilidad de visualizar los ajustes y las mediciones en forma gráfica en aquellos relés de características complejas, permitirá obtener grandes avances en el proceso de enseñanza y aprendizaje que por parte de los docentes se lleva a cabo, y que en las materias de protecciones eléctricas resulta muy complejo debido al grado de abstracción que deben alcanzar los estudiantes para comprender los nuevos temas a que se enfrentan.

Se construyó un Simulador de Fallos con la posibilidad de generar señales de corrientes y tensiones que permitan conectar y comprobar el funcionamiento de todos los Relés Virtuales diseñados. Este simulador genera cortocircuitos o sobrecorrientes con componentes de corriente directa, cambias

súbitos de fase en las señales que se desean, hasta incluso las señales fásicas. Se pueden generar cortocircuitos trifásicos, monofásicos y bifásicos, así como caídas de tensiones al niveles muy bajos. Se le adicionó la posibilidad de generar las señales con un determinado componente de ruido para simular con más exactitud las señales que en la realidad miden estos relés.

Las aplicaciones y las pruebas efectuadas a estos relés serán mostradas en el capítulo siguiente. Primeramente se abordarán las opciones y posibilidades del Simulador de Fallos en virtud de que sirva como un manual de los usuarios para su utilización, luego se mostrarán y describirán los experimentos realizados a los relés con el objeto de que éstos ensayos validen el funcionamiento de los mismos.

Capítulo 3: Validación de los Relés Virtuales

3.1 Introducción

Al sistema formado por el Simulador y los Relés Virtuales se llama **Laboratorio Virtual de Protecciones Eléctricas por Relé**, y se podrá utilizar por estudiantes principiantes en el tema de las protecciones o por especialistas que estén investigando un fenómeno o condición en específico. Una condición fundamental para la utilización del Laboratorio Virtual es el conocimiento teórico de los ajustes de los distintos Relés y de los procesos transitorios que se forman en el Sistema Eléctrico de Potencia.

En este capítulo se le dará respuesta a la pregunta si estos Relés Virtuales simulan verdaderamente a sus duales de la práctica. Este proceso es conocido como validación de modelos y para esto se escogerá una situación real en la que se conocen las características de operación de los relés reales y sus ajustes.

La Empresa Cmdte. Pedro Sotto Alba de MOA posee un sistema de suministro conformado por una línea aérea de 4.96 millas, que transporta la energía desde la subestación de CENTENOS a 33 kV y un transformador reductor que entrega la energía a la empresa proveniente del SEN a 13.8 kV. Las protecciones incluidas en esta sección de la empresa fueron tomadas para hacer la validación de los relés virtuales.

Antes de mostrar los resultados de la validación del funcionamiento de los relés, primeramente se describirán las características fundamentales del Simulador de Fallos de tal forma que sirva como un manual de usuario para la utilización del Laboratorio Virtual. Esto facilitará la repetición de los experimentos por otros investigadores.

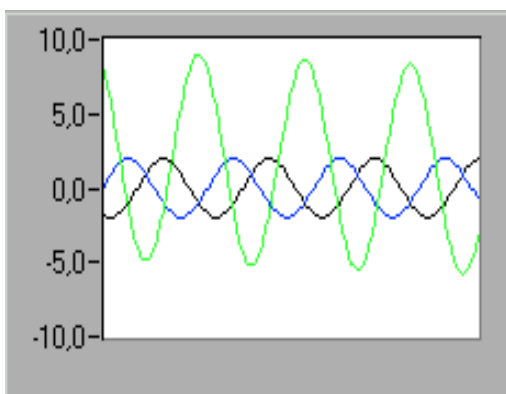
3.2 Descripción de la Instalación

En este epígrafe se abordarán en detalles las partes integrantes del Simulador de Fallos en el cual han sido insertados todos los Relés Virtuales del tipo trifásico conformando así un laboratorio Virtual de Protecciones Eléctricas. En el capítulo 2 fueron tratados de manera general todos estos dispositivos, pero allí no fueron mostradas las características del funcionamiento del Simulador de Fallos; es decir, como manipularlo y como generar las perturbaciones deseadas con las cuales operarían los Relés virtuales.

El simulador fue creado para la comprobación del funcionamiento de los Relés Virtuales y por tanto tiene incluidas solamente las señales necesarias para el funcionamiento de los mismos. Está constituido por dos señales de corrientes (Corrientes Primarias y Corrientes Secundarias) y una señal que representa la Tensión, ver figura 2.4.0 en el capítulo 2.

Los Relés de Sobrecorrientes están conectados a las Corrientes Primarias. Las Corrientes Secundarias fueron creadas para en unión con las Corrientes Primarias permitir la comprobación de los Relés Diferenciales cualquiera sea su tipo. Algunos de los Relés Virtuales creados necesitan medir señales de tensión y de corriente como es el caso de los Relés Direccionales y de Distancia para eso se incluyó la señal de Tensión.



El control de la generación de las señales se realiza por un mismo punto y será explicado más adelante, lo que provoca que no se pueda controlar los niveles de generación de las tres señales al mismo tiempo. Esta característica impide simular cambios súbitos de más de dos parámetros a la vez; por ejemplo, simular una sobrecorriente acompañada de un descenso de la tensión, todo esto precedido de un estado normal de funcionamiento del sistema.



En el simulador fueron instalados tres de este tipo de controles los que representan los graficadores o los monitores del Simulador. En ellos se muestran las señales generadas las cuales están siendo inyectadas a los distintos relés Virtuales. Estos graficadores no poseen escalado en las abscisas dado que esta representa el tiempo y el usuario no tiene las posibilidades de modificarlo. El eje de las ordenadas

representa los valores instantáneos de las magnitudes en cuestión y a éste si es necesario en muchos casos cambiarle la escala.

El cambio de escala se puede hacer de dos formas y cada una tiene sus propias ventajas :

1. Escribiendo el número máximo y mínimo encima del eje de las ordenadas utilizando para esto los botones  o  que aparecen en la barra de herramientas del principal.
2. Accediendo mediante el botón derecho del ratón a la opción de autoescalado de los ejes coordenados.

Si se desea observar el proceso transitorio en desarrollo no se debe utilizar la variante 2 dado que la escala del graficador estará cambiando constantemente tratando de ajustarse a la amplitud máxima de la señal generada. El valor máximo que se escoja utilizando la variante 1 debe estar conforme al tipo de proceso transitorio que se va a simular, dado que en caso que se establezca la inyección de componentes de directa, provocará un aumento del valor máximo instantáneo de la señal hasta un valor igual al doble del módulo especificado a la señal correspondiente. Este fenómeno solo tiene lugar en las señales correspondientes a las Corrientes Primarias. La variante 2 puede ser utilizado para restablecer las condiciones iniciales de funcionamiento; o ya, cuando las señales estén estabilizadas.



Esta sección está destinada a la parametrización de los disturbios. Los editores numéricos **Fase** y **Ang.** son los valores máximos y de ángulo de desfase de las señales que se mostrarán en los respectivos gráficas.

Estos controles son comunes a las tres señales generadas Corrientes (Primarias y Secundarias) y Tensiones. Los pequeños botones blancos (conocidos como **radiobutton** en el argot de la informática), que aparecen a la derecha de los editores numéricos; son utilizados para enviar los parámetros entrados hacia los generadores correspondientes. Si se desea establecer las señales de Corrientes Primarias como simétricas y con máximo igual a la unidad, se debe presionar el botón correspondiente (**A Primarias**) y observar el cambio en el graficador. Estos botones no se desactivan solos, para trabajar en otra parametrización sin que los cambios que se vayan a realizar afecten las señales correspondiente al radiobutton activado, se deben volver a presionar y con esto se desactivará. Ellos se activan y desactivan mediante el ratón.

Los botones representados por las etiquetas DC y Ruido se utilizan para incorporar componentes de corrientes directa y ruidos aleatorios a las señales. El botón DC se debe presionar antes de enviar los parámetros mediante los radiobuttons hacia la señal correspondiente. Esto incorporará un exponencial decreciente que simulará las componentes de directa que aparecen durante los procesos transitorios provocados por cortocircuitos. Este botón tiene las misma característica que los radiobuttons, hay que volverlos a presionar y desactivarlos cuando haya pasado los efectos desplazantes de las componentes de corriente directa.

El botón Ruido incorpora una señal aleatoria de un 10% del módulo de la señal correspondiente, lo cual simula los ruidos que comúnmente aparecen en el procesos de medición de las señales reales. Este botón, a diferencia del anterior, tiene acción inmediata sobre las señales generadas.



La figura que se representa simula un interruptor, el cual controla la generación de las señales del Simulador. Si el interruptor está en posición OFF (arriba) ninguna señal es generada, por lo que los cambios realizados con los controles explicados anteriormente no se visualizarán en los graficadores. A este interruptor están conectados todos los relés,

actuando siempre para su desconexión. Para comenzar nuevamente la generación de las señales se debe operar manualmente el interruptor exactamente igual a como sucede en la realidad. El interruptor ejecutará la operación , utilizando el ratón, siempre y cuando no exista ningún relé con su Estado de salida cerrado que lo impida.

Algunos relés pueden estar configurados con sus contactos de salidas **Mantenidos**, lo que provocará que primero haya que resetear el Relé en cuestión antes de operar el interruptor. El Relé Direccional no actúa directamente sobre el estado del interruptor sino sobre los Relés de Sobrecorriente que se estén utilizando.



En la parte inferior del Simulador se han colocados los botones que representan los Relés Virtuales creados en el trabajo. Estos botones se reponen automáticamente cuando dejan de ser

presionados. Ellos muestran un color gris siempre que el relé no esté activado (se considera un relé activado cuando el Estado de su contacto sea ON, cerrado). Cuando algún relé acciona producto a la detección de un fallo, estos botones se tornan negros indicando su activación, permitiendo con esto reconocer cual de los relés fue el que operó para la condición de fallo simulada.

Cada uno de estos botones está representado por una etiqueta que representa a un Relé Virtual en específico. En la tabla 3.2.0 se muestran los tipos de relés representados por cada botón, estas etiquetas tienen nombres sugerentes que pueden ser fácilmente recordados. .

Tabla 3.2.0. Identificación de los Relés Virtuales en el Simulador.

Etiquetas	Relés Virtuales
IAC	Relé de Sobrecorriente de tiempo inverso según IAC.

ANSI	Relé de Sobrecorriente de tiempo inverso según ANSI.
GE	Relé de Sobrecorriente de tiempo inverso según GE.
IEC	Relé de Sobrecorriente de tiempo inverso según IEC.
TD	Relé de Sobrecorriente de tiempo definido.
3I _o	Relé de Sobrecorriente de Secuencia Cero de tiempo definido.
I ₂	Relé de Sobrecorriente de Secuencia Negativa de tiempo definido.
I ₂ (T _i)	Relé de Sobrecorriente de Secuencia Negativa de tiempo inverso.
Dif.	Relé Diferencial de tipo Instantáneo.
%Dif	Relé de Porcentaje Diferencial de dos rampas.
Dir	Relé Direccional, conexión 90°.
Dist. Circular	Relé de Distancia de Característica Circular.
Dist. Rectilíneo	Relé de Distancia de Característica Rectilínea.
Dist. Cuadrilateral	Relé de Distancia Cuadrilateral.

Generalmente los relés están reseteados, lo que provoca que cuando se inicie la aplicación no funcionen o no actúen sobre el interruptor en presencia de disturbios. Cuando se desee comprobar el funcionamiento de un Relé en específico los demás deben permanecer reseteados para que no influyan en las comprobaciones de éste. Se oprime el botón correspondiente al relé en estudio en el Simulador y se libera el botón resetear ; cuando se termine la comprobación se vuelve a desactivar.

Siempre que un Relé haya actuado sobre el interruptor se detendrá el proceso de generación de señales, exactamente igual a como suele ocurrir en la realidad, pero esto no significa que los valores parametrizados por fases hayan cambiado. Después de la apertura del interruptor se deben restablecer las condiciones normales de funcionamiento del sistema o del Simulador.

3.3 Comprobación del funcionamiento de los Relés Virtuales.

La metodología general que se seguirá para validar el funcionamiento de los relés será la comparación con un caso real. Se tomarán los valores históricos y de ajustes de los relés MULTILIN utilizados para la protección de la subestación de entrada de la Empresa MOA Nickel S.A que se encuentra en MOA, provincia Holguín.

Esta empresa posee generación propia, pero en ocasiones de déficit de energía se conecta al suministro del SEN mediante una subestación reductora que posee un transformador de 6.3 MW (33kV / 13.8kV). El suministro de energía proviene de una subestación de distribución que está situada a 4.96 millas de la empresa, mediante una línea aérea simple circuito.

En la figura 1 del anexo 3 se muestra el monolineal simplificado de la empresa que se utilizó para el cálculo de los niveles de cortocircuitos y en el cual se incluyen los parámetros más importantes de cada elemento del sistema eléctrico de la fábrica. Este monolineal corresponde con el esquema actual

de la empresa, pero se está trabajando en la modernización de dicha subestación para la implantación de otro transformador reductor de mucho más potencia y un esquema de suministro más confiable.

Actualmente la fábrica posee dos generadores sincrónicos de 6 MW que trabajan sincronizados y que suministran casi la totalidad de la energía de las plantas metalúrgicas que existen. El punto de distribución principal de la empresa está compuesto por cuatro secciones de barras enlazados mediante interruptores, no automáticos, de potencia. El esquema continua hasta una subestación interna de la empresa que alimenta los elementos de servicio de la planta Termoeléctrica.

Los Relés Virtuales se ajustarán iguales a los relés MULTILIN de la firma General Electric instalados en la subestación reductora, y se les simularán sobrecorriente de la misma magnitud que las que alcanza los cortocircuitos en distintos puntos del circuito de la empresa. Como se conoce el comportamiento de los relés reales conectados en la subestación, los relés virtuales deben comportarse de la misma manera siguiendo exactamente las mismas características o propiedades : sensibilidad, selectividad, velocidad de respuesta, etc.

3.3.1 Ajustes de los Relés

En la figura 3.3.1.0 se muestra una vista específica de las protecciones de la subestación donde se incluyen las funciones de protección representadas por la numeración ANSI. Se simularán los relés conectados a los interruptores que protegen al transformador por el devanado de alta y el devanado de baja. Los ajustes que poseen los relés reales están referidos a las corrientes primarias del transformador de corriente (TC), dado que estos relés tienen incluidos las constantes de transformación de los mismos. Los relés virtuales no tienen esta opción por tanto sus ajustes deben estar referidos al devanado secundario de los transformadores de corriente.

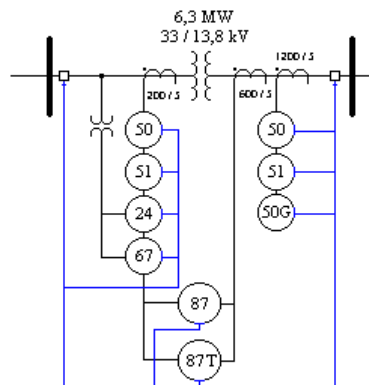


Figura 3.3.1.0. Esquema simplificado de las protecciones eléctricas instaladas en la subestación de entrada de la Empresa Pedro Sotto Alba.

Interruptor (33 kV)

Los relés que se mostrarán a continuación están destinados a la protección de la línea de transmisión que une la fabrica con el SEN. Están conectados directamente a transformadores de corriente con relación de transformación de 200/5.

- Relé de sobrecorriente instantáneo (50)

Parámetro	Real	Virtual
Corriente de ajuste	1.5xTC	7.5A
Tiempo de Disparo	0.4 s	0.4s

- Relé de Sobrecorriente. Tiempo Inverso (51)

Parámetro	Real	Virtual
Corriente de ajuste	0.8xTC	4A
Tipo de Curva	ANSI Normalmente Inversa	ANSI Normalmente Inversa
Múltiplo	2	2

- Relé Direccional (67)

Parámetro	Real	Virtual
Ángulo de máxima sensibilidad	30°	210°
Conexión	90°	90°
Sentido	Inverso	-

El sentido inverso del relé direccional real significa que la dirección permisible es hacia el sistema; es decir, operará cuando las corrientes de cortocircuitos se dirijan desde la fábrica hacia el SEN. Esto es una característica del relé Multilin que no fue incluida en el relé direccional virtual.

- Relé de Distancia (24)

Parámetro	Real	Virtual
Tipo de Característica	Impedancia	Elíptico
Impedancia de ajuste	0.8 Ω	Ajuste 1 = 0.8 Ω / 45° Ajuste 2 = 0.8 Ω Div = 1
Tiempo de disparo	0.5 s	0.5 s

Aunque esta protección no está realmente instalada en la realidad, se realizó este ajuste ideal con el fin de comprobar el funcionamiento de los relés de distancia virtuales de característica elipsoidal. Este relé estará protegiendo la Línea que une la fábrica con la subestación y parte del Transformador de Potencia. Como tiene una demora de tiempo actuará como respaldo de las protecciones más rápidas que están instaladas.

Interruptor (13.8 kV)

Todos los relés que se mostrarán a continuación están destinados a la protección (respaldo) de los consumidores conectados directamente a la barra de la subestación reductora; en este caso son alimentadores aéreos. Los transformadores de corrientes utilizados están conectados en estrella y tienen una relación de transformación de 1200/5.

- Relé de sobrecorriente, tiempo definido (50)

Parámetro	Real	Virtual
Corriente de ajuste	0.6xTC	3 A
Tiempo de Disparo	0.5 s	0.5 s

- Relé de Sobrecorriente, tiempo inverso (51)

Parámetro	Real	Virtual
Corriente de ajuste	0.3xTC	1.5A
Tipo de Curva	ANSI Normalmente Inversa	ANSI Normalmente Inversa
Multiplo	4	4

- Relé de secuencia cero, tiempo definido (50G)

Parámetro	Real	Virtual
Corriente de ajuste	1xTC	5
Tiempo de Disparo	0.5 s	0.5

Esta protección al igual que la de distancia es ideal; es decir, no está instalada en la realidad. Con el fin de comprobar el funcionamiento de los relés de secuencia cero virtuales se implemento este ajuste arbitrario.

En el devanado de baja tensión existe un relé direccional de potencia que utiliza conexión 30° pero que posee ajustes en niveles de potencia. Como en nuestro caso no fue diseñado un relé con tales características no se simulará.

Transformador de potencia (33/ 13.8 kV)

- Relé de Porcentaje Diferencial (87P)

Para esta protección se utilizarón los transformadores 200/5 conectados en estrella en el devanado de alta y los otros transformadores de 600/5 también conectados en estrella en el devanado de baja. Para el caso de los transformadores 600/5 se simularán como si estuvieran conectados en delta

(corrector de los 30° desplazamiento), debido a que los relés virtuales no poseen las mismas características de los relés MULTILIN.

Parámetro	Real	Virtual
Corriente de mínima de operación I_{s1}	0.3xTC	1.5A
Corriente umbral para el cambio de rampa	2xTC	10A
Pendiente de la primer rampa	25%	0.25
Pendiente de la segunda rampa	100%	1
Tiempo de operación	0 s	0 s

- Relé Diferencial Instantáneo (87).

Parámetro	Real	Virtual
Corriente de operación	8xTC	40A
Tiempo de operación	0 s	0 s

En el transformador existen otras protecciones habilitadas pero que no serán tratadas en este trabajo porque en muchos casos repiten las utilizadas en los interruptores.

3.3.2 Comprobación de la Selectividad y la Sensibilidad.

Se calcularon cortocircuitos en distintos puntos del esquema de la empresa y utilizando el Simulador de Fallos, se generan señales sinusoidales de igual magnitud a las calculadas en los distintos puntos. Las señales que se generan están referidas al devanado secundario de los transformadores de corriente y dependerán entonces de las constantes de transformación y de la conexión de los mismos.

En transformadores de corrientes conectados en estrella, la relación entre la corriente de fase y la que circula por el relé es la siguiente :

$$I_r = \frac{I_{fase}}{TC} \quad (3.1)$$

donde :

I_{fase} Corriente que circula por la fase.

TC Relación de transformación de los transformadores de corrientes.

I_r Corriente que circula por el relé. Esta expresión se puede aplicar a todas las fases.

Cuando los transformadores de corrientes están conectados en delta la relación entre las corrientes de fases y las corrientes que circulan por los relés son las siguientes :

$$I_s = \frac{I_{fase}}{TC} \quad (3.2)$$

$$I_{ra} = I_{sa} - I_{sc} \quad (3.3)$$

$$I_{rb} = I_{sb} - I_{sa} \quad (3.4)$$

$$I_{rc} = I_{sc} - I_{sb} \quad (3.5)$$

donde :

I_{fase} Corriente que circula por la fase

I_s Corriente secundaria de un transformador de corriente.

I_{sa}, I_{sb}, I_{sc} Corrientes secundarias de los transformadores de corrientes conectados a las fases (a,b,c).

I_{ra}, I_{rb}, I_{rc} Corrientes que circulan por los relés que protegen las fases (a,b,c).

Los transformadores de corrientes conectados en el secundario del transformador de potencia, utilizados para la protección diferencial del transformador, tienen una relación de transformación de 600/5. Aunque el transformador de potencia posee una conexión delta - estrella y por consiguiente existe un desplazamiento de 30° entre las corrientes de ambos devanados producto a la conexión, los TC están conectados en estrellas dado que el relé realiza las transformaciones pertinentes en su interior mediante software.

A continuación se tabulan los datos resultantes de las corrientes de cortocircuito que aparecen en las fases del devanado de alta y de baja del transformador de potencia. Estos cálculos se realizaron con el software profesional **EazyPower** el cual utiliza el método de la matriz impedancia de barra.

Tabla 3.3.2.0. Resultado de los cálculos para cortocircuitos trifásicos.

Punto de cortocircuito	Voltaje de fase (devanado primario)			Corriente (devanado primario)			Corriente (devanado secundario)		
	A	B	C	A	B	C	A	B	C
12	3.23 kV -26.68°	3.23 kV -146.7°	3.23 kV 93.35°	789.2 A 98.60°	789.2 A -141.41°	789.2 A -21.41°	1887.2 A 128.61°	1887.2 A -111.43°	1887.2 A 8.58°
14	0 -26.68°	0 -146.95°	0 93.10°	1505.8 A -78.8°	1505.8 A 41.18°	1505.8 A 161.18°	2214.8 A 123.47°	2214.8 A -116.56°	2214.8 A 3.46°
13	9.81 kV -26.67	9.81 kV -146.69°	9.81 kV 93.35	733.2 A -112.36°	733.2 A 7.66°	733.2 A 127.68°	6331.8 A 92.19°	6333.8 A -148.17°	6331.8 A -28.15°
7	9.81 kV -27.05	9.87 kV -147.07°	9.87 kV 93.10°	727.6 A -111.99°	727.6 A 8.02°	727.6 A 128.02°	1740 A -81.89°	1740 A 38.02°	1740 A 158.03°
2	16.11 kV -60.10°	16.11 kV 179.89°	16.11 kV 59.88°	232.6 A -138.19°	232.6 A -18.17°	232.6 A 101.83°	556.2 A -108.21°	556.2 A 11.81°	556.2 A 131.84°
8	16.54 kV -60.95°	16.54 kV 179.03°	16.54 kV 59.00°	199.7 A -132.42°	199.7 A -12.41°	199.7 A 107.61°	477.5 A -102.43°	477.5 A 17.58°	477.5 A 137.59°

Tabla 3.3.2.1. Resultado de los cálculos para cortocircuitos bifásicos.

Punto de cortocircuito	Voltaje de fase (devanado primario)			Corriente (devanado primario)			Corriente (devanado secundario)		
	A	B	C	A	B	C	A	B	C
12	19.04 kV 0.00°	11.06 kV -166.93°	8.63 kV 163.15°	1.2 A -74.76°	684.8 A 8.65°	685.0 A -171.45°	945.3 A -171.25°	1891.2 A 8.60°	945.9 A -171.56°
14	19.03 kV 0.00°	9.52 kV -180.0°	9.52 kV 180.0°	1.5 A -79.86°	1304.0 A -168.86°	1304.1 A 11.21°	1109.9 A -176.37°	2220.4 A -3.47°	1110.5 A -176.68°
13	9.81 kV	9.81 kV	9.81 kV	733.2 A	733.2 A	733.2 A	6331.8 A	6333.8 A	6331.8 A

	-26.67	-146.69°	93.35	-112.36°	7.66°	127.68°	92.19°	-148.17°	-28.15°
7	17.44 kV -16.30	16.90 kV -163.15°	9.81 kV 93.35°	366.6 A -171.77°	366.6 A -172.92°	733.2 A 7.66°	10 A -81.50°	5522.6 A 1.89°	5523.7 A -178.21°
2	16.86 kV -55.83°	19.00 kV -180.00°	16.89 kV 55.65°	201.6 A -167.58°	4.3 A 98.21°	201.3 A 11.19°	278.8 A -166.36°	277.7 A -170.83°	556.2 A 11.81°
8	17.06 kV -57.12°	19.00 kV 180.00°	17.33 kV 55.75°	172.9 A -161.71°	4.0 A 100.83°	172.5 A 16.97°	239.5 A -160.41°	237.6 A -164.36°	476.8 A 17.63°

Tabla 3.3.2.2. Resultado de los cálculos para cortocircuitos monofásicos.

Punto de cortocircuito	Voltaje de fase (devanado primario)			Corriente (devanado primario)			Corriente (devanado secundario)		
	A	B	C	A	B	C	A	B	C
12	3.09 kV -26.76°	16.06 kV -99.65°	17.34 kV 98.87°	755.1 A 98.60°	377.7 A -81.59°	377.5 A -81.31°	1564.0 A 98.5°	2.8 A -164.88°	1563.6 A -81.40°
14	0.00 kV -26.86°	21.50 kV -132.57°	22.48 kV 130.32°	1336.8 A -77.44°	228.3 A -83.92°	228.1 A -83.67°	945.3 A 96.21°	1.7 A -167.26°	945.1 A -83.79°
13	15.93 kV -36.40	16.00 kV -143.25°	19.03 kV 91.27	290.9 A -79.94°	290.9 A 100.46°	1.9 A 10.99°	2937.9 A 96.70°	1452.3 A -91.27°	1450.8 A -88.73°
7	16.02 kV -36.40	16.03 kV -143.58°	19.03 kV 88.73°	284.9 A -79.02°	284.9 A -101.34°	1.9 A 11.68°	2591.8 A -84.48°	1422.9 A -88.73°	1421.4 A -88.73°
2	19.14 kV -60.27°	18.99 kV -179.24°	18.93 kV 59.85°	10.3 A -3.93°	20.6 A 177.90°	10.3 A -0.27°	42.7 A -2.73°	42.8 A -178.52°	0.9 A 84.33°

En las fallas trifásicas, las corrientes y tensiones en los puntos calculados son simétrica, pero en el caso de las fallas bifásica y monofásicas a tierra, no. Durante la ocurrencia de las fallas monofásicas a tierra pueden aparecer corrientes elevadas en las fases no falladas sin que constituya esto un error en los cálculos; las conexiones del neutro de los elementos laterales al ramal donde se produce el fallo influye en la aparición de estas corrientes Chernobrovov (1974²⁰).

Las corrientes que pasan por los relés dependen, como se ha dicho, de las constantes de transformación de los transformadores de corriente y de sus conexiones. Para el caso de los transformadores de corriente de 600/5 utilizados por la protección diferencial del transformador, fue necesario utilizar las expresiones de la conexión delta, aunque en la realidad están conectados en estrella. Esto es debido a que el relé que se utiliza físicamente realiza las transformaciones internamente en el software, pero el Relé de Porcentaje Diferencial Virtual, no.

En el cálculo de las corrientes que circularán por los relés se utilizó **DVector** un software creado por el propio autor del trabajo. Este programa es una herramienta que facilita la implementación de diagramas vectoriales, permitiendo luego analizar y calcular los desfases entre vectores, calcular las componentes de secuencias, imprimir los diagramas vectoriales, etc.

Los resultados de los cálculos de los valores eficaces de las corrientes que circulan por los relés están en dependencia del tipo de transformador que se utilice, por ejemplo; las corrientes que circulan por el devanado secundario del transformador de potencia son transformadas de manera diferente por el

transformador de corriente que utiliza la Protección Diferencial 600/5 (conexión delta), que por el transformador de corriente que alimenta los relés conectado al interruptor de baja tensión ; 1200/5 (conexión estrella).

Tabla 3.3.2.3. Señales que circulan por los relés durante los cortocircuitos trifásicos.

	Fase	12	14	13	7	2	8
Transformador de potencial 33 kV/120 V	A	20.34 V -26.68°	0 V -26.94 °	61.79 V -26.27°	62.16 V -27.05°	101.47 V -60.10°	104.17 V -60.95°
	B	20.34 V -146.7°	0 V -146.95°	61.79 V -146.69°	62.16 V -147.07°	101.47 V 179.89°	104.17 V 179.03°
	C	20.34 V 93.35°	0 V 93.10°	61.79 V 93.35°	62.16 V 93.10°	101.47 V 59.88°	104.17 V 59.00°
Transformador de corriente 200/5 A	A	19.73 A 98.60°	37.65 A -78.80°	18.33 A -112.36°	18.19 A -111.99°	5.8 A -138.19°	4.99 A -132.42°
	B	19.73 A -141.41°	37.65 A 41.18°	18.33 A 7.66°	18.19 A 8.02°	5.8 A -18.17°	4.99 A -12.41°
	C	19.73 A -21.41°	37.65 A 161.18°	18.33 A 127.68°	18.19 A 128.02 °	5.8 A 101.83°	4.99 A 107.61°
Transformador de corriente 600/5 A	A	15.73 A 98.61°	18.46 A 93.47°	52.77 A 62.19°	14.5 A -111.89°	4.64 A -138.21°	3.98 A -132.43°
	B	15.73 A -141.43°	18.46 A -146.56°	52.77 A -178.17°	14.5 A 8.02°	4.64 A -18.19°	3.98 A -13.58°
	C	15.73 A -21.42°	18.46 A -33.46°	52.77 A -58.15°	14.5 A 128.03°	4.64 A 101.84°	3.98 A 107.59°
Transformador de corriente 1200/5 A	A	7.86 A 128.61°	9.23 A 123.47°	26.38 A 92.19°	7.25 A -81.89°	2.31 A -108.21°	1.99 A -102.43°
	B	7.86 A -111.43°	9.23 A -116.56°	26.38 A -148.17°	7.25 A 38.02°	2.31 A 11.81°	1.99 A 17.58°
	C	7.86 A 8.58°	9.23 A 3.46°	26.38 A -28.15°	7.25 A 158.03°	2.31 A 131.34°	1.99 A 137.59°

Tabla 3.3.2.4. Señales que circulan por los relés durante los cortocircuitos bifásicos.

	Fase	12	14	13	7	2	8
Transformador de potencial 33 kV/120 V	A	119.92 V 0.00°	119.86 V 0.00 °	109.84V -16.30°	109.72 V -16.43°	106.19 V -55.83°	107.45 V -57.12°
	B	69.66 V -166.93°	59.96 V -180.00°	106.44V -163.15°	106.63 V -163.08°	119.67 V 180.0°	119.67 V 180.0°
	C	54.35 V 163.15°	59.96 V 180.00°	61.79 V 93.35°	62.16V 93.10°	106.38 V 55.65°	109.15 V 55.75°
Transformador de corriente 200/5 A	A	0.03 A -74.76°	0.038 A -79.86°	9.165 A -171.77°	9.095A -171.42°	5.04 A -167.58°	4.32 A -161.71°
	B	17.12 A 8.65°	32.6 A -168.86°	9.165 A -172.92°	9.095 A -172.56°	0.11A -98.21°	0.1 A 100.83°
	C	17.13 A -171.45°	32.6 A 11.21°	18.33 A 7.66°	18.19 A 8.02 °	5.03 A 11.19°	4.31 A 16.97°
Transformador de corriente 600/5 A	A	0.02 A -81.40°	0.03 A -86.52°	26.58 A 1.68°	7.25 A -188.6°	4.02 A 192.42°	3.44 A -198.29°
	B	13.65A 8.65°	16.02 A 3.52°	26.56 A 2.00°	7.25 A 187.42°	0.09 A 95.14°	0.08 A 100.40°
	C	13.65A 188.55°	16.02 A 183.42°	53.14 A 181.84°	14.5 A 8.01°	4.01 A 11.20°	3.43 A 16.97°
	A	3.94 A -171.25°	4.62 A -176.37°	0.04 A -81°	0.04 A -81.31°	1.19 A	1.0 A -160.41°

Transformador de corriente 1200/5 A	B	7.88 A 8.6°	9.25 A 3.47°	23.0 A 1.89°	6.28 A -172.18°	-166.36° 1.16 A -170.03°	0.99 A -164.36°
	C	3.94 A -171.56°	4.63 A -176.68°	23.0 A -178.21°	6.28 A 8.20°	2.32 A 11.81°	1.99 A 17.63°

Tabla 3.3.2.5. Señales que circulan por los relés durante los cortocircuitos monofásicos.

	Fase	12	14	13	7	2
Transformador de potencial 33 kV/120 V	A	19.46 V -26.76°	0.00 V -26.86°	100.33V -36.40°	100.9 V -36.4°	120.55 V -60.27°
	B	101.15 V -99.65°	135.41 V -132.57°	100.77V -143.25°	100.96 V -143.58°	119.61 V -179.24°
	C	109.21 V 98.87°	141.59 V 130.32°	119.86 V 91.27°	19.86V 88.73°	119.23 V 59.85°
Transformador de corriente 200/5 A	A	18.88 A 98.6°	33.42 A -77.42°	7.27 A -79.94°	7.12A -79.02°	0.26 A -3.93°
	B	8.44 A -81.59°	5.71 A -83.92°	7.27 A 100.46°	7.12 A -101.34°	0.52A -177.9°
	C	8.44 A -81.31°	5.7 A -83.67°	0.05 A 10.99°	0.05 A 11.68°	0.26 A -0.27°
Transformador de corriente 600/5 A	A	15.04 A 98.55°	9.1 A 96.21°	21.09 A 94.91°	5.67 A -79.35°	0.21 A -2.73°
	B	7.52A -81.58°	4.55 A -83.92°	21.07 A -85.94°	5.66 A 100.66°	0.42 A 177.90°
	C	7.52A -81.32°	4.55 A -83.66°	0.31 A 1.85°	0.01 A 91.27°	0.21 A -1.48°
Transformador de corriente 1200/5 A	A	6.52 A 98.5°	3.94 A 96.21°	12.24 A 96.7°	10.8 A -84.48°	0.18 A -2.73°
	B	0.01 A -164.88°	0.01 A -167.26°	6.05 A -91.27°	5.93 A -88.73°	0.18 A -178.52°
	C	6.52 A -81.40°	3.94 A -83.79°	6.05 A -88.73°	5.92 A -88.73°	0.00 A 84.33°

Los Relés Virtuales seleccionados para simular el comportamiento de los que están instalados para accionar el interruptor de alta tensión, se alimentarán con señales de corrientes iguales a las calculadas en el transformador de corriente 200/5 y al transformador de potencial 33 kV/120 V.

Los Relés Diferenciales Virtuales se conectarán a las corrientes proveniente del transformador de corriente de 200/5 y 600/5. En cambio, los Relés de Sobrecorriente virtuales que simulan a los que están instalados para accionar el interruptor de baja tensión se alimentarán con señales iguales a las calculadas en el transformador de 1200/5.

En la tabla 3.3.2.6 se muestra la actuación de los relés en dependencia de la localización y el tipo de cortocircuito. Los tiempos de disparo de los relés 51 son resultados teóricos.

Tabla 3.3.2.6. Ensayos realizadas a los relés virtuales que validan su comportamiento

Cortocircuito		Interruptor 33 kV				Interruptor 13.8 kV			Transformador 33 / 13.8 kV	
Localización	Tipo	50	51	67	24	50	51	50G	87 P	87
12	3f	Si	1.21 s	Si	No	Si	2.25 s	No	No	No
	2f	Si	2.23 s	Si	No	Si	2.24 s	No	No	No
	1f	Si	1.84 s	Si	No	Si	2.90 s	No	No	No
14	3f	-	-	No	Si	Si	2.24 s	No	Si	No
	2f	-	-	No	Si	Si	2.24 s	No	Si	No
	1f	-	-	No	No	Si	8.67 s	No	Si	No
13	3f	-	-	No	No	Si	0.76 s	No	Si	Si
	2f	-	-	No	No	Si	0.85 s	No	Si	Si
	1f	-	-	No	No	Si	1.43 s	Si	Si	Si
7	3f	-	-	No	No	Si	1.68 s	No	No	No
	2f	-	-	No	No	Si	1.9 s	No	No	No
	1f	-	-	No	No	Si	1.18 s	Si	No	No
2	3f	-	-	No	No	No	15.77 s	No	No	No
	2f	-	-	No	No	No	16.45 s	No	No	No
	1f	-	-	No	No	No	No	No	No	No
8	3f	-	-	No	No	No	26.41 s	No	No	No
	2f	-	-	No	No	No	26.91 s	No	No	No

Con las magnitudes de corrientes de cortocircuito mostradas en las tablas 3.3.2.0 - 3.3.2.3 y realizando ajustes no arbitrarios de los relés, se puede comprobar el comportamiento de los otros tipos de relés no tratados aquí. Siguiendo esta metodología fueron comprobados todos los relés y en los de características más complejas, se utilizaron los visualizadores con el fin de comprobar visualmente su operación.

3.3.3. Comprobación de la Velocidad de Respuesta.

La comprobación realizada anteriormente verifica que los relés virtuales seleccionados operan de forma similar a como lo hacen los relés reales conectados o instalados en la subestación de entrada de la Empresa Pedro Sotro Alba. En el caso anterior se comprobó la operación de los relés, pero no se verificó la exactitud en la velocidad de respuesta de los mismos.

El tiempo de disparo en los Relés Virtuales de Tiempo Inverso es calculado siguiendo las normas explicadas en el capítulo 1 (sec. 1.2). Para los Relés Virtuales de Tiempo Definido, el tiempo es especificado por el operario que los esté utilizando. En cualquiera de los dos casos anteriores, pueden existir diferencias en el tiempo que el relé tiene que esperar; ya sea calculado o especificado, y el tiempo que verdaderamente él espera para hacer el disparo.

Estos errores en la velocidad de respuesta, están determinados por varias razones; en algunos casos conocidas y en otras no. El primer aspecto, y más claro, es que el Laboratorio Virtual está generando los fallos y al mismo tiempo realizando las funciones de los relés. En el capítulo 2 (sec. 2.2) se especificó que LabView (plataforma de programación) funciona siguiendo un gran ciclo donde se ejecutan todas las tareas cualquiera sea su velocidad. Es cierto que se pueden establecer prioridades, pero esto lo único que permitirá u obligará a LabView a ejecutar una tarea primero que otra. Finalmente se ejecutarán todas y la demora que provoca una tarea, afectará el funcionamiento de otra.

Atendiendo a ésta particularidad de la plataforma de programación, se puede descubrir otra causa de demoras en la utilización o activación de relés que no están siendo comprobados o utilizados en ese momento. Las demoras que éstos introduzcan, además de la demora que inserte el Simulador de Fallos, afectará el funcionamiento de los relés que se estén siendo comprobados.

Este fenómeno es bien conocido en la construcción de Dispositivos Digitales. Los autómatas o PLC tienen el mismo inconveniente y por esta razón, los especialistas que están automatizando un determinado proceso, tienen que chequear que el tiempo de ejecución de un ciclo de programación no supere el especificado por el fabricante. En ocasiones, los autómatas chequean ellos mismos que se cumplan el requerimiento anterior. Este aspecto es una de las limitantes que presentan los relés basados en las técnicas a microprocesadores, a la hora de realizar varias funciones de protección. El número de funciones de protección que realizará un determinado relé a microprocesador, estará determinado entre otras cosas por la complejidad de las expresiones o algoritmos matemáticos que vinculen las funciones de protección seleccionadas, la velocidad y capacidad del microprocesador que se utilice, la velocidad de los Conversores Análogo/Digital o del órgano de medición utilizado, etc.

Resumiendo, se puede decir, que las demoras excesivas en los Relés Virtuales pueden estar determinadas por: la activación de muchos relés al mismo tiempo, la característica de la plataforma de programación; un aspecto que no se ha mencionado, y que esta relacionado con el sistema operativo Windows sobre el cual funciona la aplicación; la velocidad de la máquina donde esté corriendo el Laboratorio Virtual, etc. Se conoce que todas estas razones pueden provocar demoras en los Relés Virtuales pero es imposible establecer una relación matemática exacta entre ellas, y por tanto será necesario hacer un análisis estadístico.

Para comprobar las afectaciones que sufren las velocidades de respuestas de los Relés Virtuales por una u otra causa, se tomó un Relé de Sobrecorriente de Tiempo Definido, al cual utilizando un cronómetro digital MANUAL se le midió el tiempo real de respuesta en diferentes condiciones de funcionamiento. Este conjunto de mediciones se realizaron variando la cantidad de Relés Virtuales activos, así como la complejidad de los mismos. El resultado de las mediciones realizadas se muestra en la tabla 1 del anexo 3.

Se escogieron 4 condiciones de operación en las cuales pudiera funcionar un Relé de Sobrecorriente de Tiempo Definido:

- a) Todos los otros Relés Virtuales desactivados.
- b) Estando activados los 4 Relés de Sobrecorriente de Tiempo Inverso.
- c) Activados los Relés de Sobrecorrientes de Tiempo Inverso y un Relé Direccional.
- d) La condición anterior (c), más el Relé de Distancia Elíptico.

Fueron tomadas un total de 52 mediciones en cada condición, para diferentes valores de ajustes del Relé Virtual de Tiempo Definido (10 s, 5s, 2s, 0s). Se ajustó el relé a 1 A y se efectuaron sobrecorrientes de 6 A en una sola fase.

Se calcularon los errores en las mediciones restando el valor esperado (tiempo ajustado en el relé) y el resultado de la medición. Unos de los errores más grandes en estas mediciones está relacionado con la reacción del operario que realice las mediciones (autor). Por tanto, los errores en las mediciones de alrededor de 0.7 segundos que para un especialista en Protecciones Eléctricas son inaceptable, son insertados o incorporados por el error manual en la medición.

Seguidamente en el anexo se muestra los resultados del análisis estadístico en el cual se incluyen los parámetros característicos de las muestras de los errores calculados, tales como: media, varianza, desviación estándar, máximo, mínimo, cantidad de experimentos o muestras tomadas.

Aunque no existe una diferencia apreciable entre las medias de los errores para las condiciones propuestas, este análisis no se puede hacer a simple vista y para ello se utilizó la herramienta estadística: *PRUEBA DE HIPÓTESIS DE DIFERENCIA DE MEDIAS DE DOS POBLACIONES INDEPENDIENTES* donde se conocen las varianzas de las poblaciones. Las varianzas poblacionales

fueron estimadas partiendo de las varianzas muestrales de los datos. La distribución de los datos se supuso Normal y para ello se utilizó el Teorema del Límite Central.

En los resultados de las Pruebas de Hipótesis mostrados en el anexo se observa que existe diferencia significativa entre las medias de los errores entre la condición a) y las restantes; es decir, aparentemente los Relés Virtuales no se comportan igual si se cambian sus condiciones de operación. Este supuesto estadístico es dado con una confiabilidad del 95% y 99%.

Lo establecido anteriormente corrobora la idea de comprobar los Relés Virtuales desactivando aquellos que no se quieran comprobar y utilizar computadoras digitales de alta velocidad cuando se ejecute el Laboratorio Virtual.

Cuando estos Relés funcionen conectados a la realidad, mediante tarjetas de adquisición de señales, donde la plataforma de programación sólo tenga que dedicarse a ejecutar los algoritmos matemáticos que modelan a los Relés, estas demoras serán menores y solo bastará escoger la velocidad de las máquinas donde puedan operar sin que se afecten los tiempo de disparos de los mismos.

3.4 Conclusiones

En este capítulo se construyó un manual de aplicaciones, que sirve de ayuda para utilizar las potencialidades del Laboratorio Virtual. En este manual se explican las partes integrantes del Simulador de Fallos y se dan algunas sugerencias sobre la utilización de dichas componentes durante las condiciones de trabajo. Las partes integrantes de cada Relé Virtual fueron tratadas en el capítulo 2 y por eso no se abordaron en este apartado, aunque se dieron algunas sugerencias al respecto a la hora de realizar comprobaciones independientes en un relé.

Como metodología general para la validación de los Relés Virtuales se tomó un ejemplo real de la fábrica niquelífera Pedro Sotto Alba, y los relés virtuales funcionaron con la misma sensibilidad y selectividad que los relés reales. Fueron calculadas las corrientes y tensiones para distintos puntos y tipos de cortocircuitos, con el fin de aplicarlos a los relés virtuales y ver de forma visual su comportamiento. En forma de tabla fueron mostrados los resultados de las validaciones. En el caso de los relés de sobrecorriente de tiempo definido, los relés diferenciales y el relé de distancia solo se mostró la condición de operación dado que el tiempo teórico de operación debe ser cero.

Un análisis estadístico basado en la prueba de hipótesis sobre la diferencia de medias de dos poblaciones independientes fue realizado, y concluyó que los Relés Virtuales no se comportan de la misma forma, en cuanto a la velocidad de operación, si se les cambia las condiciones de trabajo; es decir, el tiempo de disparo de los relés puede afectarse si están trabajando otros relés virtuales al unísono.

Los algoritmos de los filtros y la obtención de los ángulos de desfases que fueron implementados en los relés, utilizan instrucciones cíclicas, las cuales incorporan demoras en la ejecución del ciclo general de ejecución de LabView. Los Visualizadores creados para mostrar en forma gráfica el funcionamiento de los Relés de características más complejas también incorporan demoras en el ciclo general de LabView. En próximos trabajos se deben perfeccionar estas tareas con el fin de que no afecten el funcionamiento del Laboratorio Virtual en su conjunto.

Conclusiones:

Se obtuvieron, de las referencias citadas, las expresiones que permiten modelar las curvas de temporización de los Relés de Sobrecorrientes y también las expresiones que rigen el comportamiento de los Relés de Porcentaje Diferencial.

Se implementó un método para la obtención del desfase entre dos señales cualquiera, formadas por muestras discretas extraídas de un ciclo de frecuencia fundamental. Este subprograma fue insertado en los relés que necesitaran conocer el ángulo de desfase de las señales que estaban midiendo y en particular en los Relés Direccionales de Potencia.

Las expresiones relacionadas con la modelación de los Relés de Distancia de características *Circulares* (Relés de Impedancia, Mho, Mho Desplazado y Elíptico) y los de características *Rectilínea* (Relés de Reactancia, Impedancia - Angulo) fueron creadas por el autor del trabajo. En estos modelos no se incorporaron parámetros que no tuvieran relación directa con el ajuste teórico de los relé; es decir, que el operario que ajustará el Relé de Distancia puede convertirlo en cualquiera de los tipos mencionados, sin que con ello tenga que conocer otros conceptos diferentes a los que se necesitan para realizar el ajuste teórico. Esta es una de las características más novedosas que incorporan los relés basados en las técnicas a microprocesadores, lo cual facilita enormemente sus ajustes prácticos.

Fueron diseñados y programados siguiendo los algoritmo propuestos las siguientes protecciones:

- Relés de Sobrecorrientes:
 - Tiempo Definido.
 - Tiempo Inverso (ANSI, IAC, IEC, GE).
- Relés de Secuencias:
 - Secuencia Negativa y Cero de Tiempo Definido.
 - Secuencia Negativa de Tiempo Inverso para la protección de motores.
- Relés Diferenciales:
 - Instantáneos.
 - Porcentaje Diferencial.
- Relés Direccionales de Potencia:
 - Conexión 30°, 60° y 90°.
- Relés de Distancia
 - Impedancia.
 - Mho o Resistencia.
 - Mho Desplazado.
 - Elíptico.
 - Reactancia.

- Impedancia - Angulo.
- Cuadrilateral.

Cada uno de estos Relés se construyó en su variante monofásica y trifásica, y en todos los casos los trifásicos fueron creados por la combinación de tres monofásicos insertados en ellos. Algunos de características complejas como el Relé de Distancia Cuadrilateral fueron creado con la combinación de 4 Relés de Distancia del Tipo Impedancia - Angulo.

En los Relés complejos; tales como: los Relés de Distancia y los Relés de Porcentaje Diferencial fueron instalados Visualizadores que permiten mostrar en forma gráfica la característica de operación del Relé, posibilitando con esto disminuir el nivel de abstracción necesario para entender su funcionamiento u operación. Estos Visualizadores poseen opciones de Autoescalado y cambian su forma inmediatamente que se modifican los ajustes del Relé. Esta característica es muy útil y acelera los resultados de las comprobaciones, sin mencionar las ventajas que brinda en el proceso enseñanza de estas temáticas a investigadores de poca experiencia.

Para comprobar el funcionamiento de los *Relés Virtuales* creados se construyó un *Simulador de Fallos* el cual permite simular los disturbios que comúnmente se originan en los Sistemas Eléctricos de Potencia tales como:

- Cortocircuitos:
 - Trifásicos.
 - Bifásicos.
 - Monofásicos.
 - Con o sin componentes de corriente directa.
- Cambios súbitos de las fases de las señales.
- Modificación de los niveles de las tensiones.
- Ruidos en las señales.

Este simulador de naturaleza virtual no se afecta cualquiera sea la severidad del régimen que se desee simular por tanto esto constituye una ventaja con respecto a los de sus tipos analógicos. Las posibilidades de maniobra o ajustes de este simulador son infinitas dado que los fallos o disturbios no son más que números con dominios muy amplios; por ejemplo, se puede trabajar con señales de 5×10^{-6} A y 5×10^6 A, sin que ello incluya dificultad alguna.

Utilizando las opciones que brinda el Simulador de fallos se confeccionó un experimento utilizando los datos provenientes de la Empresa Niquelífera **Cmdte. Pedro Sotto Alba**, con los cuales se validaron los Relés Virtuales. Para ello fueron calculados los niveles de corrientes y tensiones durante la

ocurrencia de cortocircuitos en distintos puntos del circuito de suministro de la Empresa y señales proporcionales a éstas fueron inyectadas a los relés, los cuales estaban ajustados con los mismos valores que las protecciones que están instaladas en la realidad en una Subestación de alimentación de dicha fábrica. Todos los Relés se comportaron, con respecto a la *Sensibilidad* y la *Selectividad*, correctamente.

Las Velocidad de Respuestas de los Relés Virtuales se ven afectadas con la cantidad de Relés Virtuales que estén siendo comprobados, la velocidad del procesador de la PC, y otros factores. Un análisis estadístico de este fenómeno mostró que existen diferencias significativas en el valor medio del tiempo de disparo de los relés cuando se trabaja uno solo o varios a la vez. Por tanto se aconseja que mientras se pueda, se trabaje solamente con el Relé que se esté comprobando y que los demás se mantengan desactivados.

Atendiendo a este último aspecto, cuando se deseen construir Relés con características más complejas partiendo de las combinaciones de otros más simples, hay que tomar en cuenta de no repetir con estos procedimientos que provoquen demoras en la acción de respuestas de los demás dispositivos de protección; por ejemplo, si se van a utilizar simples Relés monofásicos en una misma fase para lograr uno trifásico de mayor complejidad, hay que tomar en cuenta que todos no estén filtrando las señales de entrada, porque sino este proceso se estaría repitiendo y por tanto, demorando la acción de respuesta del relé que esta crean y de todos aquellos que estén siendo comprobados en ese mismo instante.

Recomendaciones:

Aunque fueron construidos una gran cantidad de Relés entre los cuales están incluidos los de mayor utilidad práctica, se pueden incorporar otros más complejos tales como: Relés Contra la Pérdida de Sincronismo en Generadores, Relés Contra Pérdida de la Excitación, Recerradores, Relés térmico; es decir, ir incorporando Relés de todos los tipos y variantes al Laboratorio Virtual, hasta convertirlo en una potente herramienta de trabajo.

Otras tareas que se deben incluir en el laboratorio son los modelos que permiten simular los transformadores de corrientes, transformadores de tensión; así como, fabricar relés multifunciones para la protección de motores, transformadores y generadores, al igual que los realiza la firma MULTILIN.

En este trabajo fueron diseñados e incorporados algunos procedimientos de filtros que deben ser perfeccionados porque incorporan demoras a los relés y por tanto afectan el trabajo del Laboratorio Virtual; es decir, se deben escoger otros tipos de filtros capaces de eliminar los armónicos diferentes del fundamental y extraer las componentes; tales como, módulo y ángulo de desfase, con mayor rapidez que los implementados en este trabajo. Otras tareas incluidas que incorporan demoras son los visualizadores implementados en aquellos relés de características más complejas, estos no pueden ser eliminados pero si se puede optimizar su programación.

El Simulador de Fallos construido incluye variados tipos de disturbios, pero se debe añadir una opción que permita incluir señales calculadas en otros simuladores de perturbaciones más potentes e inyectarlas a los Relés Virtuales.

Aunque es muy importante la posibilidad de contar con un Simulador de Fallos Virtual, se pueden incorporar tarjetas interfaces al Laboratorio y alimentar los Relés con señales proveniente de simuladores analógicos externos. Esto permitiría montar prácticas de Laboratorio de Protecciones utilizando como fuentes los elementos reales del sistema, tales como: motores, transformadores, líneas, etc.

Bibliografía

1. Add - On Software And Instrument Drivers / National Instrument: <http://www.natinst.com>
2. AGGARWAL R. K., JOHNS A. T. Digital Differential Relaying Scheme For Teed Circuits Based On Voltage And Current Signal Comparison. IEE Proceedings / (New York) 137(6), November 1990.
3. ALBRECHT R. E., M. J. NISJA, W.E FEERO. Digital Computer Protective Device Coordination, Program I - General Program Description. IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems , 83(4): pp. 402 - 410, April 1964
4. ALEXANDER G. E., ANDRICHAK J. G. Comparative Testing Using Analog Model Power Systems, Digital Model Power Systems And Portable Test Sets. General Electric Publication / (New York), GER - 3678.
5. ALEXANDER G. E., ANDRICHAK J. G. Ground Distance Relaying Problems And Principles. General Electric Publication / (New York), GER - 3793.
6. ALLAN R. N. Effects Of Protection Systems Operation And Failures In Composite System Reliability Evaluation. Electrical Engineering and Electronics, UMIST / (Manchester) 10(3), July 1988.
7. ALTUVE FERRER HECTOR, BRAVO DE LAS CASAS MARTA, GONZÁLEZ R. EMILIO. Relés Estáticos De Protecciones De Líneas Y Motores Eléctricos / Hector Altuve Ferrer, Marta Bravo De Las Casas, Emilio González Rodríguez _ Santa Clara, Octubre 1986.
8. ALTUVE FERRER HECTOR. Protección De Redes Eléctricas_ Santa Clara: Universidad de las Villas, 1990_ 254p.
9. ALVARODO FERNADO L., LIU YENREN. General Purpose Symbolic Simulation Tools For Electric Networks. Electrical and Computer Engineering / (Madison) [sn]: May 1987.
10. AMOLI ETEZADI M. A Method To Teach Power System Protection. IEEE Power Engineering Education Committee, February 1987.
11. ANDRICHAK J. G. Polarizing Sources For Direccional Ground Relays. General Electric Publication / (New York), GER - 3182.
12. ANDRICHAK J. G., ALEXANDER G. E. Distance Relay Fundamentals. General Electric Publication / (New York), GER - 3966.
13. ANDRICHAK JOSEPH G., WILKINSON STANLEY B. Considerations Of Speed, Dependability, And Security In High - Speed Pilot Relaying Schemes. . General Electric

- Publication / (New York), GER - 3055.
14. BERDY JOHN. Application Of Out-Of-Step Blocking And Tripping Relays. General Electric Publication / (New York), GER - 3180.
 15. BERDY JOHN. Local Back Up Protection For An Electric Power System. General Electric Publication / (New York), GER - 3178.
 16. BERDY JOHN. Loss Of Excitation For Modern Synchronous Generators. General Electric Publication / (New York), GER - 3183.
 17. BERDY JOHN. Out - Of - Step Protection for Generators. General Electric Publication / (New York), GER - 3179.
 18. BORNARD P., ERHARD P., FAUQUEMBERQUE P. Morga. A Data Processing Program For Testing Transmission Line Protective Relays. IEEE Transaction On Power Delivery, 3(4), October 1988.
 19. BROWN KINGSLEY, PARKER JAMES M. A Personal Computer Approach To Overcurrent Protective Device Coordination.[sn].
 20. CHERNOBROVOV N. Protective Relaying / N. Chernobrovov _ Moscow: Mir, 1974_ 1789p.
 21. CORDOZO ELERT, TALUKDAR SAROSH N. A. Distributed Expert System For Fault Diagnosis. Engineering Design Research Center. Carnegie Mellon University.
 22. Development Of An Electromagnetics Toolkit For LabView / National Instrument <http://www.natinst.com>, fabrega@ee.utah.edu.
 23. Digital Relaying And Transmission Line Simulator / Center For Electric Power Engineering - Research : webmast@nwankpa.ece.drexel.edu
 24. ENGELHARDT K. H., HYDRO B. C. Dynamic Performance Testing Of Mho Relay Memory Action. Canadian Electrical Association. Presented at the Spring 1982 Meeting of the Engineering and Operating Division Power System Protection Substation. Montreal 15.
 25. ERHARD P., BORNARD P., CHOREL H. A Modern Testing Facility For EHV System Protection. International Conference On Large High Voltage Electric Systems. France 29 th August 1984.
 26. ETEZADI - AMOLI M., FLORENCE T. The Spice 3 Programming Language And Its Application To Power System Analysis. EE/CS Department University of Nevada - Reno. IEEE 1988.
 27. IEEE 1988.
 28. FABRICANT V. L. Protección De Distancia / V. L. Fabricant _ Moscow:[sn], 1986_ 249p.
FEDOSEEV A. M. Protección Por Relés De Los Sistemas Eléctricos /A. M. Fedoseev_ Moscow:

29. [sn],1984_743p.
30. GE. Multilin (Canada)_ 269 Plus Motor Management Relay _1998.
31. GE. Multilin (Canada)_ SR 469 Motor Management Relay _1998.
32. GE. Multilin (Canada)_ SR 489 Generator Management Relay _1998.
33. GE. Multilin (Canada)_ SR 745 Transformer Management Relay _1998.
34. GE. Multilin (Canada)_ SR 750/760 Feeder Management Relay _1998.
35. GEC Alsthom (Inglaterra)_ Protective Relays... For Power Systems_ 1997.
36. Generating Station Protection. General Electric Publication / (New York), GET - 6497A.
GIRGIS ADLY A., GUY D. BRYAN. A Computer Based Data Acquisition System For Teaching Transients And Switching Phenomena And Performing Research On Digital Protection. IEEE Transactions on Power System, 3(3). August 1988.
37. GOFF. L. E. Automatic Reclosing of Distribution And Transmission Line Circuit Breakers. General Electric Publication / (New York), GER - 2540A.
38. GRAHAM D. J., BROWN P. G. WINCHESTER R. L. Generator Protection With A New Static Negative Sequence Relay. General Electric Publication / (New York), GER - 3181.
39. GUTIÉRREZ G. JORGE J., OROZCO G. ALVARO A. El Sistema LabView - Introducción. Electrónica & Computadores. CEKIT / (Pereira) (10): pp. 18-22, 1996.
40. HANDSCHIN E., DORNEMAN CH. Bus Load Modeling And Forecasting. IEEE Transaction on Power Systems, 3(2), May 1988.
41. HARD DAVID, HU YI, SMITH BOLO. A New Frequency Tracking and Phasor Estimation Algorithm For Generator Protection. IEEE Transaction on Power Delivery. 12(3). July 1997.
42. High - Impedance Differential Relaying. General Electric Publication / (New York), GER - 3134.
43. IEEE Committee Report. Criteria For The Evaluation Of Digital Impedance Methods Of Transmission Line Protection. IEEE Transaction On Power Apparatus And Systems, PAS - 104(1): pp. 126 -135, January 1985.
44. Industrial Power Systems. Handbook / Donald Beeman...[et al]_La Habana: Instituto Del Libro, 1969_971p.
45. JODICE J. A. The Art And Application Of Active Sources. Reprint Of A Paper Presented To The Protective Relay Committee And General Membership Of The Pennsylvania Electric Association. Jodice Controls Corporations. 1989.
46. KASZTENNY B., ROSOLOWSKY E., SAHA M. M., HILLSTROM B. A Self - Organizing Fuzzy Logic Based Protective Relay - An Application To Power Transformer Protection.

47. IEEE Transaction On Power Delivery, 12(3), July 1997.
KENEDY WILLIAM O. GRUELL BARRY J. Five Years Experience With A New Method Of Field Testing Cross And Quadrature Polirazed MHO Distance Relays. Part 1. Results and
48. Observations. . IEEE Transaction On Power Delivery, 1987.
KENEDY WILLIAM O. GRUELL BARRY J. Five Years Experience With A New Method Of Field Testing Cross And Quadrature Polirazed MHO Distance Relays. Part 2. Three Case
49. Studies. IEEE Transaction On Power Delivery, 1987.
KEYHANI A. TSAI H. IGSPICE Simulation of Induction Machines with Saturable Inductances.
50. The_Ohio State University, Department of electrical Engineering, Columbus, Ohi 43210, 1988.
KEZUNOVIE M., C. W. FROWEN. Experiment Evaluation Of EMTP- BASED Current
51. Transformer Model For Protective Relay Transient Study. IEEE Transactions on Power Delivery. 9(1), January 1994.
52. KEZUNOVIE M., C. W. FROWEN. Microprocessor - Based Overcurrent Relays. IEEE Transaction On Industrial Electronics, 1E-33(1), Febrary 1986.
53. KOTHEIMER W. C. Control Circuit Transient. General Electric Publication / (New York), GER - 3061.
54. KOTHEIMER W. C. Substation Transients And Solid state controls. General Electric Publication / (New York), GER - 3204.
55. KUNIAKI YABE. Power Differential Method For Discrimination Between Fault And Magnetizing Inrush Current In Transformers. IEEE Transaction on Power Delivery, 12(3), July 1997.
56. LEE ROBERT, H OSBORN RAYMOD. A Microcomputer Bases Data Acquisition System For High Impedance Fault Analysis. IEEE Transaction On Power Apparatus And Systems, PAS-104(10): pp. 2748 - 2753, October 1985.
57. LI H. Y., SOUTHERN E. P., CROSSLEY P. A. A New Type Of Differential Feeder Protection Relay. Using The Global Positioning System For Data Synchronization. IEEE Transaction on
58. Power Delivery, 12(3). July 1997.
LLAR FRANE, FREY FRIEDRICH. Protección De Redes Con Relés Estáticos Individuales De
59. La Serie De Construcción 900. Brow Boveri, pp. 10-87.
LUND PER. SetPos Program System - Simulation Of Electric Transients In Power Station Electric Power Systems Research, August 13, 1987.

60. MAKRAM E. B., BOU-RABEE M. A, GIRGIS A. A. Three - Phase Modeling of Unbalanced Distribution Systems during Open Conductors and/or Shunt Fault Conditions Using the Bus Impedance Matrix. *Electric Power Systems Research*. Received August 13, 1987.
61. MANSOUR M. M., SWIFT G. W. Design And Testing Of A Multi - Microprocessor Traveling Wave Relay. IEEE Transaction on Power apparatus and Systems. PWRD-1(4): pp. 74 - 82, October 1986.
62. MARTILLA R. J. Directional Characteristics Of Distance Relay Mho Elements: Part I - A New Method Of Analysis. IEEE transactions on Power Apparatus and Systems , PAS - 100(1),
63. January 1981.
MARTILLA R. J. Directional Characteristics Of Distance Relay Mho Elements: Part Ii - Results.
64. IEEE Transactions On Power Apparatus And Systems, PAS - 100(1), January 1981.
MASON C. RUSSELL. The Art And Science Of Protective Relaying / C. Russell Mason _ La Habana: Pueblo y Educación, 1975 _ 585p.
65. MURTY Y. V. V. S., SMOLINSKI W. J., SWAKUMOW S. Design Of A Digital Protection Scheme For Power Transformers Using Optimal State Observers. IEEE Proceedings, 135(3),
66. May 1988.
67. MURTY Y. V.V.S., FULLER J. F. Multiple Overcurrent Relays Using a Single Microprocessor. IEEE Transaction On Industrial Electronics, 37(4), August 1990.
National Instrument. Conozca a Nuestra Familia. ICI, mayo/ Junio 1984.
68. ODENBERG R., BRASKICH B. J. Measurements of Voltage and Current Surges on the AC Power Line in Computer and Industrial Environments. IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems. PAS - 104(10), pp. 2681 - 2691, October 1985.
69. PAITHANKAR V. G. Fast (1-shift) Orthogonal Functions for Extraction of the Fundamental Frequency Component for Computer Relaying. *Electric Power Systems Research*, January
70. 12, 1988.
PEI LIU... [et al]. Scheme For Accelerated Trip For Faults In The Second Zone Of Protection Of A Transmission Line. IEEE Transaction on Power System Relaying Committee, July 24,
71. 1988.
PEI LIU... [et al]. Analysis Of A Accelerated Trip Scheme For Faults In The Second Zone Of
72. Protection Of A Transmission Line. IEEE Transaction on Power System Relaying Committee, July 9, 1989.
73. PELÁEZ GONZÁLEZ ALBERTO. Fallas Asimétricas En Sistemas De Energía Eléctrica /

- Alberto Peláez González_ La Habana: Pueblo y Educación, 1986_114p.
74. PIHLER J., GRÉAR B., DOLINAR D. Improved Operation of Power Transformer Protection Using Artificial Neural Network. IEEE Transaction on Power Delivery, 2(3), July 1997.
75. POWELL J. LOVIE. An Industrial View of Utility Cogeneration Protection Requirements. IEEE
76. Transaction on Power Delivery, 1988.
- Problemas Resueltos y Propuestos De Protecciones De Sistemas Eléctricos / Carlos de la Incera...
77. [et al]_ La Habana: ISPJAE, 1989 _ 236p.
- PUTZ HERS. IPT's Electrical HandBook / Hers Putz_ Canada: [sn], 1994_ 252p.
- RAMASWAMI R., MC GUIRE P. F. Integrated Coordination And Short Circuit Analysis For
78. System Protection. IEEE Transaction on Power System Relaying Committee, July 13, 1990.
- RAMASWAMI R., DAMBERG M. J. Coordination Of Directional Overcurrent Relays In
- Transmission Systems - A Subsystem Approach. IEEE transaction on Power System
79. Relaying Committee / (California), July 1989.
- RODRIGUEZ BARBAROS CELESTINO, ZALDO VARELA ROSARIO. Protecciones
- Automáticas / Celestino Rodríguez Barbaros, Rosario Zaldo Varela _ La Habana: Pueblo y
80. Educación, 1987.
- ROGERS CHARLES. Ramaswami Ramasamy, McGuier Paul. Graphical Coordination Program
81. Aids System Relaying At Consumers Power. IEEE Computer Applications in Power, July 1990.
82. SAHA M. MURARI, KASZTENNY BOGDAN, ROSOŁOWSKI EUGENIUSZ. Protección De Transformadores Basada En La Lógica Difusa. ABB 1: pp. 41 - 48, 1988.
- SHICH C. GRUELL B. J. Computer Modeling And Performance Testing Of Polarized Mho
83. Distance Relays. Canadian Electric Association / (Ontario), Mach 1984.
- SHULTZ D. E., WATERS D. E. Computer - Aided Protective Device Coordination - A Case
84. Study. IEEE Transactions on Power Apparatus and System. PAS-103(11): pp. 3296 - 3301, November 1984.
85. STEELE C., FERNANDO I...[et al]. Double Circuit Line Protection Relay. IEEE Transaction On Power Delivery, 12(3), July 1997.
86. STEVENSON WILLIAM. Análisis De Sistemas Eléctricos De Potencia / William D. Stevenson _
87. La Habana: Edición Revolucionaria, 1986_ 391p.
- SWIFT G. W... [ET AL]. An Automated Testing System For Distance Relays. IEEE Transactions
88. On Power Apparatus And Systems, PAS - 96(4), August July 1977.

- TELEMECANIQUE (France)_LT8 Multifunction Protection Relays. December_1988.
89. USA. EBASCO Division. Electric Distribution Systems Engineering Handbook / EBASCO Division _ NewYork: Raytheon Engineers & Constructors, 1985_ 3321p.
90. VASCONCELOS A. VIEGAS, HOSEMAN G. Transient Studies On A Multiprocessor. IEEE Transactions on Power Apparatus and System, PAS-103(11): pp. 3260-3265, November 1984.
91. VERMA H. K., KAKOTI G. C. Algorithm For Harmonic Restraint Differential Relaying Based On The Discrete Hartley Transform. Electric Power System Research, 1990.
92. WARRINGTON VAN C. A. R. Graphical Method For Estimating The Performance Of Distance Relays During Faults And Power Swings. 1989.
93. WEDEPOHL M. Polarized Mho Distance Relay Few Approach To The Analysis Of Practical Characteristics. IEE Proceedings, 112(3), March 1965.
94. WILKINSON S. B., MATHEWS C. A. Dynamic Characteristics Of Mho Distance Relays. General Electric Publication / (New York), GER - 3742.
- WILLIAMS A., WARREN R. H. J. Method Of Using Data From Computer Simulations To Test
95. Protection Equipment. IEE proceedings 131(7), November 1982.
- WINICK KENNETH. A Guide To The Application Of Power Relays For The Detection Of
96. Overpower Or Reverse Power Conditions On A Power System. General Electric Publication / (New York), GER - 2309A.
- WINICK KENNETH. Synchronism Check Equipment. General Electric Publication / (New York), GER - 2622A.
- WU. SEAN, WANG ZHAOXI. A Fast Fourier Transformation Algorithm For The Kirchhoff Integral Formulation. Department of Mechanical Engineering, Wayne State University / (Michigan) 48202. Accepted 14 August 1994.

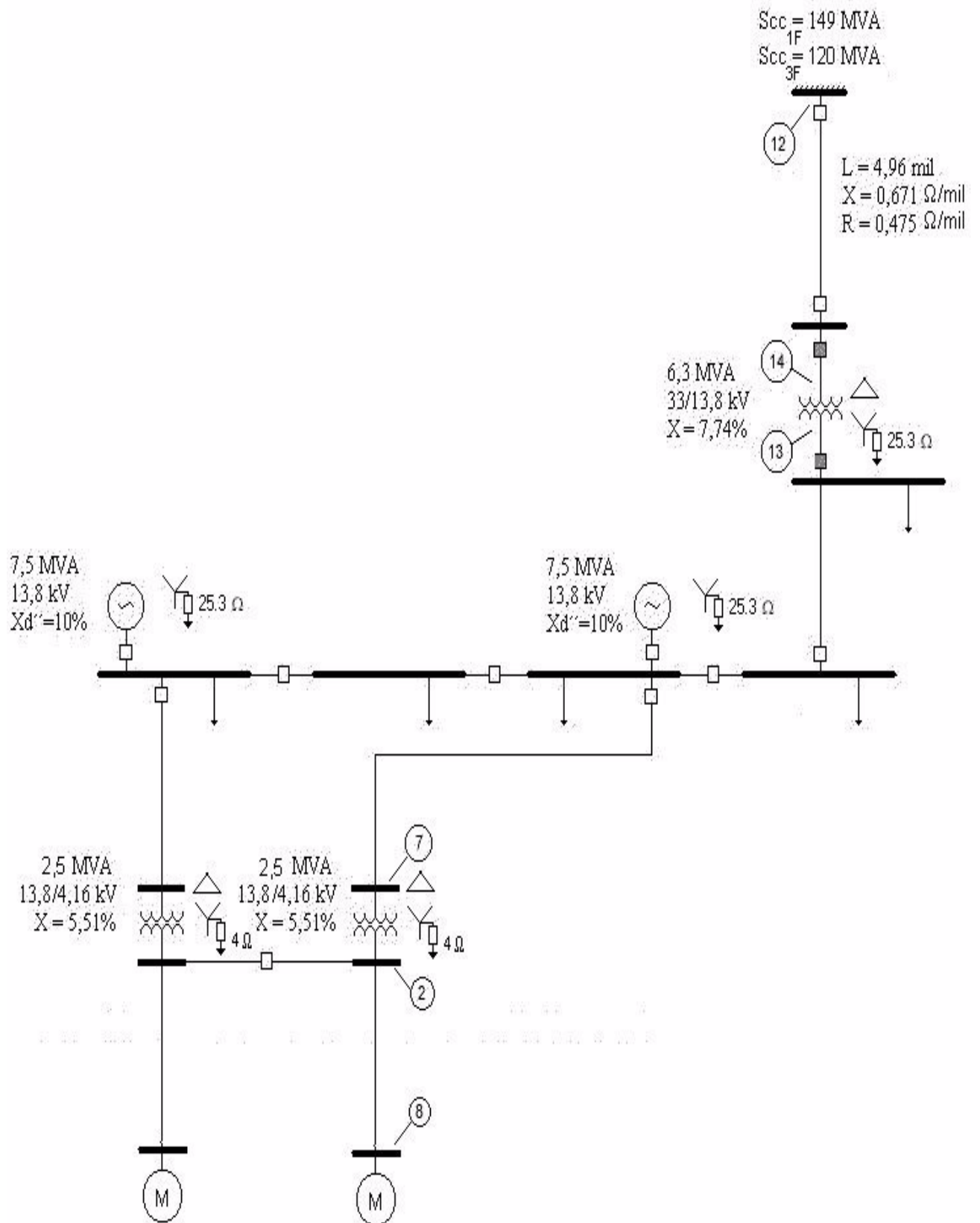


Figura 1. Monolínea simplificada de la Empresa Cmdte. Pedro Sotto Alba de MOA.