



UNIVERSIDAD  
DE LOS ANDES  
MERIDA VENEZUELA

UNIVERSIDAD DE LOS ANDES

FACULTAD DE INGENIERÍA

ESCUELA DE INGENIERÍA ELÉCTRICA

**ESTUDIO DE LOS EFECTOS DE LA DISTORSIÓN  
ARMÓNICA Y TRANSITORIOS ELECTROMAGNÉTICOS EN  
RELÉS DIFERENCIALES.**

Br. Luis José Méndez Guerrero.

MÉRIDA, MAYO, 2022

UNIVERSIDAD DE LOS ANDES  
FACULTAD DE INGENIERÍA  
ESCUELA DE INGENIERÍA ELÉCTRICA

**ESTUDIO DE LOS EFECTOS DE LA DISTORSIÓN  
ARMÓNICA Y TRANSITORIOS ELECTROMAGNÉTICOS EN  
RELES DIFERENCIALES.**

Trabajo de Grado presentado como requisito parcial para optar al título de Ingeniero

Electricista

Br. Luis José Méndez Guerrero.

Tutor: Ph D. Marisol Dávila

MÉRIDA, MAYO, 2022

UNIVERSIDAD DE LOS ANDES  
FACULTAD DE INGENIERÍA  
ESCUELA DE INGENIERÍA ELÉCTRICA

**ESTUDIO DE LOS EFECTOS DE LA DISTORSIÓN ARMÓNICA Y  
TRANSITORIOS ELECTROMAGNÉTICOS EN RELES  
DIFERENCIALES.**

Br. Luis José Méndez Guerrero.

Trabajo de Grado, presentado en cumplimiento parcial de los requisitos exigidos para optar al título de Ingeniero Electricista, aprobado en nombre de la Universidad de los Andes por el siguiente jurado.

---

MSc. Ernesto José Mora Noguera

---

MSc. Pedro Omar Mora Mogollón

---

Ph. D. Marisol Dávila

Tutor

## **DEDICATORIA.**

A Dios por haberme dado la oportunidad de existir y haber tenido las condiciones necesarias para lograr tan importante objetivo.

A mis padres, MARIA NELY GUERRERO DUARTE Y JOSE GERARDO MENDEZ VILORIA, por el apoyo absoluto e incondicional, dándome ánimos y fuerzas para nunca desistir a pesar de difícil situaciones en el trayecto de la carrera, esto es de ustedes y para ustedes PAPÁ y MAMÁ, los amo.

A mis hermanos, ARIANA VANESSA MENDEZ GUERRERO por ayudarme cuando más lo necesitaba, contagiándome de su valentía y lucha para continuar y enfrentar cualquier obstáculo presentado, a JOSE GERARDO MENDEZ GUERRERO, por ayudarme y aconsejarme en este camino, ambos por ser parte primordial en mi vida y gran ejemplo a seguir.

A mis sobrinos, VALERIA MENDEZ, JOSE TOBIAS MENDEZ, JOSE GABRIEL MENDEZ, para que sigan el camino del conocimiento y se formen como grandes profesionales.

A mi familia en general por brindarme su apoyo y aun en la distancia siempre pendiente de mis avances como profesional.

A Tío, JUAN CARLOS GUERRERO DUARTE, quien ya no está en la vida terrenal con nosotros pero siempre guardado en mi mente y corazón, por sus concejos en la preparación académica que debíamos tener.

**Luis Méndez**

## AGRADECIMIENTOS

A DIOS por permitir muchas experiencias positivas dentro de mi formación, por hacerme coincidir con tan valiosas e inteligentes personas durante este proceso.

A mis PADRES por mantener su constancia y perseverancia sobre mis estudios académicos, por su confianza y credibilidad en los objetivos que soy capaz de lograr.

A mis HERMANOS, quienes apoyaron mi decisión desde el momento que Comencé este camino, por sus colaboraciones para poder hacer de este viaje una realidad.

A mi FAMILIA, especialmente a mis abuelos: Elia Duarte, Pedro Guerrero, Adalci Vilorio, Graciano Méndez, quienes desde el cielo me llenan de fuerzas cada día para seguir adelante.

A mis compañeros de estudio Jordan Quintana, Carmen Trejo, Astrid Castellano, Leidy Godoy, por su gran apoyo en lo académico y en lo personal, sin importar donde estemos los llevare en mi corazón.

A mi Amiga, ANA HIDALGO, por estar presente en malos y buenos momentos, por incentivar me a estudiar incluso cuando no pertenecíamos a la misma carrera, por darme la mano sin ningún interés.

A la Familia QUINTANA VASQUEZ, por abrirme las puertas de su casa y hacerme sentir parte de ellos. Siempre presente.

A mi tutor académico, la profesora MARISOL DAVILA por brindarme tutorías e impartir sus conocimientos en este proyecto.

A la ilustre UNIVERSIDAD DE LOS ANDES, por darme la oportunidad de formarme, sintiéndome orgulloso de ser parte de tan prestigiosa casa de estudio.

Así mismo a la ESCUELA DE ELECTRICA y sus colaboradores, por su arduo trabajo.

**Br. Luis José Méndez Guerrero. Estudio de los efectos de la distorsión armónica y transitorios electromagnéticos en relés diferenciales.** Universidad de Los Andes. Tutor: Dra. Marisol Dávila. Mayo 2022.

## RESUMEN

En el presente trabajo se realiza el estudio de los efectos de la distorsión armónica y transitorios electromagnéticos en relés diferenciales, para llevar a cabo dicho trabajo se procedió a realizar una investigación tanto del relé diferencial como de la distorsión armónica y los transitorios electromagnéticos presentes en una descarga atmosférica y en maniobras por la conexión y desconexión de un banco de capacitores. Luego una vez cumplida la fase de estudio se realizan diferentes pruebas para conocer el comportamiento para un sistema ideal y con falla ante la presencia de armónicos en un transformador de potencia con cargas lineales y no lineales conectadas. Además se analiza el comportamiento en los relés diferenciales cuando el sistema es sometido a transitorios electromagnéticos a causa de descargas atmosféricas o cuando ocurren maniobras de conexión y desconexión de un banco de capacitores en diferentes intervalos de tiempo detallando la reducción de la potencia reactiva del sistema una vez que se conecta el banco. Todos estos casos se analizan mediante el software de simulaciones PSCAD/EMTDC obteniendo resultados satisfactorios del relé ante la presencia de cualquiera de los efectos, garantizando su buen funcionamiento.

**Descriptor:** Protección diferencial, relé diferencial, distorsión armónica, transitorios electromagnéticos, descargas atmosféricas.

## INDICE GENERAL

<b>APROBACIÓN.....</b>	<b>iii</b>
<b>DEDICATORIA. ....</b>	<b>iv</b>
<b>AGRADECIMIENTOS .....</b>	<b>v</b>
<b>RESUMEN .....</b>	<b>vi</b>
<b>INDICE GENERAL .....</b>	<b>vii</b>
<b>LISTA DE FIGURAS.....</b>	<b>xi</b>
<b>LISTA DE TABLAS.....</b>	<b>xiv</b>
<b>INTRODUCCION .....</b>	<b>1</b>
<b>¿POR QUÉ MODELAR LA PROTECCIÓN DIFERENCIAL? .....</b>	<b>3</b>
1.1 ANTECEDENTES .....	3
1.2 PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA. ....	3
1.3 JUSTIFICACIÓN .....	4
1.4 OBJETIVO .....	5
1.4.1 General .....	5
1.4.2 Específicos .....	5
1.5 METODOLOGÍA.....	6
1.6 ALCANCES .....	6
1.7 LIMITACIONES .....	6
<b>LA PROTECCIÓN DIFERENCIAL .....</b>	<b>8</b>
2.1 SISTEMA DE POTENCIA. ....	8
2.2 SISTEMA DE PROTECCIÓN.....	9

2.2.1 Elementos básicos de un Sistema de Protección.....	9
2.3 PROTECCIÓN DIFERENCIAL.....	10
2.3.1 Fallas en un relé diferencial.....	11
2.3.2 Causas de las fallas.....	13
2.3.3 Detección de componentes continuas.....	13
2.3.4 Estabilización con armónicos.....	13
2.4 PROTECCIÓN DIFERENCIAL EN TRANSFORMADORES DE POTENCIA.....	14
2.4.1 Consideraciones básicas:.....	15
2.5 PROTECCIÓN DIFERENCIAL PARA GENERADORES.....	18
2.5.1 Protección contra fallas entre espiras en devanados del estator:.....	19
2.6 PROTECCIÓN DIFERENCIAL PARA PEQUEÑAS BARRAS Y LINEAS CORTAS.....	20
2.6.1 Supervisión de la corriente diferencial:.....	21
2.7 ARMONÍCOS.....	21
2.7.1 Distorsión de la forma de onda:.....	22
2.7.2 Transformada de Fourier:.....	23
2.7.3 Fuentes de armónicos.....	24
2.8 TRANSITORIOS ELECTROMAGNETICOS.....	24
2.8.1 Sobretensiones y Sobrecorrientes.....	24
2.8.2 Transitorios electromagnéticos por descargas atmosféricas (DEAT):.....	25
2.8.3 Transitorios electromagnéticos por maniobra.....	26
2.9 PROGRAMA DE SIMULACIÓN DE TRANSITORIOS ELECTROMAGNÉTICOS PSCAD®.....	26



2.9.1 Módulos de Simulación.....	26
2.9.2 Antecedentes .....	27
2.9.3 Licencia .....	27
2.9.4 Sumario .....	27
<b>ANÁLISIS DEL COMPORTAMIENTO DE LOS DISPOSITIVOS DE PROTECCIÓN DIFERENCIAL ANTE LA PRESENCIA DE DISTORSIÓN ARMÓNICA.....</b>	<b>298</b>
3.1 DESCRIPCION DEL SISTEMA. ....	29
3.1.1 Criterios de ajuste.....	29
3.2 ARMÓNICOS PRODUCIDOS POR FALLAS ANTE CARGAS LINEALES Y NO LINEALES. ....	30
3.2.1 Casos de estudio.....	30
3.2.2 Elementos modelados.....	30
3.2.3 Modelado del dispositivo de protección diferencial. ....	31
3.2.4 Modelo del Transformador de Corriente (TC).....	32
3.2.5 Parámetros de los elementos modelados.....	33
3.3 RESULTADOS OBTENIDOS Y ANÁLISIS.....	36
3.3.1 Parámetros medidos en el sistema para carga lineal. ....	36
3.3.2 Parámetros medidos en el sistema para carga lineal con falla. ....	38
3.3.3 Parámetros medidos en el sistema para carga no lineal. ....	40
3.3.4 Parámetros medidos en el sistema para carga no lineal con falla. ....	42
3.4 SUMARIO.....	44

<b>ANÁLISIS DEL COMPORTAMIENTO DE LOS DISPOSITIVOS DE PROTECCIÓN DIFERENCIAL ANTE LA PRESENCIA DE TRANSITORIOS ELECTROMAGNÉTICOS.....</b>	<b>456</b>
4.1 MODELADO DE LA DESCARGA ATMOSFERICA (DEAT).....	456
4.1.1 Descripción del funcionamiento.....	47
4.1.2 Control de Descargas Atmosféricas. ....	47
4.2 MODELADO DE UN BANCO DE CAPACITORES.....	47
4.2.1 Descripción del funcionamiento.....	49
4.2.2 Control del banco de capacitores. ....	49
4.3 PARAMETROS DE LOS ELEMENTOS MODELADOS.....	50
4.3.1 Descarga atmosférica. ....	50
4.3.2 Banco de capacitores.....	50
4.4 RESULTADOS OBTENIDOS Y ANÁLISIS.....	51
4.4.1 Resultados obtenidos ante transitorios electromagnéticos originados por descargas atmosféricas.....	51
4.4.2 Resultados obtenidos ante transitorios electromagnéticos originados por maniobra de banco de capacitores.....	54
4.5 SUMARIO .....	58
<b>CONCLUSIONES.....</b>	<b>60</b>
<b>RECOMENDACIONES.....</b>	<b>63</b>
<b>REFERENCIAS BIBLIOGRAFICAS.....</b>	<b>64</b>

## LISTA DE FIGURAS

<b>Figura</b>	<b>Pág.</b>
2.1 Diagrama de bloques de un Sistema de Protección .....	10
2.2 Conexión de un relé diferencial [5].....	11
2.3 Falla externa a la derecha [5].....	11
2.4 Falla interna [5].....	12
2.5 Característica de disparo de la protección diferencial con falla [6].....	13
2.6 Protección diferencial de un transformador [6].....	15
2.7 Definición del sentido de la corriente en un nodo (barra con dos salidas de línea), L2 barra colectora [6].....	20
2.8 Definición del sentido de la corriente para líneas cortas [6].....	20
2.9 Definición del sentido de la corriente en una barra con (4 salidas de línea) [6].....	20
2.10 Forma de onda de la componente fundamental, 1er, 2do y 3er armónico, y la forma de onda resultante [7].....	21
2.11 Clases, formas de ondas y tiempos característicos de sobretensiones [7].....	25
3.1 Esquema del sistema.....	28
3.2 Corrientes primarias y secundarias del transformador de potencia ajustada al relé diferencial para las tres fases.....	29
3.3 a) Modulo del relé de protección diferencial b) Curva característica .....	31
3.4 Parámetros generales en el ajuste del relé diferencial.....	32

3.5 Variables internas de salida.....	32
3.6 a) Modelo JA del TC, b) Configuración del lado primario, c) Configuración del lado secundario.....	33
3.7 Valor de la corriente diferencial en la fase A.....	36
3.8 Valor de la corriente de restricción en la fase A.....	37
3.9 Salida del relé diferencial para las 3 fases. El relé no dispara.....	37
3.10 Mínima presencia de armónicos pares en las 3 fases para carga lineal.....	37
3.11 Corriente primaria y secundaria del transformador ante una falla en la fase A.....	38
3.12 Corriente primaria y secundaria del transformador en las fases B y C.....	38
3.13 Valor de la corriente diferencial en la fase A con falla.....	39
3.14 Salida del relé diferencial para la fase A. El relé dispara.....	39
3.15 Salida del relé diferencial para la fase B y C. El relé no dispara.....	39
3.16 Presencia de distorsión armónica de 2do orden en la fase A.....	40
3.17 Distorsión en la onda de la corriente.....	40
3.18 Corrientes primarias y secundarias del transformador de potencia.....	41
3.19 Valor de la corriente diferencial en la fase A.....	41
3.20 Salida del relé diferencial para las 3 fases. El relé no dispara.....	42
3.21 Presencia del 2do armónico en las tres fases.....	42
3.22 Corriente primaria y secundaria del transformador ante una falla en la fase A.....	43
3.23 Valor de la corriente diferencial en la fase A con falla.....	43
3.24 Salida del relé diferencial para la fase A. El relé dispara.....	44
3.25 Presencia de distorsión armónica en las tres fases.....	44
4.1 Esquema del modelado de la descarga atmosférica.....	46

4.2 Modulo de control para descargas atmosféricas.....	47
4.3 Esquema del banco de capacitores conectado al sistema.....	49
4.4 Modulo de control para el banco de capacitores.....	49
4.5 Corriente de falla en el lado primario del transformador.....	52
4.6 Corriente del lado secundario del transformador.....	52
4.7 Corriente diferencial en el relé de protección.....	53
4.8 Salida del relé diferencial para la fase A.....	54
4.9 Forma de onda de la descarga atmosférica.....	54
4.10 Perturbación en lado primario del transformador –Fase A.....	55
4.11 Corriente en lado secundario del transformador.....	55
4.12 Corriente diferencial del relé de protección. ....	56
4.13 Comportamiento del relé de protección.....	57
4.14 Potencia reactiva del sistema antes de conectar el banco de capacitores.....	57
4.15 Potencia reactiva del sistema después de conectar el banco de capacitores.....	58
4.16 Potencia reactiva del sistema después de conectar el banco de capacitores en el intervalo de tiempo de 0.1 a 0.3 seg.....	58
4.17 Transitorio de la onda en el instante de 0.1seg de conectar el banco de capacitores.....	58

## LISTA DE TABLAS

<b>Tabla</b>	<b>Pág.</b>
3.1 Elementos presentes en el sistema de potencia.....	30
3.2 Parámetros seleccionados para la fuentes de generación.....	33
3.3 Parámetros seleccionados para el transformador.....	34
3.4 Parámetros seleccionados para la carga lineal.....	34
3.5 Parámetros seleccionados para la carga no lineal.....	35
3.6 Parámetros en el módulo de fallas.....	35
3.7 Resultados obtenidos en el sistema modelado PSCAD para carga lineal.....	36
3.8 Resultados obtenidos en el sistema modelado PSCAD para carga lineal y presencia de una falla monofásica.....	38
3.9 Resultados obtenidos en el sistema modelado PSCAD para carga no lineal.....	41
3.10 Resultados obtenidos en el sistema modelado PSCAD para carga no lineal y presencia de una falla monofásica .....	43
4.1 Parámetros de generacion de la DEAT. ....	49
4.2 Parámetros del banco de capacitores.....	50
4.3 Corrientes diferenciales y comportamiento del relé para descargas atmosféricas en la fase A.....	51
4.4 Corrientes diferenciales y comportamiento del relé para descargas atmosféricas en la fase B .....	52

4.5 Corrientes diferenciales y comportamiento del relé para descargas atmosféricas en la fase C.....	52
4.6 Comportamiento del relé para los diferentes intervalos de tiempo de conexión y desconexión .....	55

[www.bdigital.ula.ve](http://www.bdigital.ula.ve)

# INTRODUCCIÓN

El sistema eléctrico de potencia abarca desde la etapa de generación hasta el consumidor, representado por las cargas, pasando por una etapa de transmisión y distribución. Cada una de estas etapas cuentan con equipos de protección, siendo las etapas de generación y transmisión las que deben contar con mayor monitoreo y, por consiguiente, los equipos que las conforman deben tener mayor protección a fin de garantizar mayor la calidad del servicio eléctrico, el cual debe ser confiable, continuo y seguro. Sin embargo, existen diversos fenómenos físicos y naturales que hacen que el sistema sea vulnerable, y que pueden originar una inadecuada operación de los equipos de protección ante la presencia de una falla, como lo son la presencia de armónicos y transitorios electromagnéticos, que puede afectar el buen funcionamiento y desempeño de los relés. En esta oportunidad, se pretende verificar el funcionamiento específicamente de los relés diferenciales, ante la presencia de estos fenómenos.

El incremento de cargas lineales o no lineales en el sistema son capaces de generar armónicos pares o impares en las señales de corriente, no cumpliendo los criterios de ajuste originando graves problemas en la operación del relé diferencial y por consiguiente en los equipos protegidos. En este estudio, la sensibilidad del relé diferencial depende del tipo de relé y de los parámetros que se pueden ajustar, particularmente en el programa seleccionado para su modelado como es el PSCAD versión libre, el cual tiene limitaciones en cuanto a la variedad de equipos, sin embargo, el modelo con que se cuenta, contiene los principios básicos de operación.

Aquí se va a enfocar el estudio en determinar el comportamiento del relé diferencial ante fallas ocasionadas por distorsión armónica y transitorios electromagnéticos en el sistema, este último originado por maniobras o fenómenos naturales; como conexión y desconexión de un banco de capacitores para corregir el consumo de reactivos en el sistema o el impacto de una descarga atmosférica en las líneas de transmisión, utilizando como se dijo previamente el software comercial PSCAD.



Para mayor comprensión del trabajo desarrollado, la estructura de este trabajo se desglosa de la siguiente manera:

El primer capítulo describe el problema e incluye generalmente las investigaciones previas para el actual análisis, se justifica el desarrollo del mismo y se plantean objetivos de estudio para ser alcanzados junto con las limitaciones que se deben tomar en cuenta.

El segundo capítulo plantea las bases teóricas para comprender los fenómenos involucrados y llevar a cabo dicho estudio.

El tercer capítulo analiza el modelado en el Software PSCAD del relé diferencial ante presencia de armónicos originados por cargas lineales, no lineales y posibles fallas en el sistema.

El cuarto capítulo analiza el modelado en el Software PSCAD del relé diferencial ante transitorios electromagnéticos originados por maniobras en la red e impactos de fenómenos naturales como la descarga atmosférica.

Finalmente, se presentan las conclusiones y recomendaciones generadas a partir del trabajo desarrollado

# **CAPÍTULO I**

## **¿POR QUÉ MODELAR LA PROTECCIÓN DIFERENCIAL?**

El presente capítulo expone el planteamiento del problema, la justificación, la metodología a utilizar y los objetivos trazados para llevar a cabo el estudio de los efectos de la distorsión armónica y transitorios electromagnéticos en relés diferenciales.

### **1.1 ANTECEDENTES**

En el siguiente fragmento del presente trabajo se pretende realizar un bosquejo en las investigaciones y estudios en el cual hacen uso del programa PSCAD para modelar y analizar el comportamiento bajo los efectos de distorsión armónica y transitorios electromagnéticos en dispositivos de protección como los relés diferenciales presentes en los principales sistemas de potencia. En abril del 2018, el Ing. Gabriel José Alviares Paredes presentó un trabajo de grado para obtener el título de Ingeniero Electricista titulado: ESTUDIO DE LOS EFECTOS DE DISTORSIÓN Y TRANSITORIOS ELECTROMAGNÉTICOS EN RELÉS DE SOBRECORRIENTE Y FUSIBLES, en el que utiliza el software PSCAD versión comercial para modelar y simular dispositivos de protección de sobrecorriente, presentando una diferencia al llevar a cabo una modificación en los parámetros nominales de funcionamiento, además en presencia de fallas ante una carga lineal y una carga no lineal, esta última ocasiona un impacto en dichos dispositivos de distorsión armónica, así como la respuesta no estable ante fallas ocasionadas por transitorios electromagnéticos[11].

### **1.2 PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA.**

El sistema de suministro y transporte de energía eléctrica debe cumplir con varios requisitos indispensables para prestar un servicio de calidad y seguridad, esto en parte se cumple a normas y procedimientos muy precisos, por ello existen equipos que garantizan

el buen funcionamiento, operatividad y continuidad como lo son entre tantos los equipos de protección, sin embargo, la errada configuración que puedan tener estos equipos al no detectar fallas o actuar fuera de valores específicos puede generar un gran daño para todo un sistema de potencia. Es por esto que el sistema de protección debe ser capaz de detectar el problema inmediatamente y aislar la sección afectada. Los relés de protección diferenciales poseen un sistema muy eficiente, aunque su estudio para fallas no lineales o transitorios electromagnéticos no arrojen el mejor resultado si no son tomados en cuenta.

Por ello se realiza el estudio ante diferentes fallas que puedan presentarse en el sistema de potencia considerando los distintos fenómenos, esto con la ayuda de herramientas computacionales que permitirán realizar simulaciones para analizar el comportamiento de dicho equipo, ofreciendo una visión clara de las fallas o anomalías, así como también la selección de parámetros que deben ser tomados en cuenta para la configuración de estos equipos y su correcta operatividad.

### **1.3 JUSTIFICACIÓN**

Todas etapas que conforman un sistema de potencia, desde la generación hasta los consumidores, deben cumplir con importantes criterios de continuidad, confiabilidad y calidad de servicio, para lo cual se debe contar con un sistema de protección que permita garantizar dichas funciones. Dentro de los dispositivos utilizados para proteger equipos particulares como generadores, transformadores y líneas de transmisión se encuentran los relés diferenciales cuya función principal es detectar y despejar las corrientes de falla en los equipos antes mencionados, cumpliendo con uno de los criterios principales de diseño que toda falla debe ser despejada en el menor tiempo posible, a fin de minimizar los efectos de la falla y de esa manera garantizar la seguridad tanto al sistema como a los usuarios.

Como es bien sabido estos dispositivos han sido diseñados para trabajar continuamente en condiciones nominales del sistema, y deben operar solo cuando ocurra una falla, entendiéndose como condiciones nominales aquellas en las que los sistemas están trabajando con cargas lineales y sistemas balanceados de tensión y corriente, con fuentes senoidales de alimentación, sin embargo hoy en día existen numerosas cargas no lineales conectadas al

sistema que pueden producir numerosas distorsiones en las ondas de voltaje y corriente que pueden por consiguiente traer serios problemas como: sobrecalentamiento de conductores o transformadores, fallas en los bancos de capacitores, mala operación de los interruptores, disparos inadecuados de los relés y fusibles por sobrecalentamiento y en general mal funcionamiento de los equipos electrónicos presentes en la red.

Todo lo descrito previamente lleva a la necesidad de realizar un análisis de la operación de los dispositivos de protección diferencial ante la presencia de distorsiones armónicas, además se puede evaluar cuál es su comportamiento ante la presencia de transitorios electromagnéticos. El análisis del comportamiento de estos dispositivos se plantea realizarlo utilizando el software comercial PSCAD/EMTDC® utilizando la versión libre proporcionada por los fabricantes de dicho software.

## **1.4 OBJETIVO**

### **1.4.1 General**

Estudiar y analizar los efectos de la distorsión armónica y transitorios electromagnéticos en relés diferenciales.

### **1.4.2 Específicos**

- Estudiar y comprender el funcionamiento de los equipos de protección, particularmente los relés diferenciales.
- Estudiar las diferentes herramientas matemáticas utilizadas para el modelado de los dispositivos de protección en el caso particular de los relés diferenciales.
- Estudiar y comprender el uso del programa PSCAD/EMTDC® como herramienta necesaria para el modelado de los dispositivos de protección como los relés diferenciales.
- Utilizar el programa PSCAD/EMTDC® para modelar los relés diferenciales y analizar su comportamiento ante la presencia de distorsión armónica y transitorios electromagnéticos.
- Comparar y validar resultados obtenidos por otros autores.

## **1.5 METODOLOGÍA**

El trabajo a desarrollar es tipo combinado en el que se hace una revisión documental en el que se comienza por estudiar todo lo relacionado con los dispositivos de protección utilizados en un sistema de potencia y será de tipo práctico al utilizar el programa para análisis PSCAD/EMTDC®, este para realizar las simulaciones y observar el comportamiento de la protección diferencial ante la presencia de diferentes tipos de falla que pudieran presentarse en el sistema de potencia, y considerar los efectos de la

distorsión armónica y transitorios electromagnéticos en el comportamiento de dichos dispositivos de protección, para luego ejecutar los respectivos análisis, requiriendo el previo manejo y comprensión de la herramienta a utilizar. Es por ello que se estudian los distintos modelos matemáticos para llegar a un modelado exitoso de como representar los relés diferenciales, partiendo de modelos desarrollados y comprobados por otros autores, y de esa manera validar los resultados aquí obtenidos.

## **1.6 ALCANCES**

El alcance principal de esta investigación es obtener un exclusivo estudio en el dispositivo de protección diferencial, modelando su comportamiento en el programa computacional PSCAD/EMTDC® ante la presencia de distorsión armónica y transitorios electromagnéticos ocasionada por fallas, como descargas atmosféricas en una de las fases de conducción, acciones de conexión/desconexión en bancos de capacitores y transformadores, tomando en cuenta las características eléctricas presentes en la línea de transmisión, así como también la operatividad de estos dispositivos (incluyendo generadores) ante la presencia de cargas no lineales que producen la distorsión armónica.

## **1.7 LIMITACIONES**

Este trabajo se basa en las simulaciones respectivas en efectos transitorios electromagnéticos y distorsión armónica producidos sobre los relés diferenciales en el software comercial PSCAD/EMTDC®, sin embargo existen diferentes especificaciones y pruebas que se llevan a

cabo con diseños personalizados y a conveniencia de lo que se desea mostrar ya que la versión libre de dicho software tiene carencia en diferentes módulos.

Además no existe un módulo que represente descargas atmosféricas por lo que se debe personalizar un módulo que cumpla con los parámetros normalizados internacionalmente.

Para el modulado de cargas conectadas a la red existen algunos ejemplos, sin embargo, se deben modular aquellas cargas para obtener los parámetros requeridos.

PSCAD/EMTDC® es un software que su interfaz de usuario es mucho más amigable que otros, sin embargo se debe tener un previo conocimiento para el buen uso y ejecución del mismo.

[www.bdigital.ula.ve](http://www.bdigital.ula.ve)

# CAPÍTULO II

## LA PROTECCIÓN DIFERENCIAL

El sistema de potencia contiene una serie de elementos necesarios para transportar la energía eléctrica es por ello que es indispensable garantizar la continuidad a través de técnicas de protección. A continuación se desglosan algunos conceptos y bases teóricas referidas a los sistemas de protección, específicamente orientados a lo que involucra a la protección y diferencial, su principio de funcionamiento, forma de construcción e implementación en un sistema de potencia, así como su modelado para análisis utilizando herramientas computacionales.

### 2.1 SISTEMA DE POTENCIA.

Un sistema eléctrico de potencia incluye las etapas de generación, transmisión, distribución y utilización de la energía eléctrica, su función primordial es la de llevar esta energía desde los centros de generación hasta los centros de consumo y por último entregarla al usuario en forma segura y con los niveles de calidad exigidos [1].

Los principales elementos que componen un sistema de potencia se pueden agrupar en tres grandes grupos de acuerdo con su función: sistemas de generación, sistemas de transmisión, sistemas de distribución. El sistema de generación es la parte básica del sistema de potencia, se encarga de entregar la energía eléctrica al sistema, esto a partir de la transformación de distintos tipos de energía primaria a partir de centrales o plantas generadoras, transformando una fuente de energía primaria a energía eléctrica. El sistema de transmisión posee un medio físico mediante el cual se realiza la transmisión de la energía eléctrica a grandes distancias como son las líneas de transmisión la cual está constituida tanto por el elemento conductor usualmente cables de acero, cobre o aluminio, como por sus elementos de soporte, las torres de alta tensión [2]. Las líneas de transmisión según su nivel de tensión se clasifican en [3]:

- Alto voltaje: Comprende niveles de tensión que van desde los 69 kV hasta los 230 kV.
- Extra alto voltaje: Comprende niveles de tensión desde 345 kV a 765 kV.
- Ultra alta tensión: Comprende tensiones mayores a 765 kV.

El sistema de distribución es el último elemento del sistema de potencia antes de llegar a los consumidores.

## **2.2 SISTEMA DE PROTECCIÓN.**

El sistema de protección se encuentra integrado por todos aquellos equipos y dispositivos destinados a la protección de las partes que conforman el sistema eléctrico de potencia. Ante la presencia de una falla, las protecciones asociadas al sistema deben actuar (detectar y localizar la falla), aislando aquellos equipos y zonas afectadas, de forma que no se propague la falla y se logre minimizar los daños producidos por la misma [4].

Los sistemas de protecciones han permitido el desarrollo de los grandes sistemas de potencia, con todas las ventajas de la interconexión, sin afectar la calidad y continuidad del servicio. La necesidad del sistema de protección en los sistemas de potencia es tan importante como lo pueden ser generadores o transformadores, ya que no es posible operar un sistema de potencia sin un adecuado sistema de protección, debido a que estos están encargados de salvaguardar los principales equipos que conforman la red de transmisión de energía eléctrica, ante cualquier posible eventualidad que merme contra la funcionalidad de dichos equipos, denotando con esto la importancia que los sistemas de protecciones tienen dentro del universo de los sistemas de potencia.

### **2.2.1 Elementos básicos de un sistema de protección.**

Un relé es un elemento de vigilancia que recibe una o varias señales del sistema de potencia, que actúa dependiendo de la información recibida por parámetros establecidos previamente en él, abriendo o cerrando contactos, dando generalmente órdenes de apertura a uno o varios interruptores, con la finalidad de despejar las fallas o eventos ocurridos en el sistema, los cuales, están dentro de su zona de actuación [3].



Se alimentan por medio de equipos de medición, transformadores de corriente y transformadores de potencial, que informan al relé de las condiciones que presenta el Sistema de Potencia. Figura 2.1.

Los transformadores de potencial son utilizados para adecuar los niveles de tensión a los alcances de los elementos de medición y protección del sistema de potencia. La tensión nominal del primario de estos elementos queda definida a partir de las características del sistema conectado directamente al circuito de alimentación, ya sea entre dos fases o entre una fase y tierra, mientras que la tensión nominal del devanado secundario será seleccionada dependiendo de la práctica asociada a la localidad en que se encuentra el transformador [5].

Los transformadores de corriente para protecciones deben reproducir con exactitud la corriente de carga y la corriente de cortocircuito, que normalmente tiene valores muy elevados para que los relés de protección puedan operar correctamente. Por tanto los transformadores de corriente deben mantener una precisión razonable para corrientes de cortocircuito elevadas. Las normas ANSI requieren que el transformador no exceda un error determinado para corrientes secundarias hasta de 20 veces la corriente nominal. Los límites de precisión normalizados son 5, 10, 15, 20 y 30 [6].

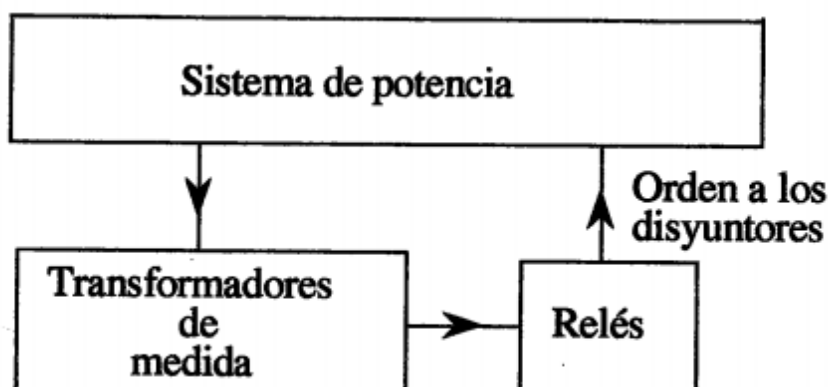


Figura 2.1 Diagrama de bloques de un Sistema de Protección [6].

### 2.3 PROTECCIÓN DIFERENCIAL.

En presencia de fallas en el sistema eléctrico de potencia, principalmente en componentes de gran importancia como el transformador, líneas de transmisión y en el generador, se cuenta

con equipos de selectiva protección como el relé diferencial, este es un dispositivo que responde a la diferencia fasorial entre dos o más cantidades eléctricas semejantes.

La protección diferencial es la forma de conectar el equipo protegido, el relé diferencial y dos o más transformadores de corriente (TC). Sin embargo la zona de protección diferencial queda entre los TC. Ver figura 2.2.

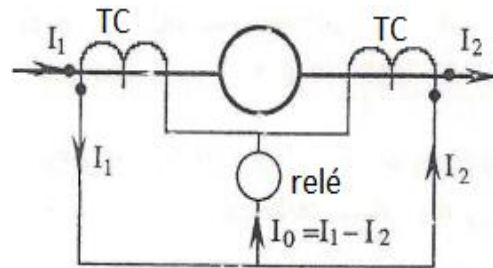


Figura 2.2 Conexión de un relé diferencial [6].

### 2.3.1 Fallas en un relé diferencial.

**Corriente circulante de paso sin falla o con falla externa:** Durante la falla externa a la zona diferencial,  $I_1 = I_2$ , y la corriente de operación  $I_o = 0$  es cero. Para una falla interna  $I_1 \neq I_2$ , la corriente de operación  $I_o \neq 0$  y el relé opera.

Como se menciona anteriormente, este dispositivo de protección es altamente selectivo siendo capaz de diferenciar cuando una falla es externa o interna.

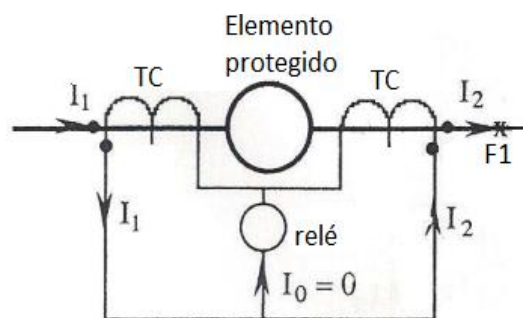


Figura 2.3 Falla externa a la derecha [6].

Donde: 
$$I_1 = I_2 \quad (2.1)$$

$$I_o = I_1 - I_2 = 0, \text{ el relé no opera.} \quad (2.2)$$

$I_1$  entra al campo de protección,  $I_2$  sale del campo de protección, es decir, esta es negativa según la definición de signos, por lo tanto  $I_2 = -I_1$

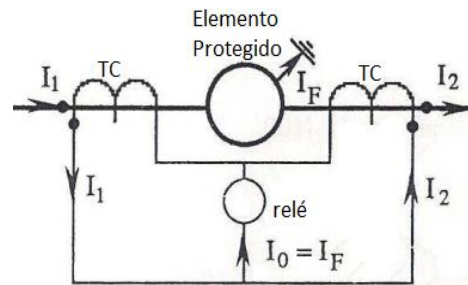
$$|I_2| = |I_1|$$

$$I_{dif} = |I_1 + I_2| = |I_1 - I_1| = 0$$

$$I_{estab} = |I_1| + |I_2| = |I_1| + |I_1| = 2 \cdot |I_1|$$

Sin magnitud de disparo ( $I_{dif} = 0$ ), la estabilización  $I_{estab}$  corresponde al doble de la intensidad circulante de paso.

**Cortocircuito interno:** Durante una falla interna  $I_1 \neq I_2$  por lo que se observara la actuación del relé



**Figura 2.4 Falla interna [6].**

Donde:  $I_1 \neq I_2$  (2.3)

$$I_0 = I_1 - I_2 = I_F, \text{ el relé opera.} \quad (2.4)$$

Está demostrado que los transformadores de corriente (TC) presentan inexactitud lo que puede llevar al sistema a una errónea transformación antes fallas externas, alterando las corrientes de en la zona de protección siendo  $I_1 \neq I_2$  haciendo que el relé opere sin ser requerido. Para reducir inconvenientes de este tipo se han añadido elementos a la configuración convencional con el objetivo de alcanzar mayor estabilidad en los mismos. Es importante destacar que la excelencia de operación en la protección diferencial es proporcional a la estabilidad de los transformadores de corrientes y al mismo tiempo de la sensibilidad del dispositivo de protección (relé diferencial). En la figura 2.5 se observa la característica de disparo de la protección diferencial con falla.

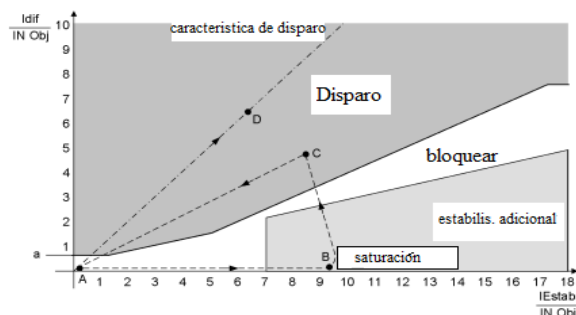


Figura 2.5 Característica de disparo de la protección diferencial con falla [7].

### 2.3.2 Causas de las fallas.

**Falla temporal:** Se define como aquellos tipos de fallas que puede ser liberada antes de que ocurra algún daño serio al equipo o a las instalaciones. Su ocurrencia de carácter transitorio les permite incluso ser autodespejantes [7].

**Falla permanente:** Son fallas que tienden a persistir a pesar de la rapidez con la que el circuito se desenergiza. Si dos o más conductores desnudos en un sistema aéreo de alimentación se juntan debido a ruptura de postes, crucetas o conductores, la falla será permanente [7].

**2.3.3 Detección de componentes continuas:** Ocurre una estabilización adicional, si por los diferentes comportamientos secundarios transitorios de los juegos de transformadores se simula una corriente diferencial. Esto ocurre cuando se produce una corriente debido a las diferentes constantes de tiempo de corriente continua en el circuito secundario de los transformadores de corriente, es decir las componentes continuas primarias idénticas se transforman distintas del lado secundario y producen una componente continua en la corriente diferencial, esta componente continua es reconocida y se procede con una elevación momentánea de los valores de arranque escalón diferencial.

**2.3.4 Estabilización con armónicos:** Especialmente en los transformadores y reactancia transversales pueden producirse durante un cierre altas corrientes de magnetización de duración breve (corriente *inrush*), que fluyen a la zona de protección sin volver a salir, estas actúan por lo tanto como corrientes de falla unilaterales. También durante acoplamiento en paralelo de transformadores o por sobreexcitación de un transformador debido a una tensión elevada o una frecuencia reducida pueden producirse corrientes diferenciales indeseadas.

La corriente *inrush* puede alcanzar un múltiplo de la corriente nominal y se caracteriza por

su contenido relativamente alto de segundo armónico (el doble de la frecuencia nominal) que en caso de un cortocircuito prácticamente no aparece, por lo tanto, si el contenido de segundo armónico de la corriente diferencial sobrepasa un umbral ajustable, se impide el disparo.

La sobreexcitación estacionaria se caracteriza por armónicos de número impar. En este caso el tercero y el quinto armónico son apropiados para la estabilización. Ya que en los transformadores muchas veces se elimina el tercer armónico (ejemplo: un devanado delta), se utiliza aquí generalmente el quinto.

Como la estabilización por *inrush* actúa individualmente para cada fase, la protección tiene también efectividad óptima, ejemplo : si se conecta el transformador sobre una falla monofásica, mientras que posiblemente en otro conductor sano circule una corriente *inrush* de cierre, sin embargo, también existe la posibilidad de ajustar la protección de tal manera que al sobrepasarse el contenido admisible de armónicos de la intensidad de un solo conductor, no se bloquee únicamente el conductor afectado por la corriente *inrush* si no también los demás conductores del escalón diferencial, esta función denominada crossblock (bloqueo mutuo) se puede limitar a una duración determinada.

## **2.4 PROTECCIÓN DIFERENCIAL EN TRANSFORMADORES DE POTENCIA.**

Un sistema diferencial puede proteger efectivamente un transformador debido a la confiabilidad inherente de los relés, los cuales son altamente eficientes en la operación y al hecho de que los amperios-vueltas equivalentes son desarrollados en los devanados primario y secundario del transformador. Los TC son conectados de tal forma que ellos forman un sistema de corriente circulante.

Las fallas en los terminales o en los devanados están dentro de la zona de protección del transformador y debe ser despejada tan rápidamente como sea posible a fin de evitar esfuerzos internos y peligro de incendio. La mayoría de las fallas internas que ocurren son a tierra (a través del núcleo) o entre espiras, con una severidad que depende del diseño del transformador y del tipo de puesta a tierra.

La protección diferencial también puede detectar y despejar las fallas de aislamiento en los devanados del transformador. La causa principal de estas fallas es la formación de arcos en el interior de los pasatapas y fallas en el intercambiador de derivaciones. Este tipo de protección no solamente responde a las fallas fase a fase y fase a tierra sino también en algún grado a las fallas entre espiras. Sin embargo, las fallas fase a fase de los devanados de un transformador trifásico son menos comunes. Una falla interna que no constituye un peligro inmediato mencionado anteriormente es llamada incipiente y si dicha falla no es detectada con el tiempo, puede resultar en una falla mayor. Las principales fallas en este grupo son las fallas en el núcleo causadas por el deterioro del aislamiento entre las láminas que constituyen el núcleo.

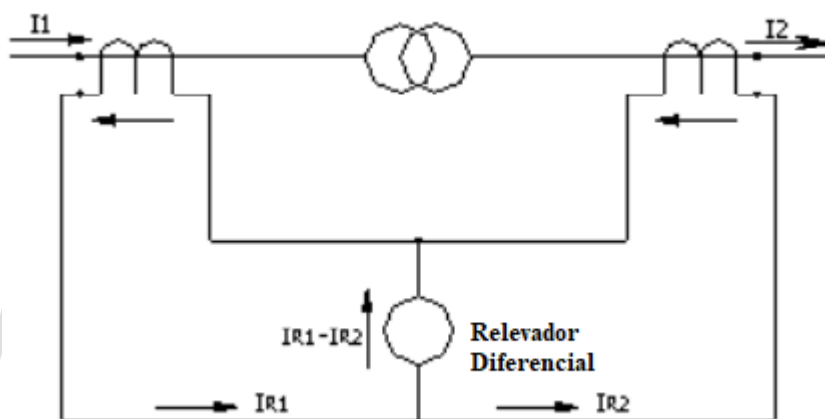


Figura 2.6 Protección diferencial de un transformador [7].

**2.4.1 Consideraciones básicas:** Con el fin de aplicar los principios de la protección diferencial a transformadores trifásicos, los siguientes factores deben ser tenidos en cuenta [7].

**Relación de transformación:** las corrientes nominales en los lados primario y secundario de un transformador varían en relación inversa a los voltajes correspondientes. Esto debe compensarse mediante el uso de relaciones de transformación diferentes para los TC sobre los lados primario y secundario del transformador. Además los TC deben tener valores nominales que corresponden a las corrientes nominales del devanado del transformador al cual ellos son aplicados, y que sus corrientes secundarias sean aproximadamente iguales.

**Conexiones del transformador:** cuando un transformador es conectado en estrella-delta, la corriente secundaria tiene un desplazamiento de fase de un múltiplo de  $30^\circ$  relativo al primario dependiendo del grupo vectorial este corrimiento puede ser compensado por las conexiones

secundarias convenientes del TC. Además, la corriente de secuencia cero que fluye en el lado estrella del transformador no inducirá corriente en el devanado delta sobre el otro lado. La corriente de secuencia cero puede por lo tanto, ser eliminada del lado estrella conectando los TC en delta. Por la misma razón, los TC en el lado delta del transformador deben ser conectados en estrella. Cuando los TC son conectados en delta, sus valores nominales secundarios deben ser multiplicados por  $\sqrt{3}$  así que las corrientes que fluyen en la delta están balanceadas por las corrientes secundarias de los TC conectados en estrella.

**Cambiador de derivaciones:** si el transformador tiene cambiador de derivaciones es posible variar la relación de transformación, y cualquier sistema de protección diferencial debe ser capaz de hacer frente a esta variación. Como no es práctico variar las relaciones de transformación de los TC, la protección diferencial debe tener un rango de tolerancia conveniente para poder modificar la sensibilidad de su respuesta de operación. Por esta razón es necesario incluir alguna forma de polarización en el sistema de protección junto con algunas marcas de identificación de los terminales de entrada de corriente.

Debe entonces tenerse en cuenta la variación de la relación de transformación debido al cambiador de derivaciones. Algunos relés vienen con ajustes en la restricción que pueden usarse para compensar esto y garantizar la estabilidad de la protección. En fallas externas pueden aparecer corrientes que hagan operar el relé debido a una relación de transformación diferente.

**Corriente *inrush* de magnetización:** Este fenómeno ocurre cuando el transformador es energizado, o cuando el voltaje primario retorna a su valor normal después de despejar una falla externa. El *inrush* de magnetización produce un flujo de corriente en el devanado primario, el cual no tiene equivalente en el devanado secundario. El efecto neto es similar a la situación donde hay una falla interna en el transformador. Puesto que el relevador diferencial ve la corriente de magnetización como una falla interna, es necesario tener algún método para distinguir entre la corriente de magnetización y la corriente de magnetización y la corriente de falla. Estos métodos incluyen:

- La utilización de un relé diferencial con la sensibilidad adecuada para hacer frente a la corriente de magnetización, usualmente obtenida por una unidad que introduce un retraso de tiempo para cubrir el periodo del pico *inrush* inicial.

- El empleo de una unidad de restricción de armónicos, o una unidad de supervisión en conjunto con una unidad diferencial.
- Inhibición del relé diferencial durante la energización del transformador.

**Selección y conexión de los TC:** Los siguientes factores deben ser tomados en cuenta cuando se considera la aplicación del sistema de la protección diferencial:

- a. En general, los TC en el lado estrella de un transformador estrella-delta deben ser conectador en delta y los del lado delta deben ser conectador en estrella. Este arreglo compensa el desplazamiento de fase al otro lado del transformador, y bloquea la corriente de secuencia cero en el evento de fallas externas a tierra.
- b. Los relevadores deben ser conectador para admitir la corriente de carga que entra por un lado del transformador y que sale por el otro. Si existen más de dos devanados, es necesario considerar todas las combinaciones, tomando dos devanados a la vez.
- c. Las relaciones de los TC deben seleccionarse para producir al máximo balance posible entre las corrientes secundarias de ambos lados del transformador bajo condiciones de carga máxima. Si hay más de dos devanados, deben considerarse todas las combinaciones, tomando dos devanados a la vez y potencia nominal del devanado primario. Las relaciones de los TC disponibles no permiten hacer la adecuada compensación para cualquier variación en la corriente secundaria de los TC, luego los transformadores de compensación pueden ser usados para contrarrestar el desplazamiento de fase al otro lado del transformador.

**Porcentaje de devanado protegido por el relevador diferencial durante una falla a tierra:**

Aunque la protección diferencial es muy confiable para proteger transformadores de potencia, los devanados no siempre están totalmente protegidos, especialmente en el caso de fallas monofásicas.

**Determinación de la pendiente:** el ajuste de la pendiente de los relevadores diferenciales es realizado con la seguridad de que no operara mal a causa de las diferencias en las corrientes en



los devanados de restricción debido a las relaciones de transformaciones de los TC y la operación de los cambiadores de taps bajo condiciones de carga. Para determinar la pendiente, los torques de restricción y de operación son calculados sobre las bases de las corrientes y el número de espiras en las bobinas respectivas como se propone enseguida [7].

$$T_{restriccion} = I_1 N_{R1} + I_2 N_{R2} \quad (2.5)$$

$$T_{operacion} = |I_1 - I_2| N_{op} \quad (2.6)$$

Donde:

$I_1, I_2$  = Corrientes en los secundarios de los TC.

$N_{R1} = N_{R2}$  = Número de espiras en las bobinas de restricción.

Para que el relevador opere,  $T_{operacion} > T_{restriccion}$  es decir,

$$|I_1 - I_2| N_{op} > I_1 N_{R1} + I_2 N_{R2}$$

Si  $N_{R1} = N_{R2} = \frac{N_R}{2}$ , esto luego da:  $T_{restriccion} = (I_1 + I_2) \left(\frac{N_R}{2}\right)$

Para que el relevador opere, la pendiente es:

$$m = \frac{N_{restriccion}}{N_{operacion}} < \frac{|I_1 - I_2|}{0.5|I_1 + I_2|} \quad (2.7)$$

**Distribución de la corriente de falla en los transformadores de potencia:** cuando se considera la operación de la protección diferencial es importante tener en cuenta la distribución de la corriente de falla en todos los devanados para asegurar que los ajustes que han sido seleccionados tienen una sensibilidad conveniente. Este es particularmente crítico para fallas monofásicas en transformadores que estén aterrados mediante una impedancia.

## 2.5 PROTECCIÓN DIFERENCIAL PARA GENERADORES

La práctica normalizada es recomendar la protección diferencial para proteger contra cortocircuito a los generadores de 1 MVA nominales o mayores hasta 10 MVA y la mayoría de estos están protegidos con relé diferenciales. Por encima de los 10 MVA se usan los relés diferenciales de porcentaje.

La protección diferencial para generadores y otras máquinas rotativas es similar a la de los transformadores en muchas formas. Las fallas internas de los devanados del generador incluyen: cortocircuitos fase-fase, cortocircuitos entre espiras, circuitos abiertos y fallas a tierra, y el generador debe ser desconectado mediante la apertura del circuito tan rápido como sea posible. Con el fin de obtener la más efectiva forma de protección diferencial, el neutro del generador debe estar bien aterrado, o sólidamente o por medio de un resistor o de un reactor. La protección diferencial debe satisfacer los siguientes requerimientos: [4].

1. Deben ser los suficientemente sensibles para detectar daños del estator del generador y no operarán para fallas externas a la máquina.
2. Debe operar rápidamente de tal manera que en el generador sea desconectado antes de que resulte un daño grave.
3. Debe ser diseñado para que abra el interruptor principal, así como el interruptor del neutro y el interruptor del campo. El tamaño del generador no es el que necesariamente determina la calidad de la protección, lo importante es el efecto de una falla prolongada en el generador en el resto del sistema, y que tan grandes serían los trastornos si el generador sufre un daño considerable y tiene que quedar fuera del servicio por largo tiempo.

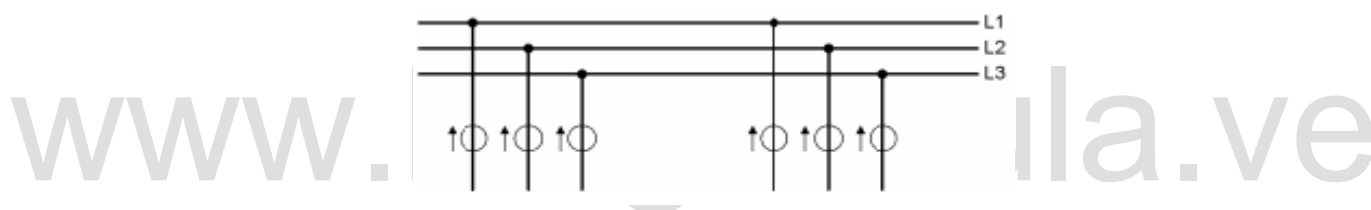
**2.5.1 Protección contra fallas entre espiras en devanados del estator:** El método convencional para proporcionar protección de fallas entre espiras es el relé de fase partida. Si hay más de dos circuitos por fase, estos están divididos en dos grupos iguales de circuitos paralelos con un TC para cada grupo. El relé de la fase partida operará para cualquier tipo de cortocircuito en los devanados del generador, aunque no proporciona tan buena protección como la diferencial para algunas fallas. Los relevadores de fase partida harían funcionar el mismo relevador auxiliar de disparo de reposición manual que hace funcionar los relés diferenciales.

Se utiliza un relé de corriente de tiempo inverso para la protección de fase partida en vez de un relevador diferencial de porcentaje instantáneo, para obtener la sensibilidad requerida y debe responder cuando hay solo una espira en cortocircuito, y no debe responder a cualquier desequilibrio transitorio que pueda haber cuando ocurren fallas externas [8].

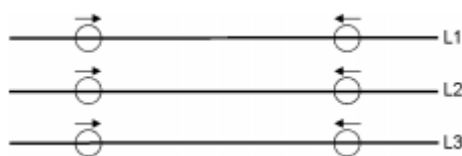
## 2.6 PROTECCIÓN DIFERENCIAL PARA PEQUEÑAS BARRAS Y LINEAS CORTAS.

Una pequeña barra o un punto nodal se definen como un segmento conductor trifásico conjunto, limitado por transformadores de intensidad. Estos puntos nodales pueden ser líneas de salidas cortas o pequeñas barras. La protección diferencial en este modo operacional no puede ser utilizada para transformadores [8].

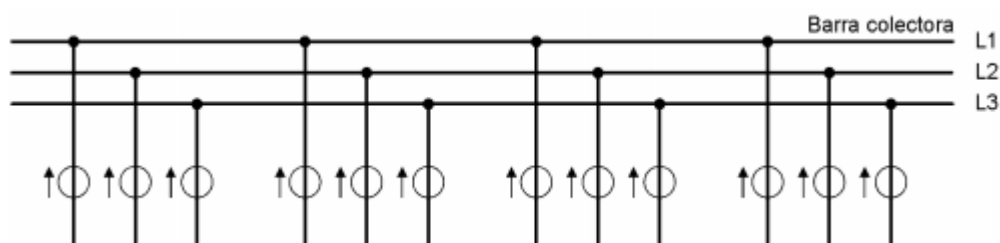
Este modo de aplicación es adecuado también para líneas cortas, aquí significa tramo “corto”, que la conexión desde el terminal de las líneas de los transformadores de corrientes hasta el equipo, no representa ninguna carga inadmisibles para los transformadores. Las corrientes capacitivas transversales de los cables no tienen ningún efecto, ya que la protección diferencial en esta aplicación generalmente no se muestra muy sensible [7]. En la protección diferencial, la dirección de la corriente hacia el objeto a proteger se considera usualmente como positiva:



**Figura 2.7 Definición del sentido de la corriente en un nodo (barra con dos salidas de línea), L2 barra colectora [7].**



**Figura 2.8 Definición del sentido de la corriente para líneas cortas.**



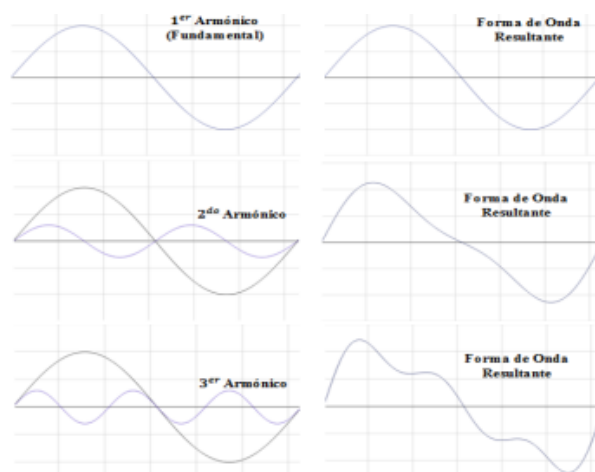
**Figura 2.9 Definición del sentido de la corriente en una barra con (4 salidas de línea) [7].**

**2.6.1 Supervisión de la corriente diferencial:** Mientras que para transformadores, reactancias y máquinas de rotación, generalmente, se prefiere establecer una protección diferencial con un ajuste muy sensible, de manera de poder detectar fallas con intensidades de error mínimas, en las barras o líneas cortas se debe calcular con intensidades de cortocircuito de mayor valor y por lo tanto ajustar valores de arranque más elevados (sobre el valor nominal). De esta manera es posible supervisar la intensidad de carga normal, detectar una falla en el circuito secundario de los transformadores de intensidad.

Esta función de supervisión es selectiva para cada fase conductora. Si durante el funcionamiento en carga se produce una intensidad diferencial similar a la corriente de una salida de línea. Esto caracteriza la ausencia de una de las corrientes secundarias, es decir uno de los circuitos secundarios del transformador de intensidad tienen un defecto. Esto se señala de manera retrasada. Al mismo tiempo se bloquea la protección diferencial de la fase afectada [8].

## 2.7 ARMONÍCOS.

Los armónicos se pueden definir como una componente sinusoidal de una onda periódica o cantidad que posee una frecuencia múltiplo de la frecuencia fundamental. De esta manera los armónicos son corrientes o tensiones cuyas frecuencias son múltiplos enteros de la frecuencia fundamental de alimentación (60 Hz en este trabajo) [9].



**Figura 2.10** Forma de onda de la componente fundamental, 1er, 2do y 3er armónico, y la forma de onda resultante [9].

**2.7.1 Distorsión de la forma de onda:** La forma de onda de la tensión y la corriente en un sistema de distribución, con cargas lineales, se presentan con una onda sinusoidal con frecuencia 60 Hz, y valor 1 p.u. de la corriente o voltaje correspondiente respectivamente, por lo que solo se representa la señal fundamental como se observa en la figura 2.12. Cuando una onda periódica no tiene esta forma sinusoidal se dice que tiene contenido armónico, lo cual puede alterar su valor pico o valor RMS causando alteraciones en el funcionamiento normal de los equipos que estén sometidos a esta tensión o corriente. Como anteriormente se dijo, los armónicos son corrientes o voltajes con frecuencias múltiplos de la fundamental (120, 180, 240 Hz). Aunque la fundamental continua siendo una señal sinusoidal, la forma de onda resultante se puede representar como la sumatoria de todas las componentes múltiplos de su frecuencia que intervengan en el sistema, de esta forma se puede observar en la figura 2.12 como las componentes armónicas distorsionan la forma de onda. Siendo su resultante entonces, la sumatoria de estas componentes aumentando su valor pico [10].

**Componente fundamental:** La magnitud de la componente fundamente debe ser medida en todo instante de tiempo, debido a que dicho valor deber ser comparado con las magnitudes de segunda y quinta armónica. Cuando alguna de las dos cantidades en cuestión, sobrepasa cierto porcentaje se dice que el transformador de potencia experimenta una corriente de energización *inrush* o se encuentra en un estado de sobreexcitación, causado por sobrevoltajes temporales debido a la desconexión de carga considerable.

La corriente de restricción  $I_{R1}$  se forma a través de la componente fundamental de frecuencia, del lado primario y secundario mediante la ecuación 2.11

$$I_{R1} = I_{1p} + I_{1s} \quad (2.8)$$

**Componente de segunda armónica:** La existencia de la corriente *Inrush* o de energización del transformador de potencia, presenta un alto contenido de segunda armónica de frecuencia, la cual debe ser comparada con la magnitud de la componente fundamental. La corriente de restricción de segunda armónica se determina a partir de la ecuación 2.12

$$I_{R2} = |I_{D2a}| + |I_{D2b}| + |I_{D2c}| \quad (2.9)$$

Si la componente de la segunda armónica sobrepasa el valor de la componente fundamental en un 20% de la corriente diferencial, se dice que el transformador de potencia experimenta una

condición de energización, dicha corriente solo se presenta en el devanado en el cual se inyecta el voltaje de alimentación, la cual consecuentemente genera una corriente diferencial que desconecta el equipo innecesariamente, por lo tanto, si la magnitud de la componente de segunda armónica, supera en un 20% la magnitud de la componente fundamental, se bloquea el disparo del relé diferencial [9].

La corriente de *inrush* puede afectar la protección diferencial del transformador, ya que esta corriente sólo fluye por un devanado y puede aparecer en la protección diferencial como una falla interna. Sin embargo, esta señal de corriente presenta un alto contenido de corrientes armónicas, entre ellas la 2ª y 4ª; característica que puede aprovecharse en el relevador para que las detecte y de esta manera discrimine entre la corriente de *inrush* y una corriente de falla

**Componente de quinta armónica:** La actuación del relé diferencial debe ser bloqueada cuando la corriente diferencial de quinta armónica sobrepasa un 30% de la componente fundamental, debido a que dicha diferencia de corriente se da cuando existe una sobreexcitación, ocasionada generalmente por desconexiones de carga considerables, que no representa una condición de falla. La corriente de restricción de quinta armónica se determina a partir de la ecuación 2.13

$$I_{R5} = |I_{D5a}| + |I_{D5b}| + |I_{D5c}| \quad (2.10)$$

Una condición de sobrevoltaje o de baja frecuencia puede producir niveles de flujo que saturan el núcleo de un transformador. Por ejemplo, si una carga se desconecta repentinamente de un transformador, entonces la tensión en las terminales aumenta un poco y causa un incremento en la corriente de excitación del transformador. Dicha corriente de excitación fluye por un solo devanado y aparece como una corriente diferencial que puede disparar al relevador. Este fenómeno se caracteriza por tener un alto contenido de corriente de 3ª y 5ª armónica, esta característica puede utilizarse para bloquear la operación del relevador diferencial en condiciones de sobreexcitación del transformador

**2.7.2 Transformada de Fourier:** Es simplemente una transformación matemática que se utiliza para transformar señales que están en el dominio del tiempo a señales respectivas de las mismas pero en el dominio de la frecuencia [11].

**Transformada rápida de Fourier:** Representa un algoritmo que de manera más eficiente y ahorrando una cantidad sustancial de cálculos, permite obtener la transformada discreta de Fourier y su inversa. Es utilizada en programas de simulación como lo es PSCAD, para realizar el análisis de distorsión armónica.

**VARIABLES IMPORTANTES DE MEDICIÓN:** En este caso para analizar los efectos producidos por los armónicos se utilizan generalmente unos índices que cuantifican el nivel de contaminación armónica de las ondas, estos son: [9]

- Distorsión armónica individual de voltajes y corrientes DVh, DIh respectivamente.
- Distorsión armónica total de volteejes THD.
- Distorsión armónica total de corrientes THD.

**2.7.3 Fuentes de armónicos:** La inyección de componentes armónicos en una red de distribución son resultado de cargas no lineales, con respuestas no senoidales ante alimentación con señales senoidales, las principales fuentes responsables de armónicos son, estaciones de DC de transmisión de alto voltaje, hornos de arco, hornos de inducción, convertidores de AC a DC (inversores), controladores de velocidad ajustables como los usados en sistemas de tracción, ventiladores, bombas y controladores de procesos entre muchos más.

## 2.8 TRANSITORIOS ELECTROMAGNETICOS.

Un transitorio electromagnético es la manifestación externa de una variación rápida en las condiciones de un circuito por la interacción entre las energías eléctricas y magnéticas almacenadas en capacitores y en inductores. Este fenómeno se puede presentar por el impacto directo e indirecto de una descarga atmosférica sobre el sistema eléctrico, por conexión y reconexión de transformadores, de banco de capacitores, así como por fallas de diversos tipos. Estos eventos ocurren a tiempos de muy corta duración en comparación al tiempo en el que opera el sistema en estado estable, y se producen tensiones y corrientes con valores altamente elevados (sobretensiones y sobrecorrientes) [12].

**2.8.1 Sobretensiones y sobrecorrientes:** Una sobretensión, es una tensión anormal existente entre fase y tierra, o entre fases, cuyo valor pico es superior al valor pico del máximo voltaje de operación normal. Según la Norma IEC 60071-2[39] los sobrevoltajes se clasifican de

acuerdo a su forma y duración en sobrevoltajes: de baja frecuencia y transitorios. Ver figura 10

Clases de sobrevoltajes	Baja Frecuencia		Transitorios		
	Permanente	Temporal	Frente lento	Frente Rápido	Frente Muy Rápido
Forma de onda de voltajes y sobrevoltajes					
Rango de formas de onda de voltajes y sobrevoltajes	$f = 50 \text{ Hz}$ or $60 \text{ Hz}$ $T_t \geq 3 \text{ 600 s}$	$10 \text{ Hz} < f < 500 \text{ Hz}$ $0,02 \text{ s} \leq T_t \leq 3 \text{ 600 s}$	$20 \mu\text{s} < T_p \leq 5 \text{ 000 } \mu\text{s}$ $T_2 \leq 20 \text{ ms}$	$0,1 \mu\text{s} < T_1 \leq 20 \mu\text{s}$ $T_2 \leq 300 \mu\text{s}$	$T_f \leq 100 \text{ ns}$ $0,3 \text{ MHz} < f_1 < 100 \text{ MHz}$ $30 \text{ kHz} < f_2 < 300 \text{ kHz}$
Parámetros de voltaje estandarizado					a
	$f = 50 \text{ Hz}$ or $60 \text{ Hz}$ $T_t^a$	$48 \text{ Hz} \leq f \leq 62 \text{ Hz}$ $T_t = 60 \text{ s}$	$T_p = 250 \mu\text{s}$ $T_2 = 2 \text{ 500 } \mu\text{s}$	$T_1 = 1,2 \mu\text{s}$ $T_2 = 50 \mu\text{s}$	a
Ensayo de voltaje tolerado normalizado	a	Ensayo a frecuencia industrial de corta duración	Ensayo de impulso tipo maniobra	Ensayo de impulso tipo rayo	a

Figura 2.11 Clases, formas de ondas y tiempos característicos de sobretensiones. [12].

Las sobrecorrientes pueden provocar daño en los equipos debido a una excesiva disipación de calor. Ocurriendo interrupciones no solo por fallas creadas por daños en el aislamiento de los elementos del sistema por las sobretensiones, sino por la operación de los equipos de protección de sobrecorriente.

**2.8.2 Transitorios electromagnéticos por descargas atmosféricas (DEAT):** Las principales fallas y daños a equipos en los sistemas eléctricos son debidos a la ocurrencia de descargas atmosféricas [13]. Estas fallas pueden causar interrupciones momentáneas o permanentes, generalmente causan fallas temporales en el sistema eléctrico aéreo. Las formas en que la descarga atmosférica puede incidir en un sistema eléctrico aéreo, son:

1. Impacto directo sobre los conductores de fase.
2. Impacto indirecto:
  - Incidencia sobre el conductor de apantallamiento (guarda).
  - Incidencia sobre la estructura de sujeción mecánica (torre o poste).
  - Incidencia a tierra cercana a la localidad de la línea en cuestión.



**Sobretensiones y sobrecorrientes en descargas atmosféricas :** Cuando la descarga incide sobre el conductor de guarda o sobre el poste, la corriente del rayo se propaga por todos los caminos posibles, dividiéndose en una parte que viaja a tierra a través del poste y otra que a su vez se divide en dos partes iguales que se propagan en ambos sentidos a través del conductor de guarda, esta propagación de ondas tanto en el conductor de guarda como en el poste produce sobretensiones en la cruceta y en los conductores de fase sometiendo el aislador a una diferencia de potencial que puede llegar a exceder su voltaje crítico de *flashover* (CFO) y ocasionar un arco entre la cruceta y el conductor de fase, a esto se le denomina descarga retroactiva o *backflashover* [13].

Si una DEAT impacta una línea aérea, la corriente inyectada en el conductor se divide en el punto de impacto, generando un alto impulso de corriente así como dos ondas de tensión que se propagan en direcciones opuestas ocasionando una sobretensión transitoria y con ello sobrecorrientes que dependen de las características del sistema.

**2.8.3 Transitorios electromagnéticos por maniobra:** En un SEP, por distintas causas se presentan sobretensiones, las sobretensiones que se presentan dependen de factores externos a la red, de las características de los componentes de la red, y de características de diseño de la red. Los equipos sufren esfuerzos dieléctricos por las sobretensiones durante todo el funcionamiento del SEP y en efecto estas solicitaciones para el aislamiento de los equipos deben ser minimizadas, para permitir la confiabilidad aceptable para la operación del sistema.

Una de las causas para que se presenten sobretensiones transitorias son las maniobras como la energización y desenergización de líneas de transmisión y otros componentes del SEP.

## **2.9 PROGRAMA DE SIMULACIÓN DE TRANSITORIOS ELECTROMAGNÉTICOS PSCAD®.**

PSCAD® (*power system computer aided design*) es una interfaz gráfica de usuario potente y flexible cuyo uso es bastante extenso en el estudio de transitorios electromagnéticos o EMTDC (*electro magnetic transient design and control*) [14].

**2.9.1 Módulos de Simulación:** Este programa de simulación contiene modelos eléctricos precargados que van desde simples elementos pasivos y funciones de control, hasta modelos más complejos, como maquinas eléctricas, modelado de FACTS (*flexible AC transmisión*

*systems*) completos, líneas de transmisión y cables. En tal caso no exista librería o se quiera innovar, PSCAD facilita al usuario herramientas que le permitan crearlos desde cero en un entorno de diseño flexible [14].

**2.9.2 Antecedentes:** Desde 1960 con la tesis (postdoctoral) del Dr Herman Dommel se estaba Utilizando programas muy completos para el estudio de transitorios electromagnéticos. En 1988, PSCAD® se conceptualizo por primera vez, y comenzó su desarrollo como una interfaz gráfica para el programa de simulación de transitorios electromagnéticos EMTDC, representando así un gran avance en la productividad ya que los usuarios podían diseñar sus sistemas esquemáticamente, en lugar de ingresar datos a través de las listas de texto. Mejorando la comprensión perceptual general del sistema simulado, y acelerando dramáticamente el ensamblaje del circuito y minimizando el error [15].

**2.9.3 Licencia:** Las licencias se organizan y controlan utilizando el software License Manager, que puede existir como un programa separado e independiente o insertarse dentro del propio PSCAD®. Esta licencia se adquiere poniéndose en contacto con la empresa creadora. En este trabajo se utiliza la versión gratuita disponible en la red, la cual tiene ciertas limitaciones, especialmente al volumen de elementos que se manejan.

**2.9.4 Sumario:** Los conceptos son representados en forma concisa y enfocándose en la documentación necesaria para llevar a cabo los estudios y los análisis que se realizarán en el siguiente capítulo, dando oportunidad a fundamentar teóricamente la selección de los dispositivos de protección Relés Diferenciales, entendiendo su comportamiento ante la presencia y la no distorsión armónica en las señales medidas de la red, y ante transitorios electromagnéticos.

# CAPÍTULO III

## ANÁLISIS DEL COMPORTAMIENTO DE LOS DISPOSITIVOS DE PROTECCIÓN DIFERENCIAL ANTE LA PRESENCIA DE DISTORSIÓN ARMÓNICA.

La presente investigación de acuerdo con los objetivos planeados consiste en estudiar y analizar los efectos de la distorsión armónica en los relés de protección diferencial es por ello que este capítulo se presenta el modelado en el software comercial PSCAD/EMTDC®, de un sistema de potencia con características semejantes a los sistemas reales.

### 3.1 DESCRIPCION DEL SISTEMA.

Se cuenta con un sistema sencillo basado en un sistema tipo radial, que parte de una subestación de 230 kV alimentando un transformador de 100 MVA, reductor de 230 kV a 138 kV (valor normalizado en algunos países de Latinoamérica, especialmente América central). Como se observa en la figura 3.1 en el que se encuentra instalado un relé de protección diferencial, el cual a su vez alimenta de forma directa una carga (Lineal o no lineal dependiendo del caso en estudio).

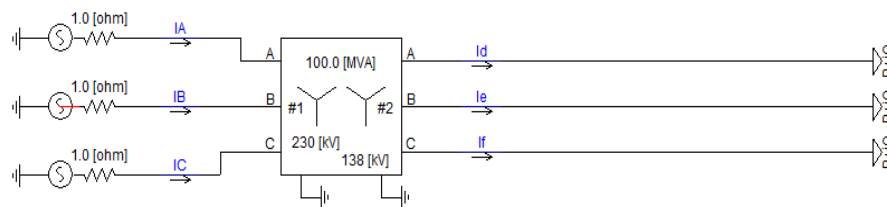


Figura 3.1 Esquema del sistema.

### 3.1.1 Criterios de ajuste.

Para la protección diferencial es necesario introducir valores que cumplan con funcionamiento del mismo es por ello que se debe realizar un ajuste en la relación de transformación de los TC ubicados en el lado primario y secundario del transformador para así obtener corrientes iguales en un sistema ideal, efectuando el siguiente análisis matemático:

$$I = \frac{S}{\sqrt{3} * VN} \quad (3.1)$$

$$I_1 = \frac{100MVA}{\sqrt{3} * 230KV} = 251,02A \quad I_2 = \frac{100MVA}{\sqrt{3} * 138KV} = 418,36A$$

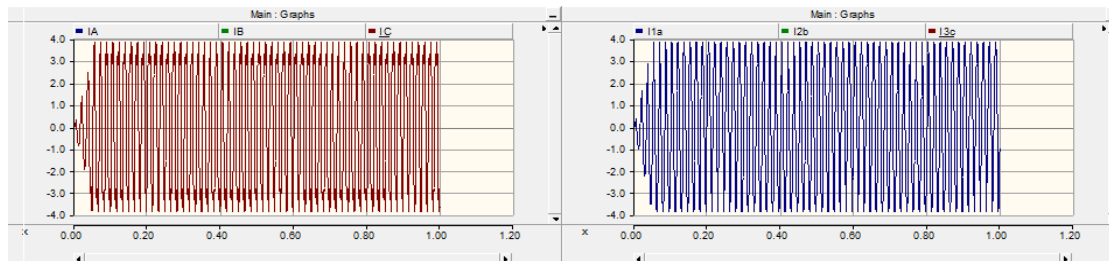
Donde  $I_1$  es la corriente en el lado primario del transformador de potencia y se aproxima a 300A para un valor más exacto en el programa, por otra parte  $I_2$  es la corriente en el lado secundario y se aproxima a 500 A quedando la relación de transformación del TC (RTC) 1:300 en el lado primario y de 1:500 en el lado secundario. Conjuntamente la corriente inyectada por el generador de cada fase del lado primario del transformador de potencia es de aproximadamente 1,2 kA y del secundario es de 1.9 kA, de la relación 3.2,  $I_{1p,2p}$  es la corriente del lado primario y secundario del TC.

$$RTC = \frac{N_1}{N_2} = \frac{I_{2p}}{I_{1p}} \quad (3.2)$$

Despejando  $I_{2p}$

$$I_{2p} = \frac{1}{300} \cdot 1.2kA = 4 A$$

Se realiza el mismo proceso para el lado secundario del transformador de potencia obteniendo así corrientes iguales de entrada al dispositivo de protección como se observa en la figura 3.2



**Figura 3.2 Corrientes primarias y secundarias del transformador de potencia ajustada al relé diferencial para las tres fases.**

## 3.2 ARMÓNICOS PRODUCIDOS POR FALLAS ANTE CARGAS LINEALES Y NO LINEALES.

A continuación se mostraran las pruebas realizadas al relé según los diferentes tipos de casos en el sistema de potencia ante la presencia de distorsión armónica.

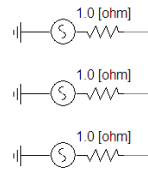
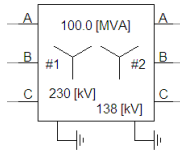
### 3.2.1 Casos de estudio.

- Prueba del dispositivo de protección en un sistema con carga lineal y su comportamiento ante la presencia de armónicos.
- Prueba del dispositivo de protección en un sistema con carga lineal ante la presencia de una falla monofásica y su comportamiento ante la presencia de armónicos
- Prueba del dispositivo de protección en un sistema con carga no lineal y su comportamiento ante la presencia de armónicos
- Prueba del dispositivo de protección en un sistema con carga no lineal ante la presencia de una falla monofásica y su comportamiento ante la presencia de armónicos

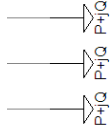
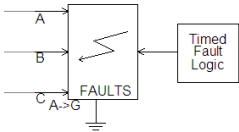
### 3.2.2 Elementos modelados.

Cada uno de los elementos presentes en el sistema mostrado anteriormente se seleccionan y se representan utilizando las herramientas disponibles en el PSCAD/EMTDC® como se muestra en la tabla 3.1

**Tabla 3.1 Elementos presentes en el sistema de potencia.**

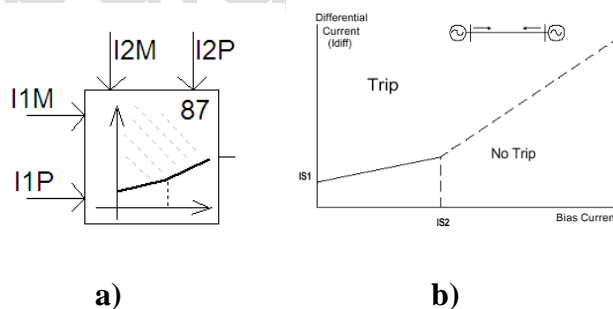
Elemento	Representación
Subestación	
Transformador de potencia	

**Tabla 3.1 Elementos presentes en el sistema de potencia.**

Elemento	Representación
Cargas	
Unidad de fallas precargadas en PSCAD®	

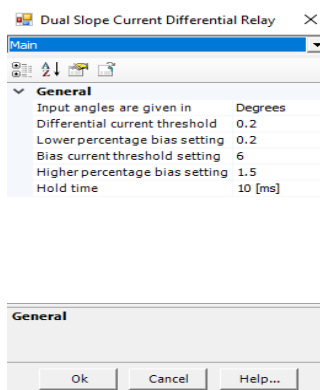
### 3.2.3 Modelado del dispositivo de protección diferencial.

La protección diferencial se basa en el caso de fallas internas, donde el elemento diferencial compara la corrientes que entran a este produciendo o no una falla dependiendo de los parámetros ajustados.



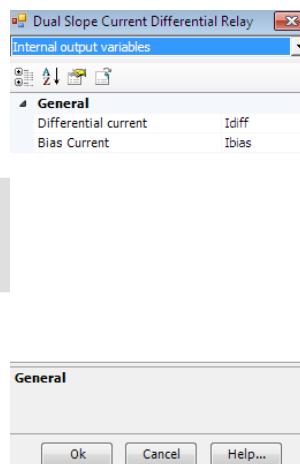
**Figura 3.3 a) Módulo del relé de protección diferencial b) Curva Característica.**

Los parámetros de configuración del relé deben ser obtenidos de la curva de operación, evaluando la zona de disparo y no disparo (Figura 3.3 b), En el relé diferencial proporcionado por PSCAD la corriente diferencial va en función de la corriente de restricción y el tiempo de accionamiento, algunos parámetros importantes presentes en otras configuraciones no son tomadas en cuenta por la limitante del programa en estudio, se realiza el ajuste mostrado en la figura 3.4, para todos los casos planteados, estudiados por individual.



**Figura 3.4** Parámetros generales en el ajuste del relé diferencial.

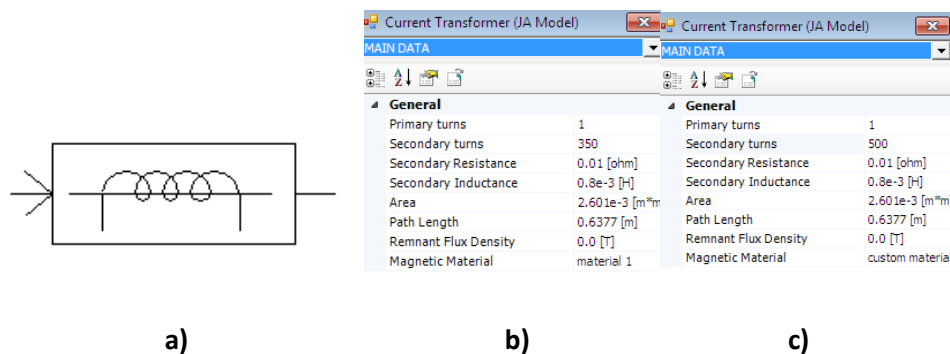
Por otra parte el relé diferencial contiene variables internas de salidas las cuales permite observar el valor de la corriente diferencial y la corriente de restricción.



**Figura 3.5** Variables internas de salida.

### 3.2.4 Modelo del Transformador de Corriente (TC)

El modelado se realiza eligiendo un TC robusto, con características que solucionen los problemas de saturación, con propiedades estandarizadas por el programa, introduciendo únicamente la relación de transformación calculada al inicio del presente capítulo e introducidos al programa como se observa en la figura 3.6, a y b.



**Figura 3.6 a) Modelo JA del TC b) Configuración del lado primario c) Configuración del lado secundario.**

El módulo de transformadores de corriente se observa en la figura 3.6, a, y se construye seleccionando los transformadores por fase, que reducen con una RTC, los niveles de corrientes por fase de la red a valores que puedan ser medidos por el equipo de protección.

### 3.2.5 Parámetros de los elementos modelados.

Se requieren realizar simulaciones en base a una resolución de tiempo de paso de **15 $\mu$ s**, a continuación se presentan la selección de los parámetros de los elementos que componen el sistema modelado.

*3.2.5.1 Generador de voltaje (Representación de la alimentación del transformador desde la subestación).* Los parámetros que son introducidos en PSCAD® se muestran en la tabla 3.2.

**Tabla 3.2 Parámetros seleccionados para la fuente de generación.**

Nombre	Parámetros
Tipo de impedancia	Resistencia pura
Valor de la impedancia	1 $\Omega$
Parámetros especificados	En los terminales
Tipo de fuente	AC
Voltaje de L-L	230 kV
Frecuencia	60 Hz



3.2.5.2 *Transformador de potencia.* Los parámetros que son introducidos en PSCAD® se muestran en la tabla 3.3.

**Tabla 3.3 Parámetros seleccionados para el transformador.**

<b>Nombre</b>	<b>Parámetros</b>
Nombre del transformador	T1
Capacidad 3 $\phi$	100 MVA
Frecuencia base de operación	60 Hz
Tipo de conexión en el primario	Estrella
Tipo de conexión en el secundario	Estrella
Modelo ideal (No saturable)	No
Voltaje L-L (rms) en el primario	230 kV
Voltaje L-L (rms) en el secundario	138 kV

3.2.5.3 *Cargas.* Para el caso de la carga lineal los parámetros se presentan en la tabla 3.4, y para la carga no lineal los parámetros se presentan en la tabla 3.5.

**Tabla 3.4 Parámetros seleccionados para la carga lineal.**

<b>Nombre</b>	<b>Parámetros</b>
Voltaje de la carga nominal (rms L-G) V1	100 kV
Potencia nominal por fase P1	100 MW
Voltaje de la carga nominal (rms L-G) V2	100 kV
Potencia nominal por fase P2	100 MW
Voltaje de la carga nominal (rms L-G) V3	100 kV
Potencia nominal por fase P3	100 MW

**Tabla 3.5 Parámetros seleccionados para la carga no lineal.**

<b>Nombre</b>	<b>Parámetros</b>
Voltaje de la carga nominal (rms L-G) V1	100 kV
Potencia reactiva nominal por fase Q1	600 MVAR
Potencia nominal por fase P1	100 MW
Voltaje de la carga nominal (rms L-G) V2	100 kV
Potencia reactiva nominal por fase Q2	600 MVAR
Potencia nominal por fase P2	100 MW
Voltaje de la carga nominal (rms L-G) V3	100 kV
Potencia reactiva nominal por fase Q3	600 MVAR
Potencia nominal por fase P3	100 MW

3.2.5.4 *Módulo de fallas*. Los parámetros que son introducidos en PSCAD® se muestran en la tabla 3.6, en el modelo de representación de fallas.

**Tabla 3.6 Parámetros en el Módulo de fallas.**

<b>Configuración del módulo.</b>	
<b>Nombre</b>	<b>Parámetros</b>
Tipo de control de falla	Interna
Configuración de salida	3 $\phi$
<b>Time Fault Logic</b>	
Tiempo de aplicación de la falla	1 s
Tiempo de duración de la falla	5 s

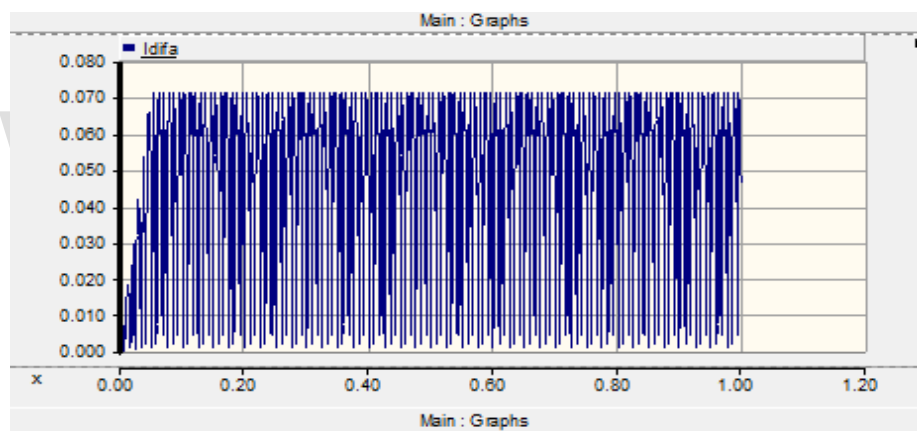
### 3.3 RESULTADOS OBTENIDOS Y ANÁLISIS.

#### 3.3.1 Parámetros medidos en el sistema para carga lineal.

Los resultados obtenidos de las simulaciones se observan en la tabla 3.7. Se presenta el valor de la corriente diferencial presentes en el equipo de protección en cada una de las fases ver figura 3.7, así como la operación del relé ya sea que actué o no. Observar la figura 3.9..

**Tabla 3.7 Resultados obtenidos en el sistema modelado en PSCAD® con carga lineal.**

	Corrientes diferenciales			Operación del relé		
	Fase A	Fase B	Fase C	Fase A	Fase B	Fase C
<b>Relé</b>	<b>0,070</b>	<b>0,070</b>	<b>0,070</b>	<b>No</b>	<b>No</b>	<b>No</b>



**Figura 3.7 Valor de la corriente diferencial en la fase A.**

Las corrientes diferenciales en todas las fases son iguales, esta está adaptada para que al superar el valor ya ajustado realice un disparo y opere el relé, pero no solo depende del valor de la corriente diferencial también de la corriente de restricción y sus rangos de operación. A continuación se muestra el valor de esta corriente, ver Figura 3.8.

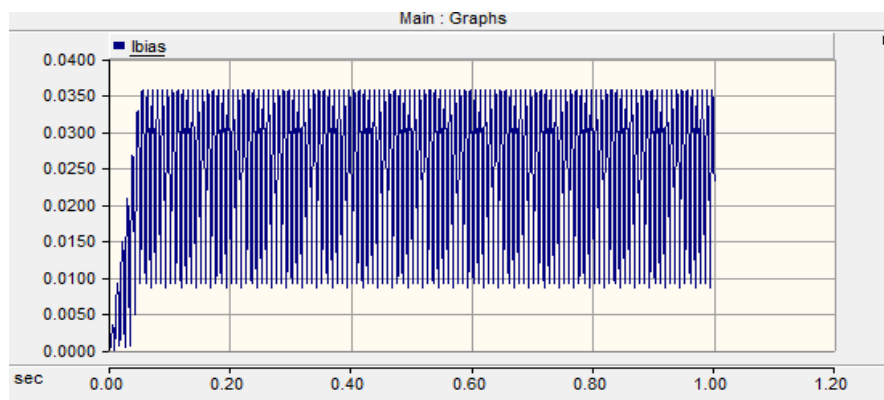


Figura 3.8 Valor de la corriente de restricción en la fase A.

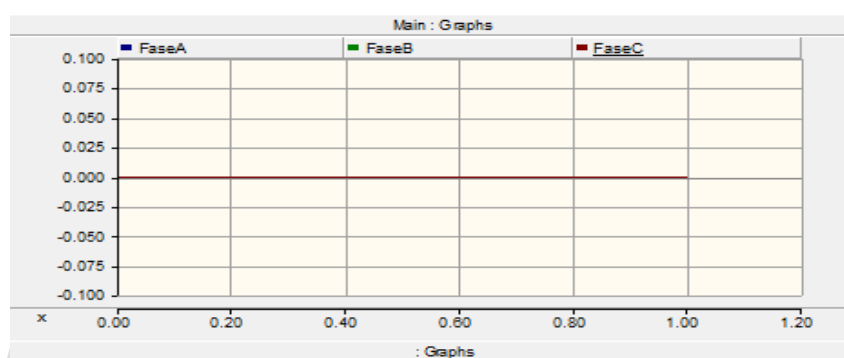


Figura 3.9 Salida del relé diferencial para las 3 fases. El relé no dispara.

Por los datos obtenidos en la tabla 3.7 los resultados obtenidos son satisfactorios, ya que el relé operó de la manera esperada, en este caso era la no actuación del mismo. Por lo que el sistema modelado es ideal para realizar las pruebas de estudio en los equipos de protección diferencial, nótese también la baja presencia de la distorsión armónica, ver figura 3.10, en la cual solo hacen cara los armónicos de 2do y 4to orden esto debido a la corriente *inrush* al momento de energizar el circuito por lo tanto no afecta la operación del relé.

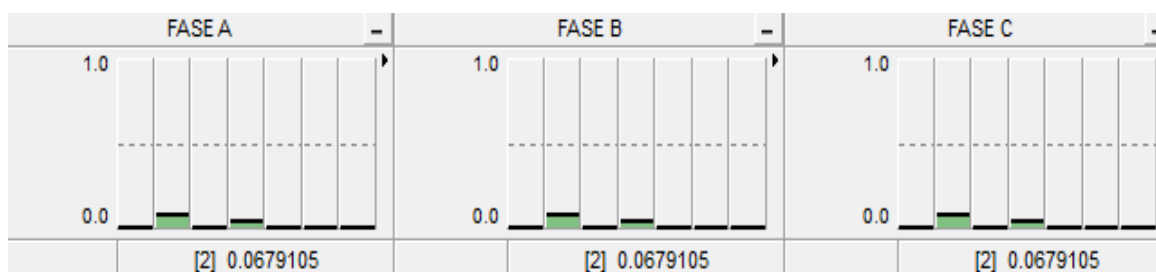


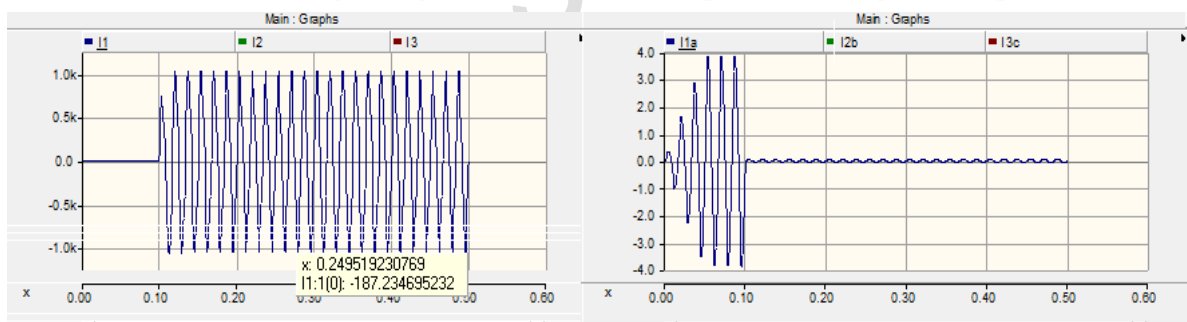
Figura 3.10 Mínima presencia de armónicos pares en las 3 fases para carga lineal.

### 3.3.2 Parámetros medidos en el sistema para carga lineal con falla.

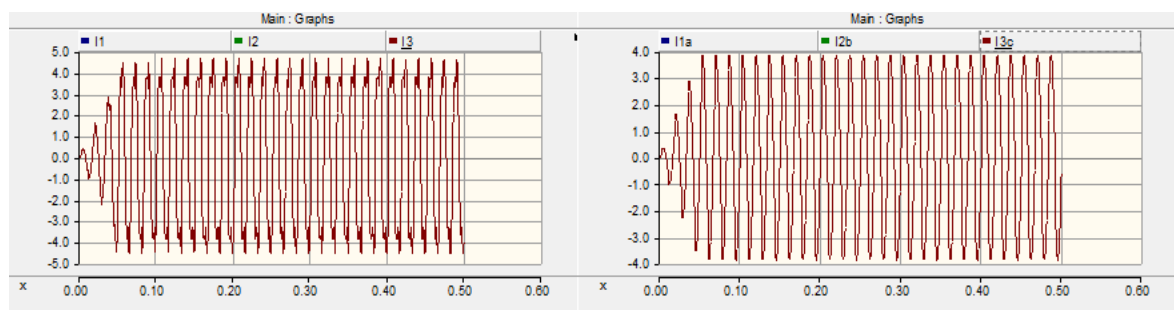
Para este caso los resultados obtenidos se presentan en la tabla 3.8 para una carga lineal ante la presencia de una falla monofásica en el lado primario del transformador de potencia observándose el aumento de la corriente diferencial y por tanto la actuación del relé en la fase afectada. En la figura 3.11 se observa el incremento sumamente notorio en la corriente del lado primario del transformador (lado de la aplicación de la falla), de un poco más de 1 kA desde el tiempo de inicio en el que se programó la falla hasta su duración final, mientras que las otras fases las corrientes se mantienen estables ver figura 3.12.

**Tabla 3.8 Resultados obtenidos en el sistema modelado en PSCAD® con carga lineal y presencia de una falla monofásica.**

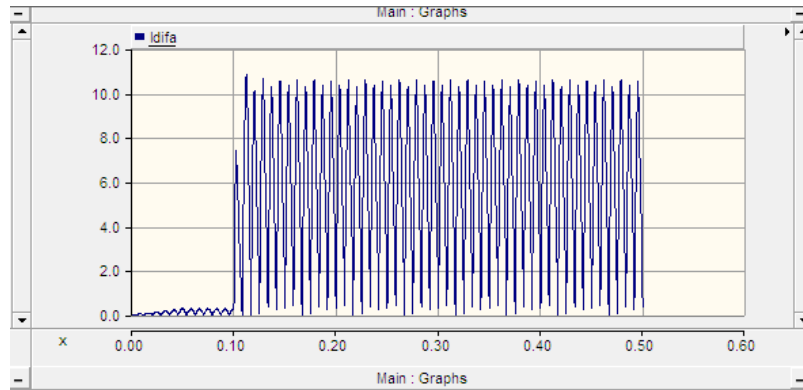
	Corrientes diferenciales (A)			Operación del relé		
	Fase A	Fase B	Fase C	Fase A	Fase B	Fase C
<b>Relé</b>	<b>10,11</b>	<b>0,080</b>	<b>0,080</b>	<b>Si</b>	<b>No</b>	<b>No</b>



**Figura 3.11 Corriente primaria y secundaria del transformador ante una falla en la fase A.**

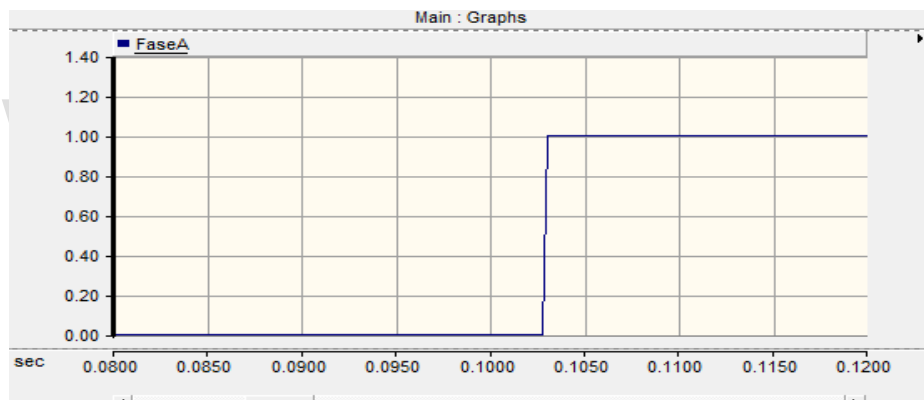


**Figura 3.12 Corriente primaria y secundaria del transformador en las fases B y C.**

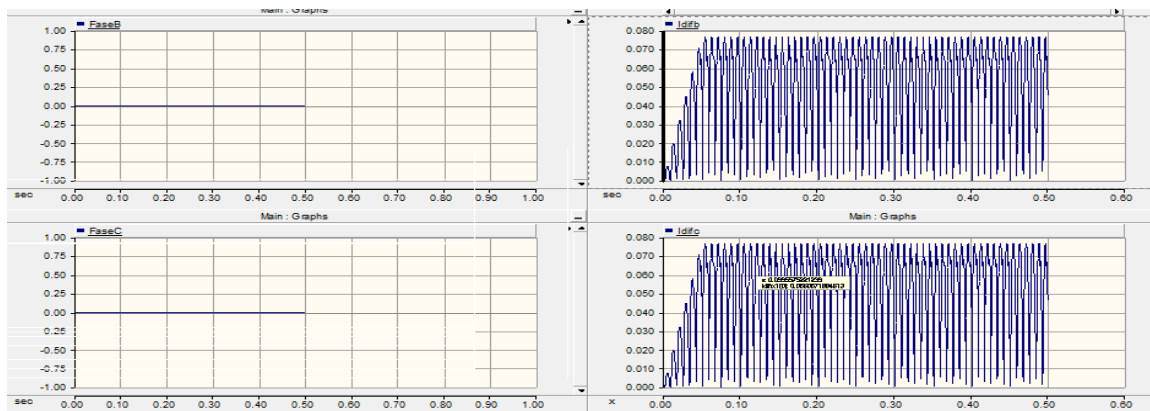


**Figura 3.13 Valor de la corriente diferencial en la fase A con falla.**

La corriente diferencial es significativamente alta debido al cortocircuito o falla provocado en el sistema, accionando al disparo del Relé diferencial, superando los límites para la cual fue ajustado, operando en la zona de disparo. Mientras que las otras fases no se ven afectadas y por lo tanto el relé no opera ver figura 3.15.

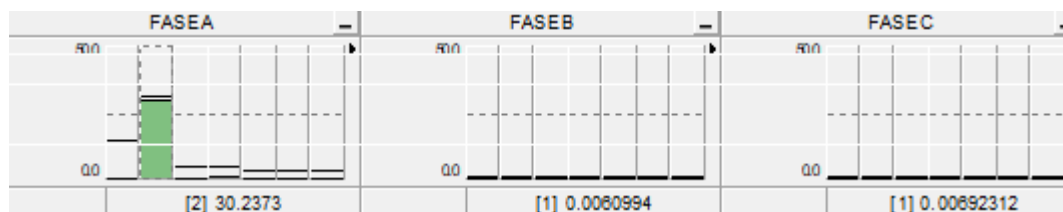


**Figura 3.14 Salida del relé diferencial para la fase A. El relé dispara.**

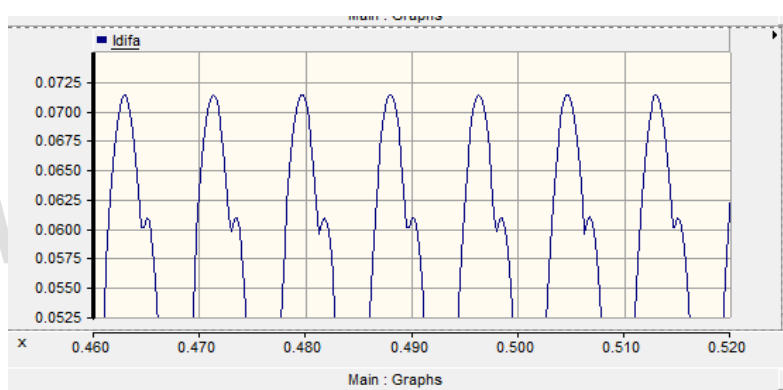


**Figura 3.15 Salida del relé diferencial para la fase B y C. El relé no dispara.**

Para este caso la presencia de la distorsión armónica se hace notar en la fase A como se muestra en la figura 3.16, específicamente en el armónico de 2do orden debido a energización del circuito en el mismo lado del transformador en el cual se aplicó la falla lo que ocasiona el incremento y distorsiona la onda de la corriente. Ver figura 3.17. Obteniendo finalmente resultados satisfactorios ante la correcta actuación del relé diferencial ante la presencia de una falla, garantizando el conforme ajuste del equipo.



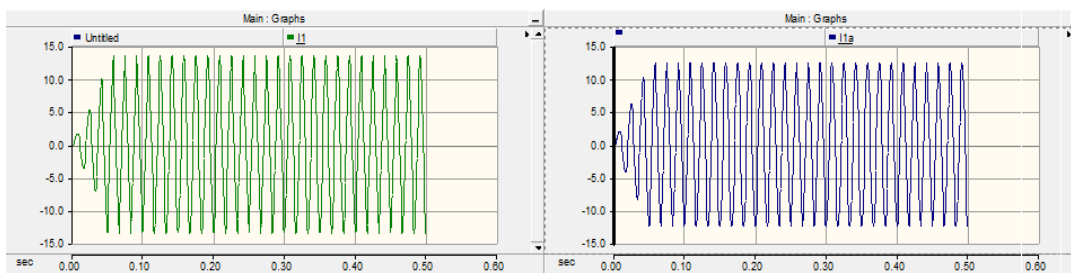
**Figura 3.16 Presencia de distorsión armónica de 2do orden en la fase A.**



**Figura 3.17 Distorsión de la onda de corriente.**

### 3.3.3 Parámetros medidos en el sistema para carga no lineal.

Para este estudio con carga no lineal en el sistema las corrientes en el primario y secundario del transformador aumentaron pero con el ajuste realizado en los TC al comienzo del estudio las corrientes se mantienen semejantes como se observa en la figura 3.18.

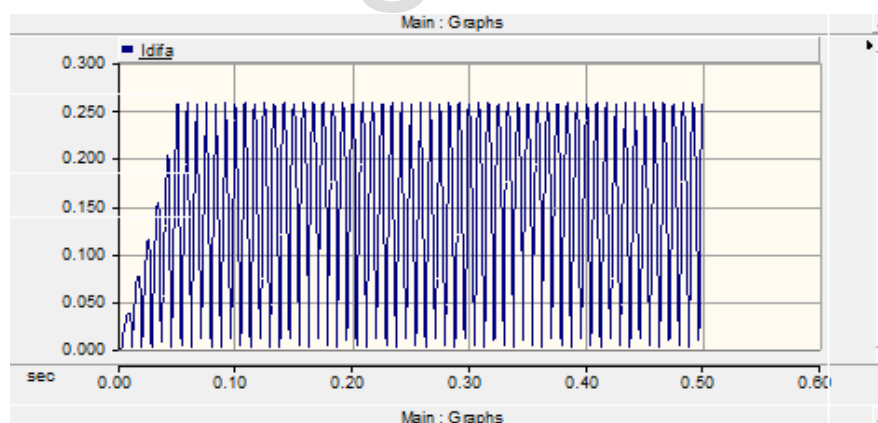


**Figura 3.18** Corrientes primarias y secundarias del transformador de potencia.

Los resultados obtenidos en el estudio para cuando se alimenta el sistema con una carga con las características no lineales se observan en la tabla 3.9, en la cual las corrientes diferenciales en las tres fases se mantienen iguales sin la actuación del relé ver figura 3.20.

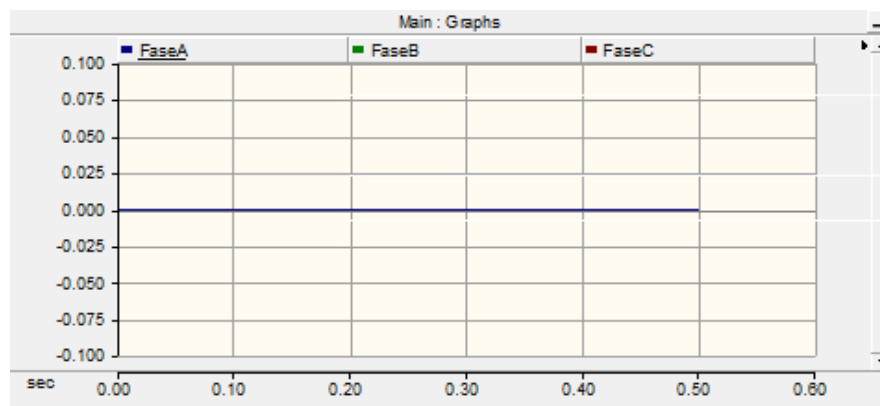
**Tabla 3.9** Resultados obtenidos en el sistema modelado en PSCAD® con carga no lineal.

	Corrientes diferenciales (A)			Operación del relé		
	Fase A	Fase B	Fase C	Fase A	Fase B	Fase C
<b>Relé</b>	<b>0,250</b>	<b>0,250</b>	<b>0,250</b>	<b>No</b>	<b>No</b>	<b>No</b>



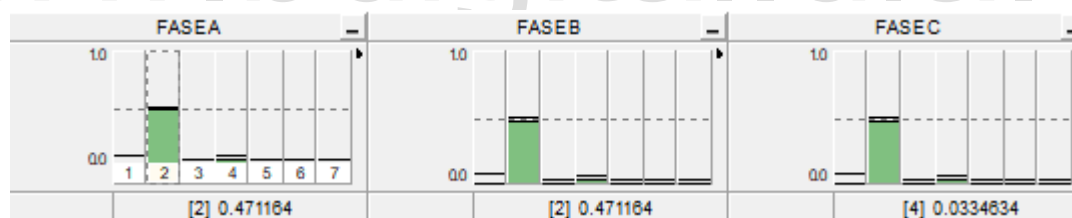
**Figura 3.19** Valor de la corriente diferencial en la fase A.





**Figura 3.20 Salida del relé diferencial para las 3 fases. El relé no dispara.**

Una de las características de las cargas no lineales es la generación de armónicos pares, como se observa en la figura 3.21 este modelado se realizó para poder analizar la comparación entre una carga lineal o no lineal y el comportamiento del relé diferencial. En este caso se hace notar más el armónico de 2do orden que también es ocasionado por la corriente de energización *inrush*, sin embargo esto no afecta a la operación del relé diferencial comprobando el buen ajuste y funcionamiento del mismo. Teniendo como conclusión resultado netamente satisfactorios.



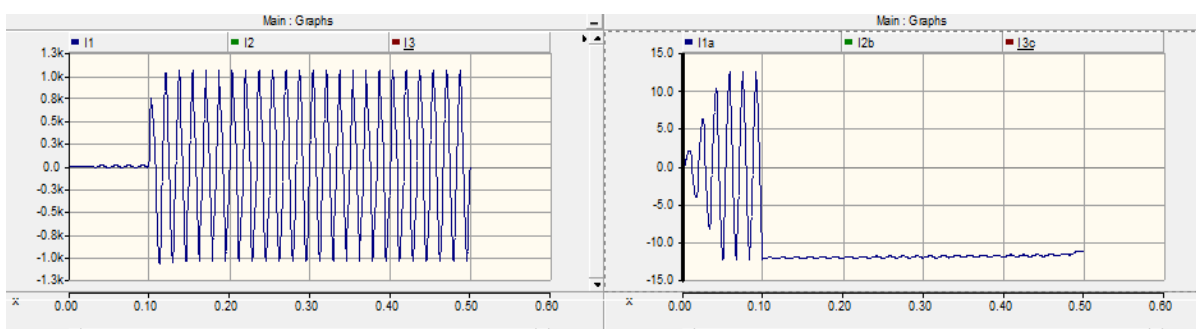
**Figura 3.21 Presencia del 2do armónico en la tres fases.**

### 3.3.4 Parámetros medidos en el sistema para carga no lineal con falla.

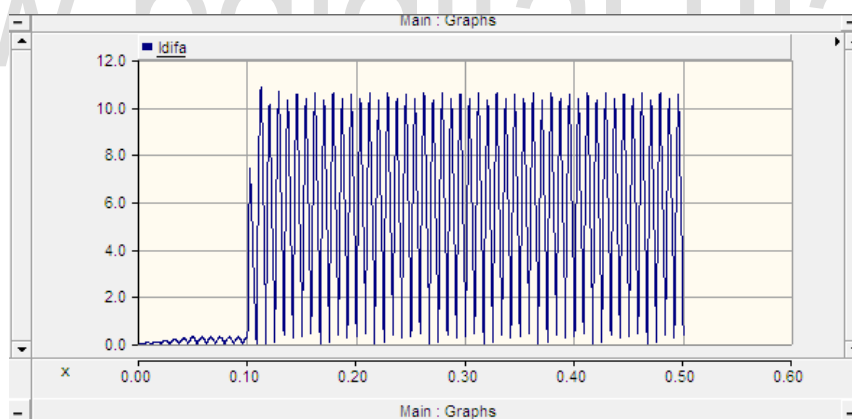
A continuación se muestran los resultados obtenidos para una carga no lineal ante la presencia de una falla monofásica en el lado primario del transformador, ver tabla 3.10. Se logra observar el aumento de la corriente diferencial en la fase afectada (A) y por lo tanto el disparo del relé en dicha fase ver figuras 3.23 y 3.24. Además se nota el incremento de la corriente en el lado del transformador donde se aplica la falla alcanzando 1 kA de corriente, desde el tiempo de inicio de ajuste de la falla hasta su duración final en 0,5 s como se muestra en la figura 3.22.

**Tabla 3.10 Resultados obtenidos en el sistema modelado en PSCAD® con carga no lineal y presencia de falla monofasica.**

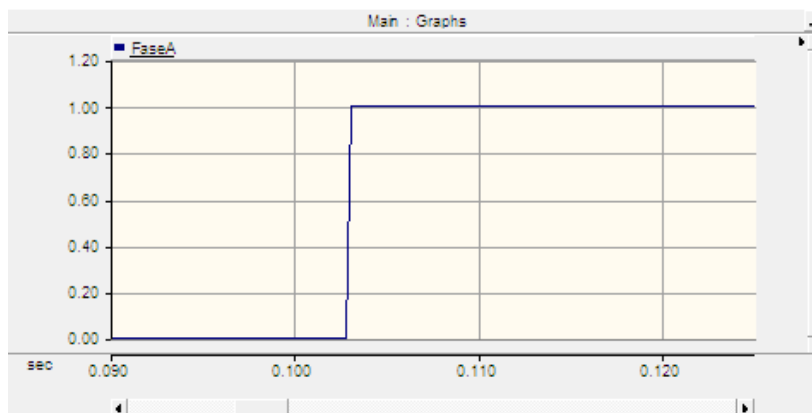
	Corrientes diferenciales (A)			Operación del relé		
	Fase A	Fase B	Fase C	Fase A	Fase B	Fase C
<b>Relé</b>	<b>10,11</b>	<b>0,271</b>	<b>0,271</b>	<b>Si</b>	<b>No</b>	<b>No</b>



**Figura 3.22 Corriente primaria y secundaria del transformador ante una falla en la fase A.**

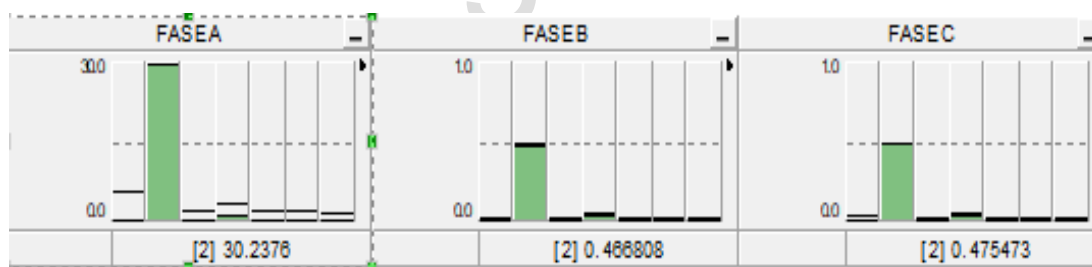


**Figura 3.23 Valor de la corriente diferencial en la fase A con falla.**



**Figura 3.24 Salida del relé diferencial para la fase A. El relé dispara.**

Finalmente los resultados obtenidos son los esperados, ya que el relé diferencial actúa en la fase en que se aplica la falla en el tiempo esperado, sin verse afectado por la presencia de armónicos ver figura 3.25, en la cual se muestra la distorsión armónica presente en todas las fases pero con mayor pronunciación en la fase A que es la fase en la cual se aplicó la falla. Para este caso al igual que el anterior la distorsión armónica se hace notar por las características de la carga no lineal en el sistema, lo que hace que estos armónicos aparezcan, además de otros factores como lo es la corriente de energización *inrush*.



**Figura 3.25 Presencia de distorsión armónica en las tres fases.**

### 3.4 SUMARIO.

Para el modelado de los elementos que componen el sistema, se toman en cuenta parámetros nominales semejantes a la realidad, esto para comprobar que el sistema simulado es óptimo para realizar pruebas al equipo de protección estudiado. Se ajustaron las características de operación del equipo para su correcta actuación ante la presencia de distorsión armónica, ya que la operación del relé puede considerarse indebida de acuerdo al alto porcentaje de corrientes armónicas que puedan generarse dependiendo del caso, es por ello que los

parámetros de configuración del relé deben ser muy bien estudiados para evitar malas operaciones del mismo, En septiembre del 2013, Freddy Guillen y Javier Narvaez presentaron el trabajo de grado titulado “Desarrollo del algoritmo para la protección diferencial de transformador de potencia aplicado a la subestación Azogues II” [12], donde se utilizó y validó la transformada de Fourier, así comparar ambos trabajos y acreditar la calidad de este. El relé proporcionado por el programa Pscad es considerablemente limitado ya que existen otros parámetros importantes en el estudio como lo es la saturación del transformador de corriente y otros, que en función de la corriente diferencial y de restricción pueden hacer operar o no el Relé diferencial, actualmente en las industrias estudios de este tipo no son tomados en cuenta por lo que estos elementos de protección accionan de manera “inexplicable” ante situaciones normales de operación o no accionan ante fallas considerables que puedan perjudicar el equipo protegido.

[www.bdigital.ula.ve](http://www.bdigital.ula.ve)

# CAPÍTULO IV

## ANÁLISIS DEL COMPORTAMIENTO DE LOS DISPOSITIVOS DE PROTECCIÓN DIFERENCIAL ANTE LA PRESENCIA DE TRANSITORIOS ELECTROMAGNÉTICOS.

En el presente capítulo se muestra el análisis del comportamiento del relé diferencial ante la presencia de transitorios electromagnéticos, es por ello que en este capítulo se presenta el modelado en el software comercial PSCAD/EMTDC®, ya sea para la presencia de descargas atmosféricas o por maniobras como es la conexión de un banco de capacitores.

**4.1 MODELADO DE LA DESCARGA ATMOSFERICA (DEAT).** La descarga atmosférica es modelada en base a una fuente dependiente de corriente, cuya dependencia radica en la señal resultante de dos exponenciales cuyo parámetro variable es el tiempo de la descarga (duración de la señal), multiplicado por la magnitud de la corriente de descarga deseada. En la figura 4.1 se observa el modelado de la descarga atmosférica, en la cual se modela un impulso de corriente que se induce en las líneas de transmisión, simulando el impacto en una de las líneas del conjunto trifásico. Además se dispone una resistencia de valor  $R$ , esta representa el canal del rayo y normalmente tiene un valor de  $300 \Omega$  a  $400 \Omega$ .

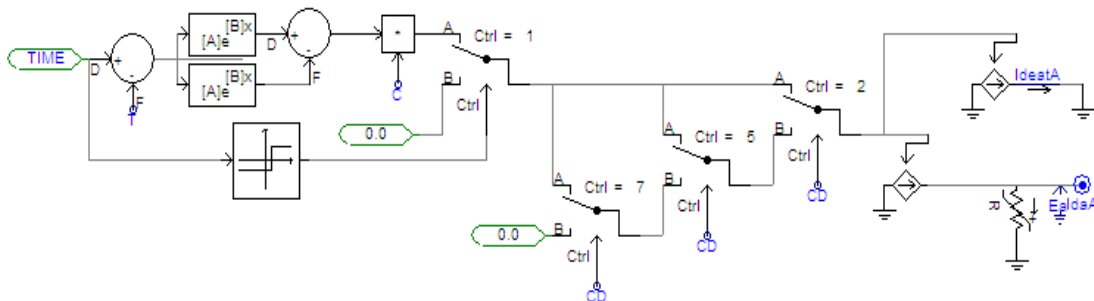


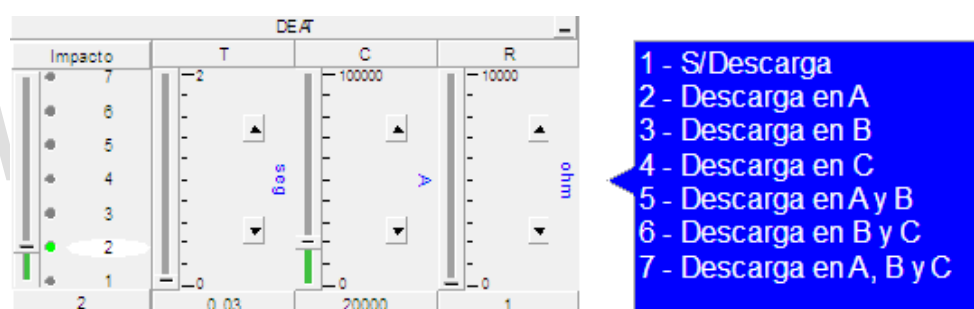
Figura 4.1 Esquema del modelado de la descarga atmosférica.

#### 4.1.1 Descripción del funcionamiento.

Los parámetros tomados para la simulación de una descarga atmosférica son **T** (Tiempo de inicio de descarga) , **C** (Magnitud deseada de la señal ), y **R** (Canal de descarga), además se cuenta con un comparador donde el valor para T es un valor controlado en el sistema que se compara con el tiempo de entrada, si T es mayor o igual que el tiempo de entrada; en la salida del comparador se obtiene un 1; dando entrada a la forma de onda de la descarga atmosférica al sistema asignando a la fuente dependiente de corriente los valores requeridos, si la T es menor que el tiempo de entrada la salida del comparador es un Cero , la cual no permite que haya un impacto en el sistema, esta acción puede ocurrir para los casos planteados.

#### 4.1.2 Control de Descargas Atmosféricas.

Para suministrar mejor manejo en la introducción de los parámetros de las descargas atmosféricas se modela un control de fácil acceso como se observa en la figura 4.2.



**Figura 4.2 Módulo de control para Descargas Atmosféricas.**

Donde,

- La selección de Impacto, es la línea o líneas donde se desea realizar la descarga.
- El tiempo  $T$  (s), es el tiempo en que inicia o se produce la descarga atmosférica.
- El valor  $C$  (A), es el valor de la corriente de descarga que recibe el sistema.
- El valor  $R$  ( $\Omega$ ), es el valor de la resistencia en paralelo a la fuente dependiente de corriente.

## 4.2 MODELADO DE UN BANCO DE CAPACITORES.

La presencia de transitorios electromagnéticos por maniobras se puede observar mediante la conexión y desconexión de un banco de capacitores, el cual para este estudio se realiza la

conexión de una carga de 100 MVA y 220 kV en el lado secundario del transformador de potencia, valores que fueron calculados previamente para las características del sistema por el siguiente análisis matemático.

La conexión de un banco de capacitores ayuda a mejorar la eficiencia del sistema, es por ello que se debe calcular el factor de potencia para conocer cuánto es el manejado en este caso, para ello se calcula por la siguiente ecuación 4.1

$$Fp = \frac{P}{S} = \frac{P}{\sqrt{P^2+Q^2}} \quad (4.1)$$

Donde:

Fp= Factor de potencia

P= Potencia Activa

S= Potencia Aparente

Q= Potencia Reactiva

El sistema en estudio consume una potencia activa de 100 MW y una potencia reactiva de 100 MVAR sustituyendo estos valores en la ecuación 4.1 se tiene

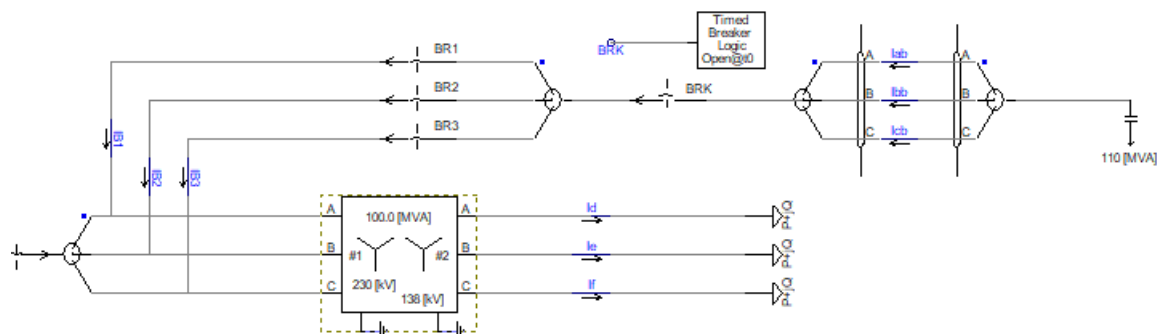
$$Fp = \frac{100MW}{\sqrt{100MW^2 + 100MVAR^2}} = 0,7$$

Un factor de potencia de 0.7 es común en estos sistemas, pero para conectar la carga adecuada en el banco de capacitores se aumenta el factor de potencia a 0,97 y despejando la potencia aparente se tiene que la carga a conectar es de 103 MVA pero se selecciona un valor normalizado de 110 MVA para obtener una compensación más exacta, como se observa a continuación

$$0,97 = \frac{100MW}{S}$$

$$S = 103 MV , \quad 110 MVA$$

Ahora bien por medio de interruptores se conecta el banco, los cuales están ubicados en cada fase y uno general como se observa en la figura 4.3.



**Figura 4.3** Esquema del banco de capacitores conectado al sistema.

#### 4.2.1 Descripción del funcionamiento.

En el sistema de potencia usado para todos los estudios del presente trabajo se agrega en el lado primario del transformador un banco de capacitores conectado por medio de interruptores uno para cada línea del sistema trifásico con el fin de hacer diferentes pruebas bien sea monofásicas, bifásicas y trifásicas, por otra parte se cuenta con un interruptor general el cual está configurado para que se realice la conexión a los 0,1 s y se desconecte a los 0,3 s. Por lo tanto a la corriente que genera el sistema se le adiciona la corriente inyectada por el banco de capacitores en el intervalo de tiempo establecido, obteniendo una corriente total que es la recibida por el transformador y el relé diferencial.

#### 4.2.2 Control del banco de capacitores.

Para realizar las diferentes pruebas se creó un controlador que le permite al usuario seleccionar la conexión o desconexión de cada fase por separado como se observa en la figura 4.4.



**Figura 4.4** Módulo de control para el banco de capacitores.

Donde,

- *CLOSE*, indica la conexión del banco de capacitores.



- *OPEN*, indica la desconexión del banco de capacitores.

### 4.3 PARAMETROS DE LOS ELEMENTOS MODELADOS.

Se requieren realizar simulaciones en base a una resolución de tiempo de paso de **15  $\mu$ s**, a continuación se presentan la selección de los parámetros de los elementos que componen el sistema modelado.

#### 4.3.1 Descarga atmosférica.

Los parámetros que son introducidos en PSCAD® para generar la descarga atmosférica se muestran en la tabla 4.1

**Tabla 4.1 Parámetros de generación de la DEAT.**

Nombre	Parámetros
Coefficiente de exponencial (E1)	10.000 (1,2 $\mu$ s)
Coefficiente de exponencial (E2)	1.666.666,7 (50 $\mu$ s)
C	10 kA
T	0,03 s
R	1 $\Omega$

#### 4.3.2 Banco de capacitores.

Los parámetros que son introducidos en PSCAD® para generar la conexión de un banco de capacitores se muestran en la tabla 4.2

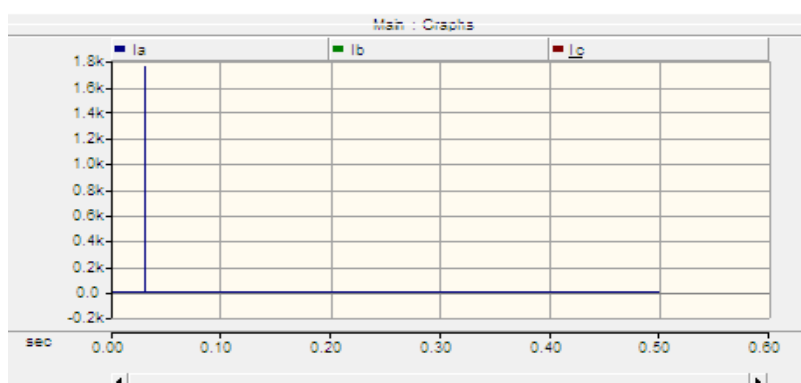
**Tabla 4.2 Parámetros del banco de capacitores.**

Nombre	Parámetros
Carga trifásica	100 MVA
Voltaje trifásico.	220 kV
Frecuencia nominal	60 Hz
Estado inicial del interruptor	Abierto
Tiempo de operación del interruptor	0,1 s
Tiempo de desconexión del interruptor	0,3 s

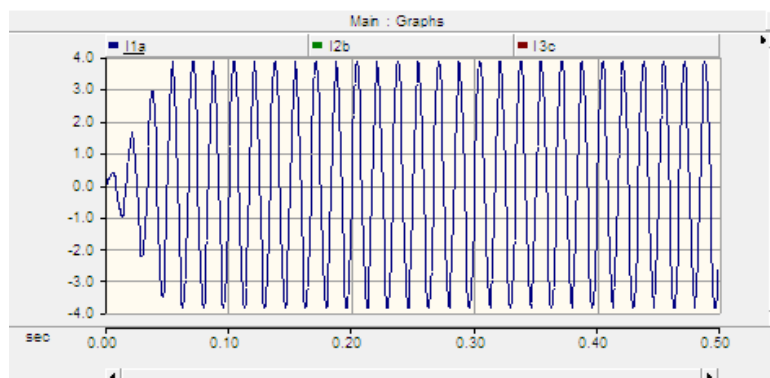
#### 4.4 RESULTADOS OBTENIDOS Y ANÁLISIS.

##### 4.4.1 Resultados obtenidos ante transitorios electromagnéticos originados por descargas atmosféricas.

Los resultados obtenidos de las simulaciones ante una descarga atmosférica específicamente en la fase A del lado primario del transformador se observan en la figura 4.5, en la cual se detalla una corriente elevada de 1.8 kA en un tiempo de microsegundos de duración en que sucede el transitorio, estos valores dependerán de la corriente de descarga que se introducen al sistemas así como de las características propias del mismo como lo es la impedancia de las líneas, el uso adecuado de los descargadores y pararrayos. Por otra parte la descarga es tan rápida que no se ve afectada la corriente en el lado secundario del transformador, ver figura 4.6.



**Figura 4.5 Corriente de falla en lado primario del transformador.**



**Figura 4.6 Corriente del lado secundario del transformador.**

El comportamiento del relé diferencial se observa en la tabla 4.3, en la cual para el caso en estudio se muestra una corriente diferencial de 27 A en la fase A (ver figura 4.7) y aunque el evento es altamente transitorio es lo suficientemente rápido como para que el relé de protección diferencial bajo los parámetros establecidos y expuestos en el capítulo anterior actué como se aprecia en la figura 4.8. Demostrando así el excelente funcionamiento del dispositivo de protección.

**Tabla 4.3 Corrientes diferenciales y comportamiento del relé para Descargas atmosféricas en la fase A.**

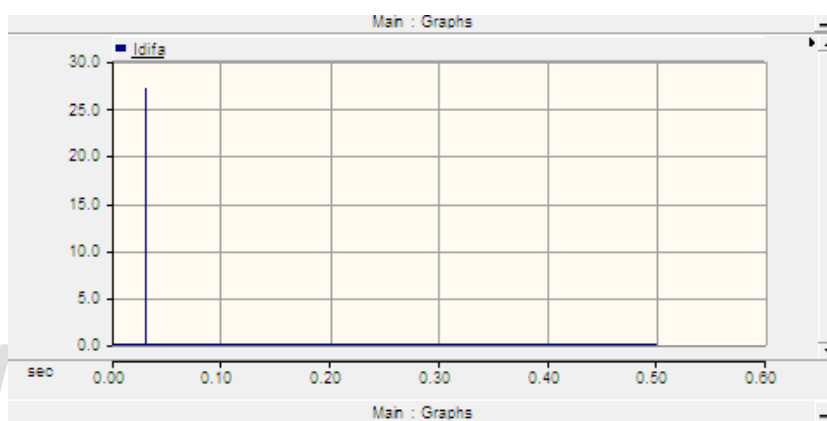
Corrientes diferenciales (A)			Operación del relé			Duración del transitorio (ms)		
Fase A	Fase B	Fase C	Fase A	Fase B	Fase C	Fase A	Fase B	Fase C
27	0,070	0,070	No	No	No	0,7	-	-

**Tabla 4.4 Corrientes diferenciales y comportamiento del relé para Descargas atmosféricas en la fase B.**

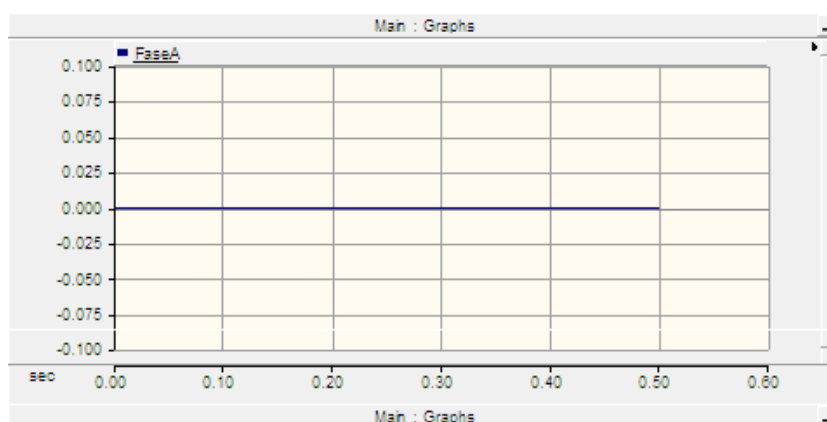
Corrientes diferenciales (A)			Operación del relé			Duración del transitorio (ms)		
Fase A	Fase B	Fase C	Fase A	Fase B	Fase C	Fase A	Fase B	Fase C
0,070	10	0,070	No	No	No	-	0,5	-

**Tabla 4.5 Corrientes diferenciales y comportamiento del relé para Descargas atmosféricas en la fase C.**

Corrientes diferenciales (A)			Operación del relé			Duración del transitorio (ms)		
Fase A	Fase B	Fase C	Fase A	Fase B	Fase C	Fase A	Fase B	Fase C
0,070	0,070	3,70	No	No	No	-	-	0,5

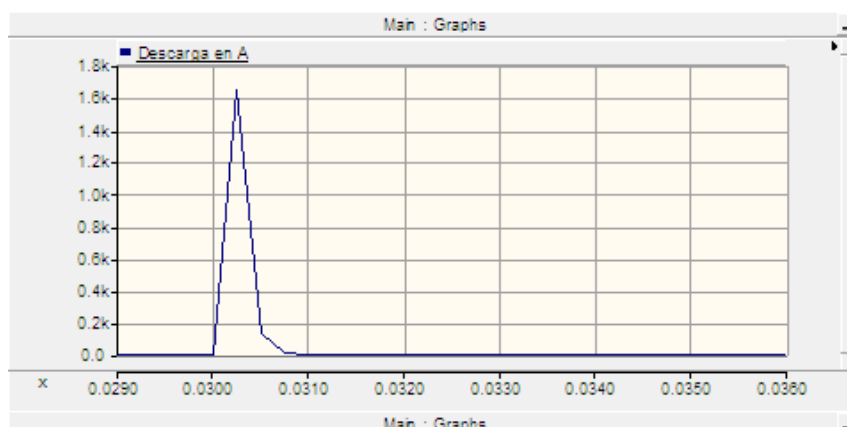


**Figura 4.7 Corriente diferencial en el relé de protección.**



**Figura 4.8 Salida del relé diferencial para la fase A.**

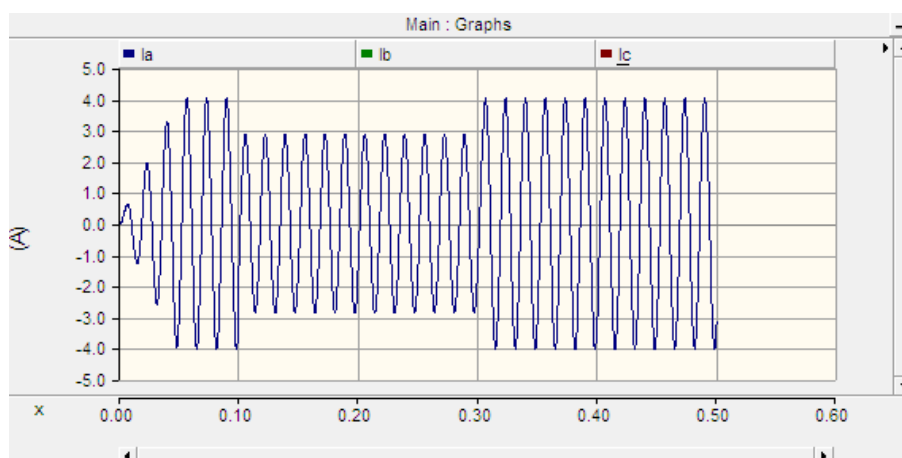
Por último se puede apreciar la forma de la onda de la descarga atmosférica ajustada en el sistema de potencia como se observa en la figura 4.9.



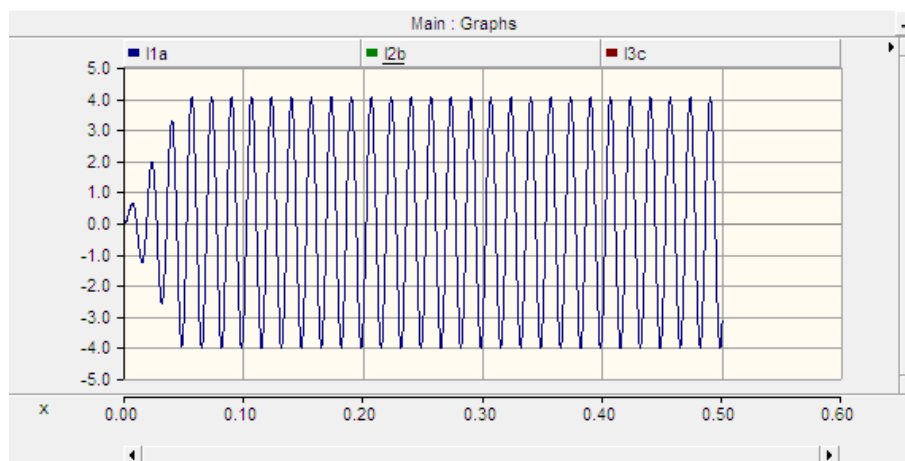
**Figura 4.9** Forma de onda de la descarga atmosférica.

#### 4.4.2 Resultados obtenidos ante transitorios electromagnéticos originados por maniobra de banco de capacitores.

Las simulaciones realizadas para este tema de conexión y desconexión del banco de capacitores instalados en el lado primario del transformador se muestran a continuación, el cual se estudia para tres casos diferentes (varios intervalos de tiempo). Para una conexión en la fase A del primer caso, la corriente se ve perturbada o afectada en el intervalo de tiempo de la maniobra, descendiendo de 4 A - 3 A comenzando a los 0,10 s y finalizando a los 0,30 s como se muestra en la figura 4.10 y por otra parte la corriente del lado secundario se mantiene como se observa en la figura 4.11.



**Figura 4.10** Perturbación en lado primario del transformador – Fase A.



**Figura 4.11 Corriente en lado secundario del transformador.**

Ahora el comportamiento del relé era totalmente el esperado ya que como se observa en la tabla 4.6 en ninguno de los casos operó ya que al reducir la corriente en el intervalo de tiempo de la maniobra también reduce la corriente diferencial por lo que no sobrepasa los valores ajustados previamente en el relé (ver figura 4.12) demostrando el buen funcionamiento del mismo.

www.bdigital.ula.ve

**Tabla 4.6 Comportamiento del relé para los diferentes intervalos de tiempo de conexión y desconexión.**

Fase A		Fase B		Fase C	
<b>Caso 1 (0,1-0,3)s</b>					
Operacion		Operación		Operación	
Condición	Tiempo(ms)	Condición	Tiempo(ms)	Condición	Tiempo(ms)
NO	-	NO	-	NO	-
<b>Caso 2 (0,15-0,3)s</b>					

Operacion		Operación		Operación	
Condición	Tiempo(mseg)	Condición	Tiempo(mseg)	Condición	Tiempo(mseg)
NO	-	NO	-	NO	-

Caso 3 (0,3-0,4)s

Operacion		Operación		Operación	
Condición	Tiempo(mseg)	Condición	Tiempo(mseg)	Condición	Tiempo(mseg)
NO	-	NO	-	NO	-

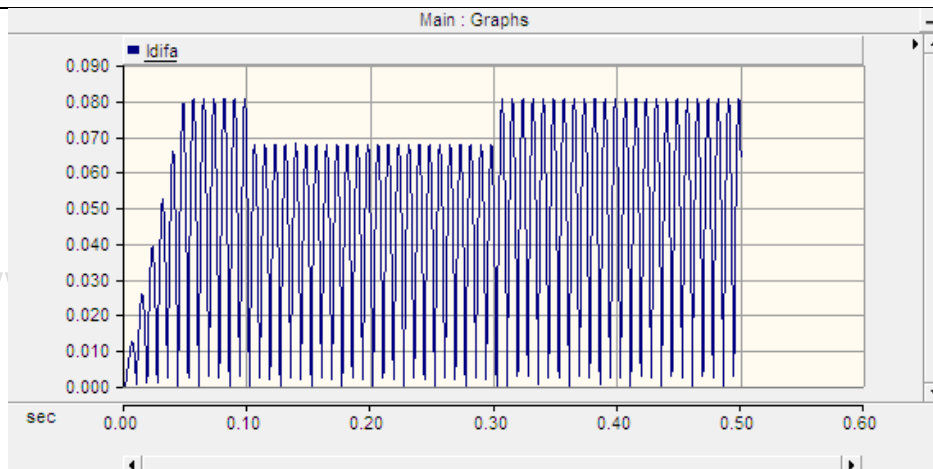


Figura 4.12 Corriente diferencial del relé de protección.

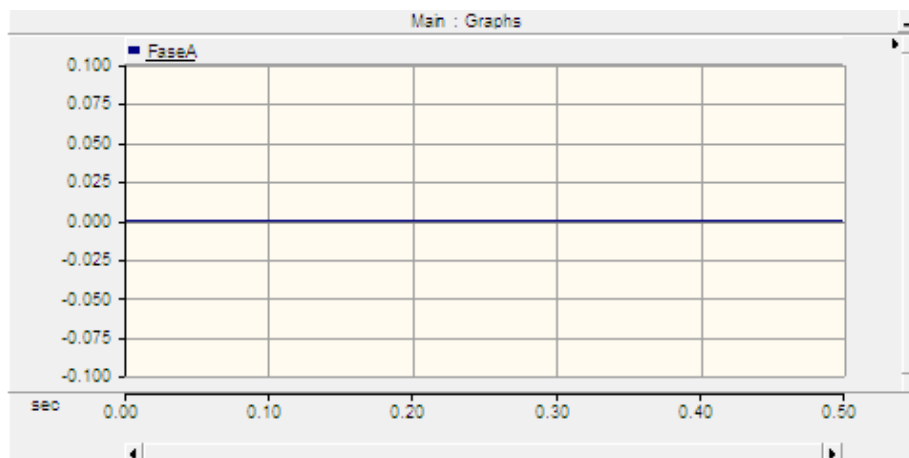
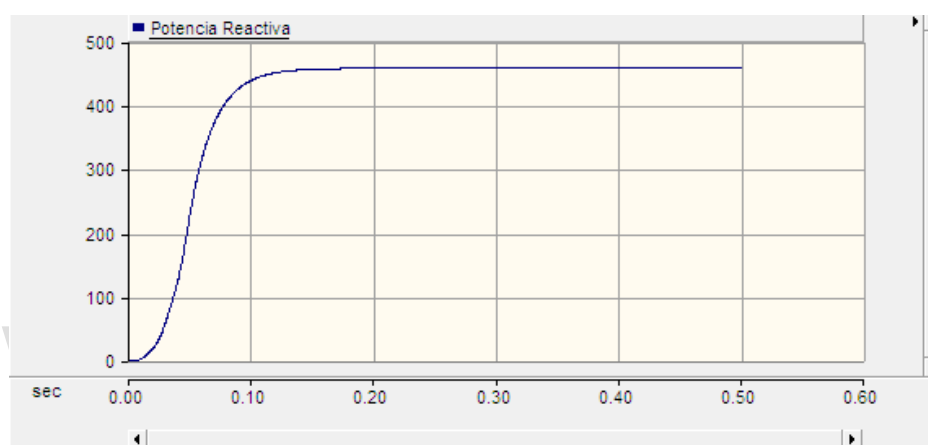
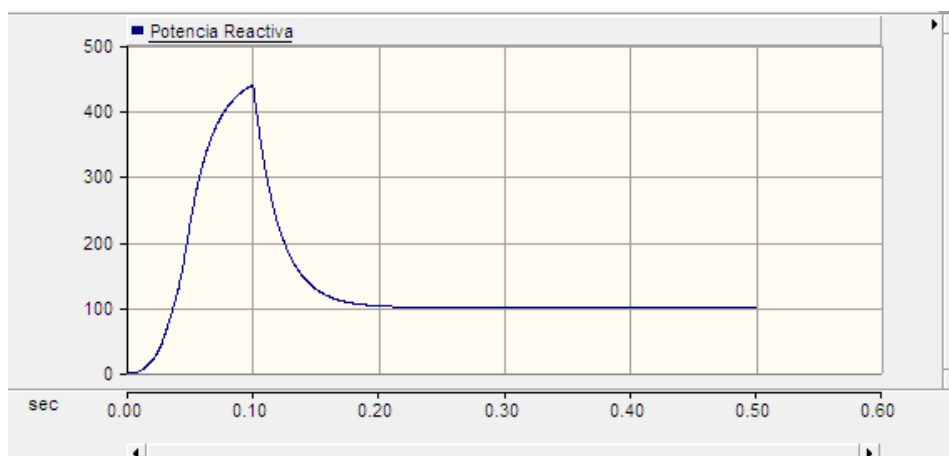


Figura 4.13 Comportamiento del relé de protección.

Como parte del estudio de transitorios electromagnéticos se presenta de manera adicional la aplicación del banco de capacitores con el objetivo de reducir reactivos en el sistema. En la figura (4.14) se muestra la potencia reactiva antes de conectar el banco de capacitores y en la figura (4.15) se observa como la potencia reactiva disminuye al conectar el banco de capacitores comprobando la eficiencia del mismo, además en la figura 4.16 se muestra el comportamiento de la potencia reactiva en el intervalo de tiempo en que se hace la conexión del banco (0.10- 0.30)seg, al realizar este proceso hace que la onda de la señal presente perturbación como se ve en la figura 4.17 y dependiendo de esta la actuación del Relé diferencial.

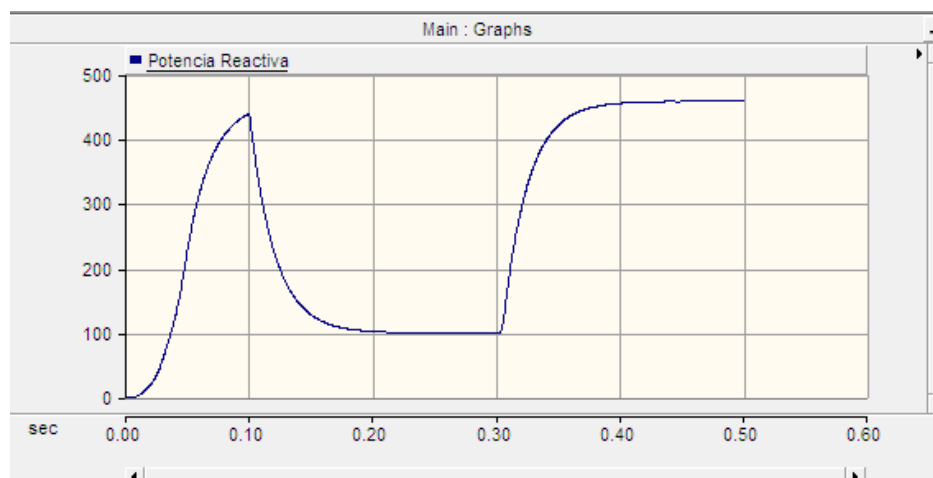


**Figura 4.14 Potencia Reactiva del sistema antes de conectar el banco de capacitores.**

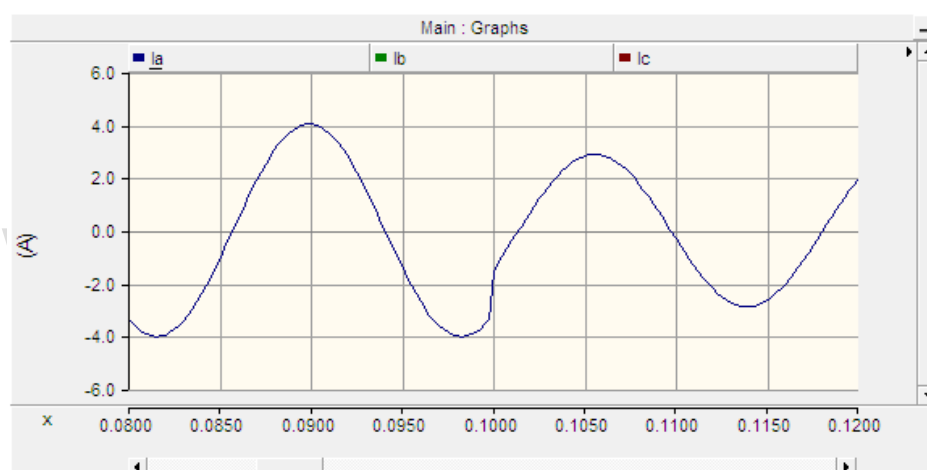


**Figura 4.15 Potencia Reactiva del sistema después de conectar el banco de capacitores.**





**Figura 4.16 Potencia Reactiva del sistema después de conectar el banco de capacitores en el intervalo de tiempo de 0.1 a 0.3seg.**



**Figura 4.17 Transitorio de la onda en el instante de 0.1s de conectar el banco de capacitores.**

## 4.5 SUMARIO

Los ajustes de las protecciones en los sistemas de potencia no solo se realizan en base a las características nominales de la red, sino también se toman en cuenta los eventos transitorios para los cuales los equipos deben estar ajustados para no operar y así evitar interrupciones en el sistema, como lo es por ejemplo la corriente *inrush* que se presenta en la energización o reconexión del transformador de potencia o también las elevadas corrientes presentes en una descarga atmosférica. Por ello para este capítulo se realizaron las pruebas correspondientes para la presencia de transitorios electromagnéticos, ya sea por descargas atmosféricas o por maniobra de banco de capacitores para reducir reactivos en la red, comprobándose el buen

funcionamiento y eficacia de la protección diferencial ante estos eventos transitorios de acuerdo a la configuración comercial ajustada, además se Verificó la eficacia en los resultados comparándolos con otros autores; como el presentado en el año 2002 con el trabajo de grado realizado por García, F. y Torres, U “Estudio estadístico de sobrecorrientes transitorias debidas a descargas atmosféricas en transformadores de potencia” [12]. También se debe tomar en cuenta lo accesible del software PSCAD para la realización de dichas pruebas ya que para este caso no hubo inconvenientes con los parámetros.

[www.bdigital.ula.ve](http://www.bdigital.ula.ve)

## CONCLUSIONES

Al haber experimentado el comportamiento del Relé diferencial ante Sistemas estables y no estables, el modelado de los mismos y del desarrollo de posibles casos en el programa PSCAD versión libre se obtienen las siguientes conclusiones:

- La distorsión armónica en los sistemas se hace presente dependiendo de los dispositivos conectados en la red, cada uno de ellos generan distorsiones en la señal de la corriente que podrían ser captados por el dispositivo de protección, la distorsión armónica se intensifica al conectar elementos No-lineales en la red, al energizar el sistema y en presencia de fallas, estas variaciones pueden hacer accionar el relé diferencial si sobrepasan los parámetros de configuración en el dispositivo de protección, destacando que el relé diferencial no debería accionar ante fallas externas en el sistema, se seleccionó un transformador de potencia de alta tensión como elemento protegido, limitando la zona de protección por los transformadores de corrientes(TC'S) cuyo elementos reducen e igualan las corrientes generadas del sistema en valores aptos para ser recibida por el relé diferencial y así analizar su comportamiento. Ante carga lineal sin Falla los relés diferenciales no dispararon debido a su baja distorsión armónica en el sistema; no sobrepasando los límites configurados previamente en el dispositivo debido a que los picos proporcionados en la señal distorsionada no superaron el pico de la frecuencia fundamental, es por ello que se aplica una falla monofásica del lado primario del transformador de potencia para conocer su comportamiento, obteniendo la operación de disparo en el relé debido a las altas corrientes diferenciales en el sistema por el incremento pronunciado en los armónicos; sobrepasando los límites de configuración; en este caso la distorsión del segundo armónico se incrementa notablemente debido a la energización del sistema, cuyos valores están fuera de la zona de restricción, obligando al disparo del relé, para

- el caso cuando el sistema alimenta una carga NO-LINEAL, se obtuvo un incremento en los armónicos pares e impares haciéndose notar más el segundo armónico sin sobrepasar los límites de configuración por lo que el relé no disparó debido a que el punto de medida se encontraba por debajo de las rampas de operación representadas por la curva característica y por último se analizó el sistema ante distorsión armónica para carga No- lineal en presencia de falla aplicada en el lado primario del transformador de potencia aumentando el segundo armónico de la señal incluso en las fases donde no fue aplicada la falla, observando la operación de disparo, el tercer y quinto armónico son componentes que aumentan al conectar una carga No- lineal al sistema, enfocándose en el comportamiento de dichos componentes ya que pueden perjudicar altamente el Elemento protegido, sin embargo para estos casos de estudio especialmente en la conexión de la carga No-Lineal, el tercer y quinto armónico no aumentaron considerablemente por lo que en ausencia de fallas el relé no disparó, considerando que los armónicos impares son los que pueden causar mayor riesgo en la estabilidad del sistema eléctrico de Potencia.
- Las descargas atmosféricas son uno de los fenómenos naturales que con mayor frecuencia impactan en los sistemas de potencia, dependiendo del tiempo de duración del impacto es que puede existir una corriente diferencial de falla importante dentro de los parámetros de disparo del relé diferencial debido a los transitorios electromagnéticos generados en el intervalo de tiempo de la descarga, como resultado en esta investigación y enfatizando el modelado de la descarga atmosférica simulada en PSCAD, el relé diferencial no opera, debido a su sensibilidad; haciendo que no se detecte ninguna falla en el sistema por su corto periodo de duración. Los transitorios electromagnéticos también se generan al momento de realizar maniobras en el sistema, se diseñó un banco de capacitores permitiendo la conexión y desconexión del mismo; obteniendo disminución de reactivos y por consiguiente mejorando el factor de potencia en la red, en este caso se observó el transitorio electromagnético al momento de la actuación del banco de capacitores mostrándose una diferencia en las corrientes que entran al relé, sin embargo el relé no dispara debido a su configuración.

- Se obtuvo el conocimiento necesario para la implementación del software PSCAD, generalmente seleccionado para observar perturbaciones en la señal que no son visibles por otros software, en este estudio las perturbaciones en la onda de la señal como las distorsiones armónicas o transitorios electromagnéticos aumentan notablemente dependiendo de los elementos conectados y los fenómenos que se presentan en el sistema, la aplicación de PSCAD en este trabajo da a conocer el comportamiento del Relé diferencial en presencia de perturbaciones antes mencionadas monitoreándolo para cada caso, no obstante las limitaciones del programa se hicieron presente en algunos parámetros generales que pudieron tomarse en cuenta para la configuración Inicial del Relé diferencial aunque no limitó su principio básico de operación y ejecución; se obtuvieron análisis importantes como la corriente diferencial la cual puede indicar una falla importante en el sistema o una mala actuación del relé, es por ello que se realizó dicha investigación puesto que en la actualidad pueden existir Relés diferenciales configurados sin tomar en cuenta estas perturbaciones lo que conlleva a la mala operación de los mismos.

www.bdigital.ula.ve

## RECOMENDACIONES

Al concretar el análisis del comportamiento en el relé diferencial ante distorsiones armónicas y transitorios electromagnéticos se recomienda lo siguiente.

- Realizar un estudio profundo y previo de los conceptos teóricos aplicados en el estudio Así como también aprender a controlar el programa PSCAD y sus elementos incluidos en la práctica simulada.
- Es necesario configurar el relé diferencial incluso cuando el objetivo en estudio sea analizar su comportamiento y no su diseño, ya que su sensibilidad ante actuaciones de Disparo o No Disparo depende de ello.
- Es de importancia construir un sistema para visualizar los armónicos generados por diferentes fenómenos, es de ellos que depende la correcta actuación del relé diferencial en el sistema y dependiendo de la componente generada (2do,3er,4to, 5to armónico ) es cuando debemos analizar el comportamiento del elemento de protección verificando si hay una actuación de Disparo correcta o incorrecta.
- Si el relé diferencial dispara ante transitorios electromagnéticos generados por una descarga atmosférica, se debe observar el tiempo de impacto en el sistema, si supera el tiempo umbral del dispositivo es un correcto comportamiento en el relé, de lo contrario se debe hacer enfatizar su configuración.
- Se recomienda ajustar el factor de potencia del sistema a un valor real en el caso de la conexión del banco de capacitores para que al corregir los reactivos de la red puedan dar valores gráficos más visibles y por ende la especificación del transitorio generado al aplicar la maniobra.
- Adquirir el programa Pscad con la versión comercial ya que proporcionaría elementos sin limitaciones, ajustándose más a la realidad.

## REFERENCIAS BIBLIOGRAFICAS

- [1] S. Ramírez Castaño, “Redes de Distribución de Eléctricos,” 2009. [En línea]. Disponible: . <https://www.academia.edu/people/search?utf8=%E2%9C%93&q=PROTECCIONES+DE+SI+STEMAS+DE+POTENCIA>.
- [2] Leonard L. Grigsby, “Electric Power Generation, Transmission, and Distribution,” 2004.
- [3] Elmore W, “Protective Relaying Theory and Applications,” 2003. [En línea]. Disponible: <https://es.scribd.com/document/385796365/Protective-Relaying-Theory-and-Applications-pdf>|||.
- [4] ABB. “Protection Application Handbook. B.U. Transmition System and Substations”. 1999 [En línea]. Disponible: <https://es.scribd.com/document/231065255/ABB-Protection-Application-Handbook-1999-1>.
- [5] Mason, C. R, “The Art & Science of Protective Relaying. USA: General Electric,” 2007. [En línea]. Disponible: <https://www.gegridsolutions.com/multilin/notes/artsci/artsci.pdf>
- [6] R. Stephens y C. Romero, Protección de Sistemas de Potencia, Mérida: Universidad de Los Andes. Facultad de Ingeniería. Escuela de Ingeniería Eléctrica. Departamento de Potencia, 2000.
- [7] S. Ramírez Castaño, “Protección de Sistemas Eléctricos,” 2008. [En línea]. Disponible: <http://www.bdigital.unal.edu.co/3392/1/samuelramirezcastano.2003.pdf>.
- [8] SIEMENS, SIPROTEC. 7UT6 Manual, 2006.
- [9] Arcila, J. (2014). *Armónicos en Sistemas Eléctricos*. Ingeniería Especializada S.A. Disponible en <http://ingeborda.com.ar/biblioteca/Biblioteca%20Internet/Articulos%20Tecnicos%20de%20Consulta/Calidad%20de%20Energia%20y%20Armonicos/Armonicas/Armonicos%20en%20sistemas%20electricos.pdf>

[10] Acevedo, F. (2017). *Componentes Armónicas En Redes De Distribución Eléctricas*. *Revista Marina*. No 5. Disponible en <https://revistamarina.cl/revistas/2001/5/Acevedo.pdf> Consultado el 11 de febrero de 2018.

[11] G.J. Alviarez Paredes, “Estudio de los efectos de la distorsión armónica y transitorios electromagnéticos en relés de sobrecorriente y fusibles” Tesis de pregrado, Departamento de Potencia, ULA, Mérida, 2019.

[12] García, F. y Torres, U. (2002). *Estudio Estadístico De Sobretensiones Transitorias Debidas A Descargas Atmosféricas En Líneas De Transmisión*. Trabajo de Grado publicado. Instituto Politécnico Nacional. México Df., México.

[13] Liu, P. (2008). *Modeling Lightning Performance of Transmission Systems Using PSCAD*, International Conference on High Voltage Engineering and Application. University Dept. of Electrical Eng. Cheng Du. Chongqing, China.

[14] Manitoba HVDC Research Centre. (2016). *USER'S GUIDE on the use of PSCAD* (Version 4.6.0). Manitoba, Canadá: Manitoba Hydro International Ltd.

[15] Dommel H. (1964). Regla Integración Trapezoidal, libro de teoría EMTP. Trabajo de grado post doctoral. Universidad Técnica de Munich, Alemania.