



**INSTITUTO POLITECNICO NACIONAL**

---

---

Escuela Superior de Ingeniería Mecánica y Eléctrica

Sección de Estudios de Posgrado e Investigación

DEPARTAMENTO DE INGENIERÍA ELÉCTRICA

**ANÁLISIS DE LA OPERACIÓN DE  
LAS PROTECCIONES DE  
SOBRECORRIENTE EN REDES DE  
DISTRIBUCIÓN CON PRESENCIA  
DE DISTORSIÓN ARMÓNICA.**

**T E S I S**

**QUE PARA OBTENER EL GRADO DE  
MAESTRO EN CIENCIAS  
CON ESPECIALIDAD EN INGENIERÍA ELÉCTRICA**

**P R E S E N T A:**

**MANUEL ÁGUILA MUÑOZ**



**MÉXICO, D. F. JUNIO 2006**





# INSTITUTO POLITÉCNICO NACIONAL

## COORDINACIÓN GENERAL DE POSGRADO E INVESTIGACIÓN

### CARTA SESIÓN DE DERECHOS

En la Ciudad de México, Distrito Federal, el día **20** del mes **Junio** del año **2006**, el que suscribe **Ing. Manuel Águila Muñoz** alumno del Programa de **Maestría en Ciencias con Especialidad en Ingeniería Eléctrica** con número de registro **B031503**, adscrito a la Sección de Estudios de Posgrado e Investigación de la ESIME Unidad Zacatenco, manifiesta que es autor intelectual del presente Trabajo de Tesis bajo la dirección del **Dr. David Sebastián Baltazar** y cede los derechos del trabajo intitulado: **Análisis de la operación de las protecciones de sobrecorriente en redes de distribución con presencia de distorsión armónica**, al Instituto Politécnico Nacional para su difusión, con fines académicos y de investigación.

Los usuarios de la información no deben reproducir el contenido textual, gráficas o datos del trabajo sin el permiso expreso del autor y/o director del trabajo. Éste puede ser obtenido escribiendo a las siguientes direcciones: [sixupseis@hotmail.com](mailto:sixupseis@hotmail.com); [dsebasti@ipn.mx](mailto:dsebasti@ipn.mx).

Si el permiso se otorga, el usuario deberá dar el agradecimiento correspondiente y citar la fuente del mismo.



Manuel Águila Muñoz.

---

Nombre y firma.



## RESUMEN

En la operación de las redes de distribución se pueden presentar fallas y/o regímenes anormales en sus elementos, lo que puede provocar averías en éstos, y consecuentemente la alteración del régimen normal de operación de la red eléctrica o de sus equipos, pudiéndose ocasionar la interrupción del servicio eléctrico a los usuarios, reducción de la calidad de la energía y/o daños en los equipos.

La función principal de los dispositivos de protección de sobrecorriente es provocar la desconexión automática del elemento del sistema que ha experimentado una falla o régimen anormal de operación, con el objetivo de reducir los daños en los elementos y evitar así, que se afecte la operación normal del resto de la red eléctrica de distribución.

Normalmente los ajustes para las protecciones de sobrecorriente están basados en el análisis de los sistemas eléctricos en condiciones de operación con voltajes y corrientes considerando cargas y fallas lineales, es decir, con forma de onda puramente senoidal. Sin embargo, la forma de onda de las corrientes y voltajes es distorsionada debido a cargas y/o condiciones de fallas no lineales, provocando como consecuencia que en algunos casos se pierda la coordinación en la operación de dichos dispositivos.

En este trabajo de tesis se evalúa y analiza el comportamiento de los dispositivos de protección de sobrecorriente empleados para proteger las redes de distribución. La evaluación del comportamiento de las protecciones en las redes de distribución se realizó empleando el software comercial PSCAD/EMTDC. El ajuste de los parámetros de operación de estos dispositivos se realiza en primera instancia considerando condiciones de carga y falla lineal. Después se valida la operación de los dispositivos de protección con los ajustes realizados, esto es en condiciones de carga y falla lineal. Finalmente, se evalúa y analiza el comportamiento de éstos en condiciones de corrientes distorsionadas, es decir, con carga y/o falla no-lineal. En algunos casos también se considera la variación del régimen nominal de carga.



## ABSTRACT

In the operation of the electrical distribution networks fault and/or no normal regimen operation in their elements can occur, which can damages these elements and consequently the alteration of the normal operation of the electrical network or their equipments, it can cause the electric service interruption, reduction of the power quality and equipment damages.

The main function of overcurrent protection devices is to cause the system element's automatic interruption when it has failed or abnormal operation regimen has occurred. It's made with the purpose to reduce the damages in the elements and preserve the electrical distribution network normal operation.

Usually the overcurrent protection settings are based on power systems analysis considering lineal faults and loads, i.e. current and voltages waves undistorted. However, the currents and voltages waveform are distorted due to non-lineal loads or some fault conditions, causing lost coordination of the devices operation.

In this thesis work the devices performance of overcurrent protection is evaluated and analyzed. These devices are used to protect the electrical distribution networks. The performance evaluation of these devices was made using the PSCAD/EMTDC commercial software. Firstly, the devices settings are made considering lineal loads and faults. Then, the protection devices operation is verified with the settings made. Finally, the performance in distorted waveform currents conditions is analyzed, i.e. with load and non-lineal faults. In some cases, the variation of the nominal regimen load is also considered.



## ÍNDICE DE CONTENIDO

	Pág.
RESUMEN	i
ABSTRACT	ii
ÍNDICE DE CONTENIDO	iii
ÍNDICE DE FIGURAS	x
ÍNDICE DE TABLAS	xx
NOMENCLATURA	xxi

### CAPÍTULO 1. INTRODUCCIÓN.

1.1	Introducción.	1-1
1.2	Objetivo de la tesis.	1-1
1.3	Planteamiento del problema.	1-2
1.4	Justificación.	1-2
1.5	Estado del arte.	1-3
1.5.1	Protección de los sistemas eléctricos.	1-3
1.6	Aportaciones de la Tesis.	1-6
1.7	Estructura de la tesis.	1-7

### CAPÍTULO 2. PROTECCIÓN DE SOBRECORRIENTE EN REDES DE DISTRIBUCIÓN.

2.1	Introducción.	2-1
2.2	Función de la protección.	2-2
2.3	Requisitos de la protección.	2-3
2.3.1	Confiabilidad.	2-3
2.3.2	Selectividad.	2-3
2.3.3	Velocidad.	2-3
2.3.3.1	Protección primaria y de respaldo.	2-4
2.3.4	Simplicidad.	2-5
2.3.5	Costo.	2-6



2.4	Principio de operación de la protección de sobrecorriente.	2-6
2.5	Dispositivos para protección de sobrecorriente en redes de distribución.	2-7
2.5.1	Fusible.	2-7
2.5.2	Relevadores de sobrecorriente.	2-9
2.5.3	Restaurador automático.	2-12
2.5.4	Seccionalizador automático.	2-16

### **CAPÍTULO 3. MODELADO DE LOS DISPOSITIVOS DE SOBRECORRIENTE Y SU COORDINACIÓN.**

3.1	Introducción.	3-1
3.2	Módulo fusibles.	3-2
3.2.1	Construcción del módulo Fusible.	3-2
3.2.2	Simulación y evaluación del módulo Fusible en diferentes condiciones de falla.	3-3
3.2.2.1	Sistema de prueba sin falla.	3-9
3.2.2.2	Sistema de prueba considerando una falla monofásica.	3-9
3.2.2.3	Sistema de prueba considerando una falla bifásica sólida.	3-10
3.2.2.4	Sistema de prueba considerando una falla trifásica sólida.	3-11
3.3	Módulo de protección con relevador instantáneo y relevador de sobre corriente de tiempo inverso.	3-12
3.3.1	Construcción del módulo de transformadores de corriente.	3-13
3.3.2	Construcción del módulo Rele 50/51.	3-14
3.3.3	Simulación y evaluación del módulo Rele 50/51 en diferentes condiciones de falla.	3-16
3.3.3.1	Sistema de prueba sin falla.	3-17
3.3.3.2	Sistema de prueba considerando una falla monofásica.	3-18
3.3.3.3	Sistema de prueba considerando una falla bifásica sólida.	3-19
3.3.3.4	Simulación de una falla trifásica sólida.	3-21
3.4	Módulo Restaurador.	3-22
3.4.1	Construcción del módulo Restaurador.	3-23





3.4.2	Evaluación del módulo Restaurador con diferentes condiciones de falla y secuencias de operación.	3-26
3.4.2.1	Sistema de prueba sin falla.	3-26
3.4.2.2	Sistema de prueba considerando una falla monofásica, con dos operaciones rápidas y dos operaciones lentas en el Restaurador.	3-27
3.4.2.3	Sistema de prueba considerando una falla bifásica temporal, con dos operaciones rápidas y dos operaciones lentas en el Restaurador.	3-28
3.4.2.4	Sistema de prueba considerando una falla monofásica, con una operación rápida y dos operaciones lentas en el Restaurador.	3-29
3.4.2.5	Sistema de prueba considerando una falla trifásica temporal, con una operación rápida y dos operaciones lentas en el Restaurador.	3-29
3.5	Módulo Seccionalizador.	3-30
3.5.1	Construcción del módulo Seccionalizador.	3-31
3.5.2	Evaluación del módulo Seccionalizador en diferentes condiciones de falla.	3-32
3.5.2.1	Sistema de prueba sin falla.	3-33
3.5.2.2	Sistema de prueba considerando una des-energización monofásica con corriente de falla.	3-34
3.5.2.3	Sistema de prueba considerando una des-energización trifásica con corriente de falla.	3-35
3.5.2.4	Sistema de prueba considerando una des-energización monofásica con corriente de nominal de carga.	3-36
3.6	Coordinación, evaluación y análisis de los módulos de protección en un sistema de prueba.	3-36
3.6.1	Evaluación del esquema de protección para la falla F4.	3-37
3.6.2	Evaluación del esquema de protección para la falla F3.	3-39
3.6.3	Evaluación del esquema de protección para la falla F2.	3-39
3.6.4	Evaluación del esquema de protección para la falla F1.	3-41





## **CAPÍTULO 4. EVALUACIÓN Y COORDINACIÓN DE LOS DISPOSITIVOS DE SOBRECORRIENTE EN CONDICIONES DE SEÑALES DISTORSIONADAS.**

4.1	Introducción.	4-1
4.2	Evaluación de los fusibles en condiciones de corrientes distorsionadas por carga nominal no-lineal.	4-2
4.2.1	Ajuste y evaluación de los fusibles en condiciones de carga lineal.	4-3
4.2.1.1	Evaluación de los fusibles en condiciones de carga nominal lineal.	4-4
4.2.1.2	Evaluación de los fusibles en condiciones de falla a-T.	4-5
4.2.1.3	Evaluación de los fusibles en condiciones de falla trifásica abc.	4-6
4.2.2	Evaluación de los fusibles en condiciones de carga no-lineal.	4-7
4.2.2.1	Evaluación de los fusibles en condiciones de carga nominal no-lineal.	4-7
4.2.2.2	Evaluación de los fusibles en condiciones de carga nominal no-lineal y falla a-T.	4-9
4.3	Evaluación del relevador 50/51 en condiciones de corrientes distorsionadas por carga nominal no-lineal y falla no-lineal.	4-10
4.3.1	Ajuste y evaluación del relevador 50/51 en condiciones de carga lineal.	4-11
4.3.1.1	Evaluación de los relevadores en condiciones de carga nominal no-lineal.	4-13
4.3.1.2	Evaluación de los relevadores en condiciones de falla monofásica a-T.	4-14
4.3.1.3	Evaluación de los relevadores en condiciones de falla bifásica ab.	4-15
4.3.1.4	Evaluación de los relevadores en condiciones de falla trifásica abc.	4-16
4.3.2	Evaluación de los relevadores en condiciones de corrientes distorsionadas.	4-17
4.3.2.1	Evaluación de los relevadores considerando condiciones de carga nominal no-lineal.	4-17
4.3.2.2	Evaluación considerando condiciones no lineales para una falla monofásica a-T.	4-18
4.3.2.3	Evaluación considerando condiciones no lineales para una falla bifásica ab.	4-19
4.3.2.4	Evaluación considerando condiciones no lineales para una falla trifásica abc.	4-21
4.4	Evaluación del restaurador en condiciones de corrientes distorsionadas por	



carga no lineal considerando variación del régimen de carga nominal.	4-22
4.4.1 Ajuste y evaluación del restaurador en condiciones de carga lineal.	4-23
4.4.1.1 Evaluación del restaurador en condiciones de carga nominal lineal.	4-25
4.4.1.2 Evaluación del restaurador en condiciones de falla monofásica a-T.	4-25
4.4.2 Evaluación del restaurador en condiciones de corrientes distorsionadas.	4-27
4.4.2.1 Evaluación del restaurador en condiciones de carga nominal no-lineal.	4-28
4.4.2.2 Evaluación del restaurador en condición de incremento de la carga nominal no-lineal.	4-29
4.5 Evaluación del seccionador en condiciones de corrientes distorsionadas por carga nominal no lineal, y considerando fluctuación del régimen de carga nominal.	4-30
4.5.1 Ajuste y evaluación del seccionador en condiciones de carga lineal.	4-32
4.5.1.1 Evaluación del seccionador en condiciones de carga nominal lineal.	4-32
4.5.1.2 Evaluación del seccionador en condiciones de incremento de la carga nominal lineal.	4-34
4.5.2 Evaluación del seccionador en condiciones de corrientes distorsionadas.	4-35
4.5.2.1 Evaluación del seccionador en condiciones de carga nominal no-lineal.	4-35
4.5.2.2 Evaluación del seccionador en condiciones de incremento de carga no-lineal.	4-36
4.6 Coordinación de un esquema de protección de sobrecorriente en condiciones de carga lineal, y su reajuste para carga no-lineal.	4-39
4.6.1 Ajustes y operación de los módulos de protección de sobrecorriente considerando carga lineal.	4-41
4.6.1.1 Evaluación de las protecciones en condiciones de carga nominal lineal.	4-42
4.6.1.2 Evaluación de las protecciones para una falla monofásica F1 a-T con carga lineal.	4-43
4.6.1.3 Evaluación de las protecciones para una falla trifásica F1 con carga lineal.	4-44
4.6.1.4 Evaluación de las protecciones para una falla F2 a-T con carga lineal.	4-45
4.6.1.5 Evaluación del módulo Rele 50/51 como protección de respaldo del restaurador.	4-46
4.6.2 Evaluación del esquema de protección con carga no lineal.	4-46



4.6.2.1	Evaluación de las protecciones en condiciones de carga nominal no-lineal C2.	4-46
4.6.2.2	Evaluación del esquema de protección para una falla trifásica F2 con carga C2 no-lineal.	4-48
4.6.3	Reajustes y evaluación de la operación de los módulos de protección de sobrecorriente tomando en cuenta la forma de onda de la corriente.	4-49
4.6.3.1	Evaluación del esquema de protección para una falla trifásica F2, cuando se han reajustado los relevadores instantáneos (R-50) considerando la carga no-lineal.	4-49
4.6.3.2	Evaluación del esquema de protección para una falla F1, a-T.	4-50
4.6.3.3	Evaluación del esquema de protección para una falla F2, a-T.	4-51
4.6.3.4	Evaluación del módulo Rele 50/51 como protección de respaldo del restaurador.	4-52

## **CAPÍTULO 5. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES PARA TRABAJOS FUTUROS.**

5.1	Conclusiones.	5-1
5.2	Aportaciones de la Tesis.	5-3
5.3	Sugerencias y recomendaciones para trabajos futuros.	5-4

## **REFERENCIAS.**

1

## **APÉNDICE A. Métodos de estimación de la magnitud de la corriente en los dispositivos de protección.**

A-1.	Método de estimación del valor pico de una señal de corriente.	A-1
A-2.	Método de estimación de la magnitud de la componente fundamental de una señal de corriente.	A-3
A-3.	Método de estimación del valor eficaz o rms de una señal de corriente.	A-4



## **APÉNDICE B. Ajustes para los modelos y bloques en el PSCAD/EMTDC.**

- |   |     |
|---|-----|
| B-1. Ajuste para los modelos y bloques del sistema de prueba de la figura 3.2.4.                          | B-1 |
| B-2. Ajustes de los parámetros para los fusibles del sistema de prueba de la figura 3.2.13.               | B-2 |
| B-3. Ajustes de los parámetros para los transformadores de corriente y los relevadores de la figura 3.3.1 | B-3 |
| B-4. Ajustes de los parámetros para el restaurador de la figura 3.4.1.                                    | B-4 |
| B-5. Ajustes de los parámetros del sistema para evaluar el seccionalizador 3.5.1.                         | B-5 |
| B-6. Ajustes de los parámetros para el Seccionalizador de la figura 3.5.1.                                | B-5 |
| B-7. Ajustes de los parámetros del sistema de prueba de la figura 3.5.1.                                  | B-6 |

## **APÉNDICE C. Ajustes para los modelos y bloques en el PSCAD/EMTDC.**

- |   |     |
|---|-----|
| C-1. Ajustes de los parámetros para los fusibles de la figura 4.2.1.  | C-1 |
| C-2. Ajustes de los parámetros para los transformadores de corriente y los relevadores de la figura 4.3.1   | C-2 |
| C-3. Ajustes de los parámetros para el módulo Restaurador de la figura 4.4.1  | C-3 |
| C-4. Ajustes de los parámetros para el módulo Seccionalizador de la figura 4.5.1  | C-4 |
| C-5. Ajustes de los parámetros para el sistema eléctrico de la figura 4.6.3.  | C-5 |
| C-6 Ajustes de los parámetros para los transformadores de corriente y el módulo de relevadores de la figura 4.6.3 (considerando condiciones de carga lineal). | C-6 |
| C-7 Ajustes de los parámetros para el restaurador de la figura 4.6.3 (considerando condiciones de carga lineal).  | C-7 |

## **APÉNDICE D. Algoritmos del programa GTS.m (MatLab v 7.0).**

D-1

## INDICE DE FIGURAS.

### CAPÍTULO 2.

	Pág.
Figura 2.3.1. Un sistema eléctrico típico y sus respectivas zonas de protección.	2-4
Figura 2.4.1. Proporción de la corriente de falla según la distancia de la fuente.	2-6
Figura 2.5.1. Curvas características tiempo-corriente para un fusible.	2-8
Figura 2.5.2. Tipos de relevadores de sobrecorriente.	2-9
Figura 2.5.3. Relevador electromecánico (disco de inducción) de sobrecorriente de tiempo inverso.	2-10
Figura 2.5.4. Curvas características para un relevador de sobrecorriente de tiempo inverso analógico de la marca SIEMENS Mod. 7SJ511	2-12
Figura 2.5.5. Secuencia típica de operación de un restaurador.	2-14
Figura 2.5.6. Curvas características de operación de un restaurador.	2-15
Figura 2.5.7. Secuencia típica de un restaurador para fallas permanentes (coordinación restaurador-seccionalizador).	2-16
Figura 2.5.8. Aplicación de un seccionalizador, programado para que opere en dos operaciones del restaurador.	2-18
Figura 2.5.9. Aplicación de un seccionalizador, programado para que opere en tres operaciones del restaurador.	2-19
Figura 2.5.10. Esquema de protección usando un restaurador R tres seccionalizadores S1, S2 y S3.	2-19

### CAPÍTULO 3.

Figura 3.2.1. Curvas características tiempo-corriente para un fusible. (T <sub>m</sub> ): Tiempo mínimo requerido para provocar la fundición del fusible. (T <sub>M</sub> ): tiempo total máximo requerido por el fusible para liberar la falla.	3-2
Figura 3.2.2. Módulo que simula la característica de operación de un fusible.	3-3
Figura 3.2.3. Contenido detallado del Módulo <b>Fusible_a</b> (dispositivos de medición, nodos eléctricos de conexión, interruptor, <b>R-51</b> , compuertas lógicas y panel de control).	3-4
Figura 3.2.4. Sistema de prueba para evaluar la operación de los módulos de protección.	3-4

Figura 3.2.5. Corrientes trifásicas en el sistema de prueba sin falla, <b>Iabc</b> =1.414 A- <b>pico</b> .	3-6
Figura 3.2.6. Valores <b>rms</b> de las corrientes en el sistema de prueba sin falla, <b>Iabc</b> =1 A.	3-6
Figura 3.2.7. Corrientes trifásicas para una falla monofásica <b>a-T</b> , <b>Ia<sub>max</sub></b> =2.825 A- <b>pico</b>	3-6
Figura 3.2.8. Valores <b>rms</b> de las corrientes para una falla monofásica <b>a-T</b> , <b>Ia<sub>max</sub></b> =2 A.	3-6
Figura 3.2.9. Corrientes trifásicas en el sistema de prueba para una falla bifásica sólida <b>ab</b> , <b>Iab<sub>max</sub></b> =3.741 A- <b>pico</b> .	3-7
Figura 3.2.10. Valores <b>rms</b> de las corrientes en el sistema de prueba para una falla bifásica sólida <b>ab</b> , <b>Iab<sub>max</sub></b> =2.64575 A.	3-7
Figura 3.2.11. Corrientes trifásicas en el sistema de prueba para una falla trifásica sólida <b>abc</b> , <b>Iabc<sub>max</sub></b> =5.65 A- <b>pico</b> .	3-8
Figura 3.2.12. Valores <b>rms</b> de las corrientes en el sistema de prueba para una falla trifásica sólida <b>abc</b> , <b>Iabc<sub>max</sub></b> =4 A.	3-8
Figura 3.2.13. Diagrama en PSCAD para la simulación y evaluación de los módulos <b>Fusible_a</b> , <b>Fusible_b</b> y <b>Fusible_c</b> .	3-9
Figura 3.2.14. Corrientes nominales medidas en el sistema de prueba.	3-10
Figura 3.2.15. Estados de operación de los interruptores en los módulos <b>Fusible</b> .	3-10
Figura 3.2.16. Corrientes medidas, para una falla monofásica.	3-10
Figura 3.2.17. Estados de operación de los módulos <b>Fusible</b> .	3-10
Figura 3.2.18. Corrientes medidas, para una falla bifásica sólida <b>ab</b> .	3-11
Figura 3.2.19. Estados de operación de los interruptores en los módulos <b>Fusible</b> .	3-11
Figura 3.2.20. Corrientes medidas, para una falla trifásica sólida.	3-11
Figura 3.2.21. Estados de operación de los interruptores en los módulos <b>Fusible</b> .	3-11
Figura 3.3.1 Diagrama en PSCAD para la simulación y evaluación del módulo <b>Rele 50/51</b> .	3-14
Figura 3.3.2. Componentes del módulo <b>Transf. de corriente</b> .	3-14
Figura 3.3.3. Elementos componentes del módulo <b>Relevadores R50/R51</b> de disparo monopolar.	3-16
Figura 3.3.4. Corrientes en las fases <b>a</b> , <b>b</b> y <b>c</b> , cuando no existe falla en el sistema de prueba.	3-17
Figura 3.3.5. Estados de operación de los relevadores.	3-17
Figura 3.3.6. Estados de operación de los interruptores.	3-18



Figura 3.3.7. Recorrido de los discos en los relevadores <b>R-51's</b> .	3-18
Figura 3.3.8. Corrientes en las fases <b>a, b y c</b> , para una falla <b>a-T</b> .	3-18
Figura 3.3.9. Estados de operación del módulo <b>Rele 50/51</b> .	3-18
Figura 3.3.12. Corrientes en las fases <b>a, b y c</b> , para una falla <b>ab</b> .	3-20
Figura 3.3.13. Estados de operación del módulo <b>Rele 50/51</b>	3-20
Figura 3.3.14. Estados de operación de los interruptores.	3-20
Figura 3.3.15. Recorrido de los discos en los <b>R-51</b> .	3-20
Figura 3.3.16. Corrientes en las fases <b>a, b y c</b> , para una falla <b>abc</b> .	3-21
Figura 3.3.17. Estados de operación del módulo <b>Rele 50/51</b> .	3-21
Figura 3.3.18. Estados de operación de los interruptores.	3-22
Figura 3.3.19. Recorrido de los discos en los <b>R-51</b> .	3-22
Figura 3.4.1. Diagrama en PSCAD/EMTDC para la simulación y evaluación del módulo <b>R</b> (restaurador).	3-23
Figura 3.4.2. Elementos componentes del módulo <b>R</b> (restaurador) de operación monopolar.	3-24
Figura 3.4.3. Curvas características de operación de un restaurador.	3-25
Figura 3.4.4. Corrientes en las fases <b>a, b y c</b> , sin falla.	3-27
Figura 3.4.5. Estados de operación del módulo <b>R</b> .	3-27
Figura 3.4.6. Corrientes en las fases <b>a, b y c</b> , para una falla <b>a-T</b> permanente.	3-27
Figura 3.4.7. Estados de operación del módulo <b>R</b> .	3-27
Figura 3.4.8. Corrientes primarias en las fases <b>a, b y c</b> , para una falla <b>ab</b> temporal.	3-28
Figura 3.4.9. Estados de operación del módulo <b>R</b> .	3-28
Figura 3.4.10. Corrientes primarias en las fases <b>a, b y c</b> , para una falla <b>a-T</b> permanente.	3-29
Figura 3.4.11. Estados de operación del módulo <b>R</b> .	3-29
Figura 3.4.12. Corrientes primarias en las fases <b>a, b y c</b> , para una falla <b>abc</b> temporal.	3-30
Figura 3.4.13. Estados de operación del módulo <b>R</b> .	3-30
Figura 3.5.1. Diagrama en PSCAD para la simulación y evaluación del módulo <b>S</b> (seccionalizador).	3-31
Figura 3.5.2. Elementos componentes del módulo <b>S</b> .	3-33
Figura 3.5.3. Corrientes en las fases <b>a, b y c</b> , sin falla.	3-34





Figura 3.5.4. Estados de operación del módulo <b>S</b> .	3-34
Figura 3.5.5. Corrientes en las fases <b>a</b> , <b>b</b> y <b>c</b> , para una falla monofásica <b>a-T</b> , permanente.	3-35
Figura 3.5.6. Estados de operación del módulo <b>S</b> .	3-35
Figura 3.5.7. Corrientes en las fases <b>a</b> , <b>b</b> y <b>c</b> , para una falla trifásica, permanente.	3-35
Figura 3.5.8. Estados de operación del módulo <b>S</b> .	3-35
Figura 3.5.9. Corrientes en las fases <b>a</b> , <b>b</b> y <b>c</b> , para una des-energización monofásica, con corriente nominal de carga.	3-36
Figura 3.5.10. Estados de operación del módulo <b>S</b> .	3-36
Figura 3.6.1. Esquema de protección de sobrecorriente para un sistema de distribución (esquema de prueba).	3-37
Figura 3.6.2. Diagrama unifilar en PSCAD para simular el sistema de prueba de la figura 3.5.1.	3-38
Figura 3.6.3. Corrientes medidas en el punto <b>D</b> , para una falla <b>F4</b> monofásica ( <b>a-T</b> ).	3-38
Figura 3.6.4. Corrientes medidas en el punto <b>B</b> , para una falla <b>F3</b> monofásica ( <b>a-T</b> ).	3-39
Figura 3.6.5. Señales de salida del <b>R</b> .	3-39
Figura 3.6.6. Corrientes medidas en el punto <b>C</b> , para una falla <b>F3</b> monofásica ( <b>a-T</b> ).	3-40
Figura 3.6.7. Señales de salida del <b>S</b> .	3-40
Figura 3.6.8. Corrientes mediadas en el punto <b>B</b> , para una falla <b>F2</b> trifásica, <b>abc</b>	3-40
Figura 3.6.9. Señales de salida del <b>R</b> .	3-40
Figura 3.6.10. Corrientes medidas en el punto <b>A</b> , para una falla <b>F2</b> trifásica, <b>abc</b> .	3-41
Figura 3.6.11. Señales de salida del <b>Rele 50/51</b> .	3-41
Figura 3.6.12. Recorrido de los discos en los relevadores <b>R-51</b> .	3-41
Figura 3.6.13. Corrientes medidas en el punto <b>A</b> , para una falla <b>F1</b> monofásica, <b>a-T</b> .	3-42
Figura 3.6.14. Señales de salida del <b>Rele R50/51</b> .	3-42
Figura 3.6.15. Recorrido de los discos en los relevadores <b>R-51</b> .	3-42
Figura 3.6.16. Corrientes medidas en el punto <b>A</b> , para una falla <b>F1</b> trifásica, <b>abc</b> .	3-43
Figura 3.6.17. Señales de salida del <b>Rele 50/51</b> .	3-43
Figura 3.6.18. Recorrido de los discos en los relevadores <b>R-51</b> .	3-43

**CAPÍTULO 4.**

Figura 4.2.1 Diagrama en PSCAD para la simulación y evaluación de los fusibles con señales de corriente distorsionadas.	4-2
Figura 4.2.2. Espectro armónico de la señal de corriente para carga lineal nominal.	4-3
Figura 4.2.3. Espectro armónico de la señal de corriente para falla monofásica a tierra, <b>a-T</b> .	4-3
Figura 4.2.4. Espectro armónico de la señal de corriente para falla trifásica, <b>abc</b> .	4-4
Figura 4.2.5. Formas de onda de las corrientes, <b>I<sub>abc</sub></b> =1.414 A- <b>pico</b> .	4-5
Figura 4.2.6. Valores <b>rms</b> de las señales de corriente, <b>I<sub>abc</sub></b> =1.0 A.	4-5
Figura 4.2.7. Estados de operación de los fusibles.	4-5
Figura 4.2.8. Formas de onda de las corrientes, <b>I<sub>a_max</sub></b> =2.828 A- <b>pico</b>	4-6
Figura 4.2.9. Valores <b>rms</b> de las señales de corriente, <b>I<sub>a_max</sub></b> =2.0 A.	4-6
Figura 4.2.10. Estados de operación de los fusibles.	4-6
Figura 4.2.11. Formas de onda de las corrientes, <b>I<sub>abc_max</sub></b> = 5.657 A- <b>pico</b> .	4-7
Figura 4.2.12. Estados de operación de los fusibles.	4-7
Figura 4.2.13. Espectro armónico de las señales de corriente.	4-8
Figura 4.2.14. Formas de onda de las corrientes, <b>I<sub>abc_max</sub></b> =3.1 A- <b>pico</b> .	4-8
Figura 4.2.15. Valores <b>rms</b> de las señales de corriente, <b>I<sub>abc_max</sub></b> =1.851 A.	4-8
Figura 4.2.16. Estados de operación de los fusibles.	4-8
Figura 4.2.17. Espectro armónico de las señales de corriente.	4-9
Figura 4.2.18. Formas de onda de las corrientes, <b>I<sub>a_max</sub></b> =4.4 A- <b>pico</b> .	4-9
Figura 4.2.19. Valores <b>rms</b> de las señales de corriente, <b>I<sub>a_max</sub></b> =2.535 A.	4-9
Figura 4.2.20. Estados de operación de los fusibles.	4-10
Figura 4.3.1. Diagrama en PSCAD para la simulación y evaluación del módulo <b>Rele 50/51</b> con señales de corriente distorsionadas.	4-11
Figura 4.3.2. Espectro armónico de la señal de corriente para carga nominal lineal.	4-12
Figura 4.3.3. Espectro armónico de la señal de corriente para falla lineal monofásica a tierra, <b>a-T</b> .	4-12
Figura 4.3.3. Espectro armónico de la señal de corriente para falla lineal bifásica, <b>ab</b> .	4-12
Figura 4.3.4. Espectro armónico de la señal de corriente para falla lineal trifásica, <b>abc</b> .	4-12
Figura 4.3.5. Forma de onda de las corrientes, <b>I<sub>abc_max</sub></b> =1.414 A- <b>pico</b> .	4-14



Figura 4.3.6. Estados de operación de los relevadores de tiempo inverso.	4-14
Figura 4.3.7. Forma de onda de las corrientes, $I_{a_{\max}}=2.828$ A- <b>pico</b> .	4-14
Figura 4.3.8. Recorrido de los discos en los relevadores de tiempo inverso.	4-14
Figura 4.3.9. Estados de operación de los relevadores de tiempo inverso.	4-15
Figura 4.3.10. Forma de onda de las corrientes, $I_{ab_{\max}}=3.74$ A- <b>pico</b> .	4-15
Figura 4.3.11. Recorrido de los discos en los relevadores de tiempo inverso.	4-15
Figura 4.3.12. Estados de operación de los relevadores de tiempo inverso.	4-16
Figura 4.3.13. Forma de onda de las corrientes, $I_{abc_{\max}}=5.657$ A- <b>pico</b> .	4-16
Figura 4.3.14. Recorrido de los discos en los relevadores de tiempo inverso.	4-16
Figura 4.3.15. Estados de operación de los relevadores de tiempo inverso.	4-17
Figura 4.3.16. Espectro armónico de las señales de corriente.	4-17
Figura 4.3.17. Formas de ondas de las corrientes, $I_{abc_{\max}}=1.506$ A- <b>pico</b> .	4-17
Figura 4.3.18. Valor <b>rms</b> de las corrientes, $I_{abc}=0.683$ A.	4-18
Figura 4.3.19. Estados de operación de los relevadores.	4-18
Figura 4.3.20. Espectro armónico de las señales de corriente.	4-19
Figura 4.3.21. Formas de ondas de las corrientes, $I_{a_{\max}}=4.425$ A- <b>pico</b>	4-19
Figura 4.3.22. Valor <b>rms</b> de las corrientes, $I_{a_{\max}}=2.202$ A.	4-19
Figura 4.3.23. Estados de operación de los relevadores.	4-19
Figura 4.3.24. Espectro armónico de las señales de corriente.	4-20
Figura 4.3.25. Formas de ondas de las corrientes, $I_{abc_{\max}}=5.296$ A- <b>pico</b> .	4-20
Figura 4.3.26. Valor <b>rms</b> de las corrientes, $I_{ab_{\max}}=2.865$ A.	4-20
Figura 4.3.27. Estados de operación de los relevadores.	4-20
Figura 4.3.28. Espectro armónico de las señales de corriente.	4-22
Figura 4.3.29. Formas de ondas de las corrientes, $I_{abc_{\max}}=4.8$ A- <b>pico</b> .	4-22
Figura 4.3.30. Valor <b>rms</b> de las corrientes, $I_{abc_{\max}}=4.05$ A.	4-22
Figura 4.3.31. Estados de operación de los relevadores.	4-22
Figura 4.4.1. Diagrama en PSCAD para la simulación y evaluación del restaurador con señales de corriente distorsionadas.	4-24
Figura 4.4.2. Espectro armónico de las señales de corriente para carga nominal lineal.	4-24
Figura 4.4.3. Espectro armónico de las señales de corriente para falla lineal monofásica a tierra, <b>a-T</b> .	4-24

Figura 4.4.4. Formas de onda de las corrientes, <b>I<sub>abc</sub></b> =1.414 A- <b>pico</b> .	4-25
Figura 4.4.5. Valor <b>rms</b> de las corrientes, <b>I<sub>abc</sub></b> =1.0 A.	4-25
Figura 4.4.6. Estados de operación del restaurador.	4-25
Figura 4.4.7. Formas de onda de las corrientes, <b>I<sub>a_max</sub></b> = 2.828 A- <b>pico</b> .	4-26
Figura 4.4.8. Estados de operación del restaurador.	4-26
Figura 4.4.9. Espectro armónico de las señales de corriente para carga nominal lineal.	4-27
Figura 4.4.10. Formas de onda de las señales de corrientes, <b>I<sub>abc</sub></b> =1.626 A- <b>pico</b> .	4-27
Figura 4.4.11. Valor <b>rms</b> de las corrientes, <b>I<sub>abc</sub></b> =1.15 A.	4-27
Figura 4.4.12. Estados de operación del restaurador.	4-27
Figura 4.4.13. Espectro armónico de las señales de corriente para carga nominal no-lineal.	4-28
Figura 4.4.14. Formas de onda de las señales de corrientes, <b>I<sub>abc</sub></b> =2.736 A- <b>pico</b> .	4-28
Figura 4.4.15. Valor <b>rms</b> de las corrientes, <b>I<sub>abc</sub></b> =1.263 A.	4-29
Figura 4.4.16. Estados de operación del restaurador.	4-29
Figura 4.4.17. Espectro armónico de las señales de corriente para carga no-lineal.	4-30
Figura 4.4.18. Formas de onda de las señales de corrientes, <b>I<sub>abc</sub></b> =3.147 A- <b>pico</b> .	4-30
Figura 4.4.19. Valor <b>rms</b> de las corrientes, <b>I<sub>abc</sub></b> =1.453 A.	4-30
Figura 4.4.20. Estados de operación del restaurador.	4-30
Figura 4.5.1. Diagrama en PSCAD para la simulación y evaluación del seccionizador con señales de corriente distorsionadas.	4-31
Figura 4.5.2. Espectro armónico de las señales de corriente para carga nominal lineal.	4-33
Figura 4.5.3. Formas de onda de las señales de corrientes, <b>I<sub>abc</sub></b> =1.414 A- <b>pico</b>	4-33
Figura 4.5.4. Valor <b>rms</b> de las corrientes, <b>I<sub>abc</sub></b> =1.0 A.	4-33
Figura 4.5.5. Estados de operación del seccionizador.	4-33
Figura 4.5.6. Espectro armónico de las señales de corriente.	4-34
Figura 4.5.7. Formas de onda de las corrientes, <b>I<sub>abc</sub></b> = 1.767 A- <b>pico</b>	4-34
Figura 4.5.8. Valor <b>rms</b> de las señales de corriente, <b>I<sub>abc</sub></b> =1.25 A.	4-34
Figura 4.5.9. Estados de operación del restaurador.	4-34
Figura 4.5.10. Formas de onda de las señales de corrientes, <b>I<sub>a_max</sub></b> = 2.828 A- <b>pico</b> .	4-35
Figura 4.5.11. Valor <b>rms</b> de las corrientes, <b>I<sub>a_max</sub></b> =2 A.	4-35
Figura 4.5.12. Estados de operación del seccionizador.	4-35

Figura 4.5.13. Espectro armónico de las señales de corriente para carga nominal no-lineal.	4-36
Figura 4.5.14. Formas de onda de las señales de corrientes, <b>I<sub>abc</sub></b> =2.3 A- <b>pico</b> .	4-36
Figura 4.5.15. Valor <b>rms</b> de las señales de corriente, <b>I<sub>abc</sub></b> =1.15 A.	4-36
Figura 4.5.16. Estados de operación del seccionalizador.	4-36
Figura 4.5.17. Espectro armónico de las señales de corriente para un incremento de carga no-lineal.	4-37
Figura 4.5.18. Formas de onda de las señales de corrientes, <b>I<sub>abc</sub></b> =2.87 A- <b>pico</b> .	4-37
Figura 4.5.19. Valor <b>rms</b> de las señales de corriente, <b>I<sub>abc</sub></b> =1.437 A.	4-37
Figura 4.5.20. Estados de operación del seccionalizador.	4-37
Figura 4.5.21. Formas de onda de las señales de corrientes, <b>I<sub>a_max</sub></b> = 4.6 A- <b>pico</b> .	4-38
Figura 4.5.22. Valor <b>rms</b> de las corrientes, <b>I<sub>a_max</sub></b> =2.29 A.	4-38
Figura 4.5.23. Estados de operación del seccionalizador.	4-39
Figura 4.6.1. Esquema típico para protección de sobrecorriente.	4-40
Figura 4.6.2. Sistema unifilar de prueba.	4-40
Figura 4.6.3. Diagrama -EMTDC/PSCAD-, módulos de protección ( <b>Rele 50/51</b> y <b>R</b> ), módulos de carga, Módulo de controles, medidores y registradores.	4-41
Figura 4.6.4. Estados de operación del módulo <b>Rele 50/51</b> .	4-43
Figura 4.6.5. Estados de operación del <b>R</b> .	4-43
Figura 4.6.6. Formas de onda de las corrientes medidas en el punto <b>A</b> , <b>I<sub>a_max</sub></b> = 3.085 A- <b>pico</b>	4-43
Figura 4.6.7. Estados de operación del <b>Rele 50/51</b> .	4-43
Figura 4.6.8. Posición de los discos de inducción de los <b>R-51</b> 's.	4-44
Figura 4.6.9. Formas de onda de las corrientes medidas en el punto <b>A</b> , falla trifásica <b>F1</b> , <b>I<sub>abc_max</sub></b> =3.888 A- <b>pico</b> .	4-44
Figura 4.6.10. Posición de los discos de inducción de los <b>R-51</b> 's.	4-44
Figura 4.6.11. Formas de onda de las corrientes medidas en el punto <b>B</b> , falla <b>F2 a-T</b> . <b>I<sub>a_max</sub></b> =1.257 A- <b>pico</b> .	4-45
Figura 4.6.12. Estados de operación del <b>R</b> .	4-45
Figura 4.6.13. Formas de onda de las corrientes medidas en el punto <b>A</b> , falla <b>F2 a-T</b> . <b>I<sub>a_max</sub></b> =2.724 A- <b>pico</b> .	4-46



Figura 4.6.14. Estados de operación del <b>R</b> .	4-46
Figura 4.6.15. Espectro armónico de las señales de corriente medidas en el punto <b>A</b> . $I_T=1.7$ A.	4-47
Figura 4.6.16. Formas de onda de las corrientes medidas en el punto <b>A</b> , $I_{abc}=3.038$ <b>A-pico</b> .	4-47
Figura 4.6.17. Espectro armónico de las señales de corriente medidas en el punto <b>B</b> . $I_T=0.773$ A.	4-47
Figura 4.6.18. Formas de onda de las corrientes medidas en el punto <b>B</b> , $I_{abc}=1.73$ A- <b>pico</b> .	4-47
Figura 4.6.19. Estados de operación del <b>Rele 50/51</b> .	4-48
Figura 4.6.20. Estados de operación del <b>R</b> .	4-48
Figura 4.6.21. Formas de onda medidas en el punto <b>A</b> , $I_{abc_{max}}=3.616$ A- <b>pico</b> .	4-48
Figura 4.6.22. Estados de operación del <b>Rele 50/51</b> .	4-48
Figura 4.6.23. Estados de operación del restaurador.	4-50
Figura 4.6.24. Formas de onda medidas en el punto <b>B</b> , $I_{abc_{max}}=2.6$ A- <b>pico</b>	4-50
Figura 4.6.25. Formas de onda de las corrientes medidas en el punto <b>A</b> , $I_{a_{max}}=3.64$ A- <b>pico</b> .	4-50
Figura 4.6.26. Espectro armónico para condición de falla de la fase <b>a</b> , $I_T=2.2$ A.	4-50
Figura 4.6.27. Estados de operación del <b>Rele 50/51</b> .	4-51
Figura 4.6.28. Formas de onda de las corrientes medidas en el punto <b>B</b> , $I_{a_{max}}=1.929$ A- <b>pico</b> .	4-52
Figura 4.6.29. Espectro armónico para condición de falla de la fase <b>a</b> , $I_T=0.97$ A.	4-52
Figura 4.6.30. Estados de operación del <b>R</b> .	4-52
Figura 4.6.31. Posición de los discos de los <b>R-51's</b>	4-52
Figura 4.6.32. Formas de onda de las corrientes medidas en el punto <b>A</b> , falla F2 <b>a-T</b> .	4-53
Figura 4.6.33. Estados de operación del <b>R</b> .	4-53
Figura 4.6.34. Estados de operación del <b>Rele 50/51</b> .	4-53

## APÉNDICE A.

Figura A.1. Estimación del valor pico de una señal de corriente $I_1(t)$ senoidal.	A-2
Figura A.2. Estimación del valor pico de una señal de corriente $I_2(t)$ con: $h_1=1$ ,	



h3=0.3.	A-2
Figura A.3. Estimación del valor pico de una señal de corriente $I_3(t)$ con: $h_1=1$ , $h_3=0.3$ .	A-2
Figura A.4. Estimación de la magnitud de la componente fundamental $h_1$ de una señal de corriente $I_1(t)$ senoidal.	A-3
Figura A.5. Estimación de la magnitud de la componente fundamental $h_1$ de una señal de corriente $I_4(t)$ con: $h_1=1$ , $h_3=0.75$ , $h_5=0.63$ , $h_9=0.35$ .	A-3
Figura A.6. Estimación del valor <b>rms</b> de una señal de corriente $I_1(t)$ con: $h_1=1$ .	A-5
Figura A.7. Estimación del valor <b>rms</b> de una señal de corriente $I_2(t)$ con: $h_1=1$ , $h_3=0.3$ .	A-5
Figura A.8. Estimación del valor <b>rms</b> de una señal de corriente $I_3(t)$ con: $h_1=1$ , $h_3=0.3$ .	A-5
Figura A.9. Estimación del valor <b>rms</b> de una señal de corriente $I_4(t)$ con: $h_1=1$ , $h_3=0.75$ , $h_5=0.63$ , $h_9=0.35$ .	A-5





## ÍNDICE DE TABLAS.

Tabla 3.2.1. Tipos de fallas y su correspondiente valor de asignación en PSCAD/EMTDC.	3-5
Tabla 3.2.2. Fallas simuladas y su respectivo valor asignado en el módulo Control de Fallas de la figuras.	3-5



## NOMENCLATURA

“O”	Compuerta lógica “O”.
“Y”	Compuerta lógica “Y”.
A	Unidad de corriente eléctrica –Amperes-.
ab-T	Indica falla de la fase <b>a</b> y <b>b</b> a tierra.
a-T	Indica falla de la fase <b>a</b> a tierra.
brkRl_a, brkRl_b, brkRl_c	Señales de salida del módulo <b>Rele 50/51</b> hacia el interruptor.
C.A.	Contacto abierto.
C.C.	Contacto cerrado.
C_L o CL	Carga lineal.
C_N_L o CNL	Carga no-lineal.
C1, C2, C3, C4	Cargas.
CA	Corriente alterna.
CA/CA	Convertidor de corriente alterna a corriente alterna –inversor-.
CA/CD	Convertidor de corriente alterna a corriente directa -rectificador-.
F	Módulo Fusible.
F1, F2, F3, F4	Fallas.
h1	Armónico fundamental -60 Hz-.
h2	Segundo armónico -120 Hz-.
h3	Tercer armónico -180 Hz-.
h5	Quinto armónico -300 Hz-.
h9	Noveno armónico -540 Hz-.
Ia	Corriente de la fase <b>a</b> .
Iab	Indica que las corrientes de las fases <b>a</b> y <b>b</b> son de la misma magnitud.
Iabc	Indica que <b>Ia</b> , <b>Ib</b> e <b>Ic</b> son de la misma magnitud.
Iabc <sub>max</sub>	Indica que <b>Ia</b> , <b>Ib</b> e <b>Ic</b> tienen la misma magnitud máxima.



$I_{ab_{max}}$	Indica que <b>Ia</b> e <b>Ib</b> tienen la misma magnitud máxima.
IaF, IbF, IcF	Corrientes medidas en los módulos Fusibles.
$I_{a_{max}}$	Indica la magnitud máxima de <b>Ia</b>
IaR, IbR, IcR	Corrientes en el módulo Restaurador.
IaRl, IbRl, IcRl	Corrientes en el módulo Rele 50/51.
IaS, IbS, IcS	Corrientes en el módulo Seccionalizador.
Ib	Corriente en la fase <b>b</b> .
Ic	Corriente en la fase <b>c</b> .
Int	Interruptor.
ITap	Corriente de arranque en un relevador de sobrecorriente de tiempo inverso
L-L	Magnitud de línea a línea.
MatLab	Paquete computacional empleado para programar.
mpc	Muestras tomadas en cada ciclo de la frecuencia fundamental.
MΩ	Mega ohms - $1 \times 10^6$ ohms-.
pico	Magnitud máxima de una señal de corriente alterna.
PSCAD/EMTDC	Simulador de sistemas eléctricos de potencia asistido por computadora.
Pt	Palanca de tiempo o dial.
R	Módulo Restaurador.
R1, R2, R3	Restauradores.
R-50 / R-50's	Relevador de sobrecorriente de tiempo inverso / Plural.
R-51, R-51's	Relevador de sobrecorriente instantáneo / Plural.
Rele 50/51	Módulo con relevadores de sobrecorriente instantáneo/tiempo inverso
rms	Valor eficaz o medio cuadrático.
S	Módulo Seccionalizador.
S1, S2, S3	Seccionalizadores.



T_aplic_F	Tiempo de aplicación de la falla.
T_durac_F	Tiempo de duración de la falla.
T_Falla	Tipo de falla.
TC, TC's	Transformadores de corriente / Plural.
TD	Operaciones lentas del Restaurador.
t <sub>disp</sub>	Tiempo de disparo
TF	Operaciones rápidas del Restaurador.
Tm	Curva del tiempo mínimo para que se funda un fusible.
TM	Curva del tiempo máximo para que se funda un fusible.
TP	Transformador de potencial.
UPS	Fuente ininterrumpible de voltaje.
V	Unidad de voltaje –Volts-.
$\Omega$	Unidad de resistencia eléctrica –ohm-



# CAPÍTULO 1

## INTRODUCCIÓN.

### 1.1 Introducción.

Desde el inicio de la explotación racional de la energía eléctrica, los sistemas eléctricos han estado expuestos a sufrir algún tipo de anomalía o falla en su funcionamiento normal. En este contexto, un sistema eléctrico es considerado como toda aquella planta requerida para generar, transmitir y distribuir energía eléctrica, es decir, generadores, transformadores, líneas de transmisión y distribución, circuitos de interconexión, transductores, etc. [1,2].

El propósito de los sistemas de protección es minimizar los efectos de las fallas en los sistemas eléctricos, las cuales desafortunadamente nunca pueden ser completamente evitadas. Los agentes atmosféricos, el deterioro de materiales y los errores humanos son las causas más habituales que producen las anomalías o fallas en los sistemas eléctricos [3]. Además de la mala calidad del servicio, los daños pueden extenderse a personas y materiales, tanto de manera directa por la propia energía eléctrica, como indirecta a través del deficiente funcionamiento en los equipos eléctricos que son alimentados. Las fallas se manifiestan como una alteración, de los valores deseables en las magnitudes de las tensiones y corrientes suministradas en algún punto del sistema eléctrico [4].

La magnitud del daño que puede causar una falla, depende principalmente de su tiempo de duración, por lo tanto, se requiere que los dispositivos de protección operen tan rápido como sea posible y además en coordinación con otros esquemas de protección. Sin embargo, los

dispositivos de protección deben operar de manera selectiva, desconectando sólo aquellos elementos o parte del sistema que ha experimentado alguna anomalía o falla. Además, estos dispositivos deben operar de manera confiable, es decir que operen correctamente cuando se requieran [5, 6, 7].

## **1.2 Objetivo de la tesis.**

Analizar la operación de las protecciones de sobrecorriente en redes de distribución en condiciones de falla y/o con presencia de distorsión armónica, para determinar y proponer cuando sea necesario nuevos ajustes, que proporcionen una coordinación adecuada en los esquemas de protección de sobrecorriente. Este tipo de evaluación se llevará a cabo para aquellos dispositivos de protección de sobrecorriente que carecen de algoritmos de filtrado o filtros pasivos en las señales de entrada.

## **1.3 Planteamiento del problema.**

El desarrollo tecnológico en el área de la electrónica de potencia ha provisto a los usuarios de más y nuevos dispositivos electrónicos, estos dispositivos representan cargas no lineales en los sistemas eléctricos, principalmente conectadas en las redes de distribución [8, 9, 10, 11]. La electrónica de potencia ha permitido un uso más eficiente de la energía eléctrica y aumentos considerables en la productividad de los procesos industriales; pero por otra parte, ha provocado una situación no deseable de distorsión en las ondas senoidales de corriente y voltaje [8, 12, 13, 14, 15]. Por ejemplo, la alimentación de una carga no lineal que demanda una corriente con componentes armónicas, y que a su vez trae como consecuencia la distorsión de la forma de onda de la tensión. Estas características en las señales eléctricas tienen un impacto negativo para los usuarios, así como también en la operación de los esquemas de protección, ya que pueden modificar los tiempos de operación y la pérdida de coordinación de los dispositivos de protección de sobrecorriente, debido a que estos dispositivos fueron diseñados para señales de corriente o voltaje son forma de onda puramente senoidal [16, 17, 18, 19, 20, 21, 22]. Esta diferencia en tiempo de operación resulta porque los dispositivos de protección son ajustados y coordinados suponiendo que las señales de entrada son senoidales y a la frecuencia fundamental del sistema, es decir, sin considerar la distorsión de la forma de onda [21, 22, 23].

#### **1.4 Justificación.**

Las protecciones de sobrecorriente de un sistema de distribución tienen como función detectar corrientes de falla en los elementos de la red, y enviar la señal de disparo cuando esta corriente esté por arriba de la corriente de arranque o de operación. La liberación de la corriente de falla debe hacerse lo más rápido posible, y en coordinación con todos los esquemas de protección, para minimizar daños en los equipos, a la red y a los usuarios.

En el caso de las protecciones de sobrecorriente, los ajustes de coordinación están basados en el análisis de los sistemas de distribución en condiciones de operación con voltajes y corrientes puramente senoidales, y cargas lineales [13, 22]. Sin embargo, la forma de las ondas de la corriente y tensión son distorsionadas debido a las cargas no lineales [8, 12, 13, 14, 15]. Entonces, la coordinación de las protecciones de sobrecorriente resultante no será la esperada, ocasionando que una falla dada no sea liberada en el tiempo esperado, y se pierda la coordinación de los esquemas de protección.

Aunque, en la actualidad existen dispositivos electrónicos de sobrecorriente que incluyen algún algoritmo de filtrado o filtros pasivos; en la protección de redes de distribución, existen dispositivos que determinan el valor rms, ya sean electromecánicos, analógicos o microprocesados [23], y elementos fusibles, los cuales son vulnerables a la presencia de componentes armónicos.

De acuerdo a lo descrito anteriormente, se visualiza la necesidad de realizar un análisis y evaluación de la operación de los dispositivos de protección de sobrecorriente que no tienen algún algoritmo de filtrado o filtros pasivos, con la intención de proporcionar una coordinación adecuada, en función de la calidad de la energía eléctrica presente en las redes de distribución.

#### **1.5 Estado del arte.**

Debido a que la mayoría de los sistemas eléctricos fueron construidos y diseñados para trabajar con cargas lineales y fuentes de generación senoidales [13, 22], los dispositivos de protección, en general, han sido ajustados en función de las señales fundamentales de voltaje y corriente [15, 24, 21]. De tal manera, que un exceso de cargas no lineales conectadas a los sistemas eléctricos



pueden producir serios problemas en los elementos que integran al sistema eléctrico, por ejemplo: sobrecalentamiento de conductores o transformadores, fallas en los bancos de capacitores, indeterminación en los tiempos de apertura de los interruptores, disparos indeterminados de los relevadores, apertura de fusibles por sobrecalentamiento o efecto piel [22], y en general mal funcionamiento de equipo electrónico (incluyendo a los relevadores microprocesados) [16, 17, 25, 26]. Sin embargo, las cargas no lineales conectadas en el sistema eléctrico, no sólo distorsionan las señales de corriente y voltaje en estado estable o nominal, sino que también lo hacen durante las condiciones de falla [27].

Las corrientes no senoidales se pueden generar principalmente por tres causas: 1) generación de voltaje no senoidal, 2) Dispositivos no lineales empleados en la transportación de la energía eléctrica y 3) cargas no lineales. En la actualidad existe una gran diversidad de cargas no lineales conectadas a los sistemas de distribución, por ejemplo: fuentes conmutadas de voltaje (AC-DC, DC-AC, AC-AC) [10, 28, 29], alumbrado fluorescente [9, 30], controladores de velocidad para motores [8], etc.

La distorsión en la forma de onda de los voltajes y corrientes en los sistemas de distribución es de una magnitud considerable, sin embargo, en los sistemas de transmisión, la distorsión es mínima, y la forma de onda de los voltajes y corrientes es muy cercana a la senoidal [13].

### **1.5.1 Protección de los sistemas eléctricos.**

Los elementos fusibles fueron los primeros dispositivos empleados para proveer protección a los sistemas eléctricos, y en la actualidad se continúan empleando. La aplicación de estos dispositivos de protección es efectiva y económica, sin embargo presentan desventajas (responden sólo a la magnitud de la corriente que los atraviesa, y no la dirección de esta, necesitan ser reemplazados cada vez que estos operan) las cuales los hacen ineficientes en algunos esquemas de protección [31, 32].

Otro dispositivo empleado para proveer protección a los sistemas eléctricos, es el relevador. El relevador de protección, también llamado relé, es un dispositivo automático destinado a provocar un cambio brusco en los sistemas eléctricos por él controlados (como regla, en los circuitos

eléctricos de mando o señalización) para valores dados de las señales de entrada, que caracterizan determinados fenómenos externos. Por lo general, los relevadores utilizados en protección tienen señales eléctricas de entrada (véase la figura 1.5.1), y se denominan relevadores eléctricos. De lo anterior, se deduce que la función de los relevadores de protección es la de transformar las señales eléctricas de entrada (generalmente de naturaleza analógica) en señales discretas de salida, que actúan sobre determinados sistemas controlados (que provocan la desconexión del elemento del sistema protegido por acción de los interruptores u originan señales de alarma) [33].

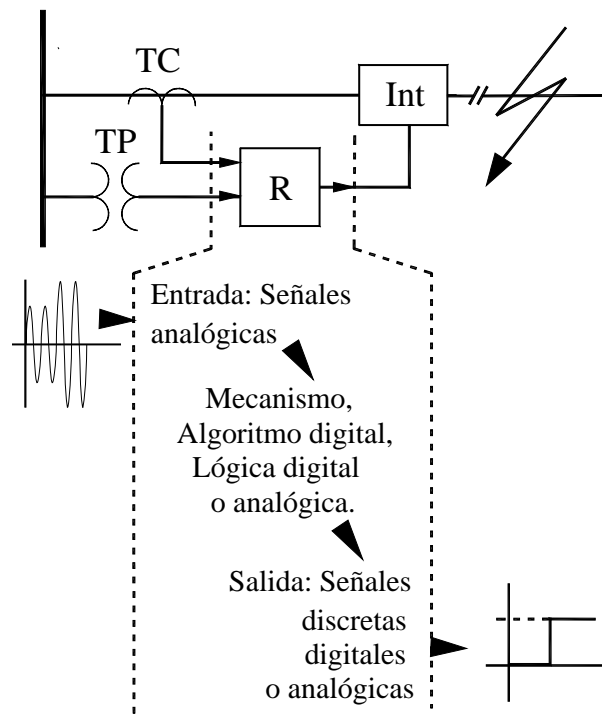


Figura 1.5.1. Esquema típico de conexión de un relevador en los sistemas eléctricos.

El desarrollo de los relevadores electromecánicos trajo significantes mejoras en la protección de sistemas de potencia, ya que estos relevadores proveen medios para controlar los tiempos de operación y habilidad para el recierre de circuitos. Estas características mejoraron la sensibilidad y selectividad de los esquemas de protección. Actualmente, un gran número de relevadores electromecánicos aún se encuentran en operación [2].

Los relevadores de estado sólido o también llamados analógicos se introdujeron en los años 50`s, inicialmente no eran aceptados por los ingenieros de protección debido a su baja confiabilidad, ya que los diseños eran inadecuados y los componentes electrónicos empleados tenían un alto índice de falla. Avances recientes en el área de los semiconductores, han permitido desarrollar

elementos electrónicos e implementarlos de manera más eficiente en los relevadores microprocesados. Estos avances permitieron el desarrollo de los relevadores digitales [2].

Actualmente, además de los relevadores electromecánicos instalados en los sistemas de distribución, se encuentran, aunque en menor cantidad, instalados relevadores microprocesados, los cuales brindan ventajas y ciertas funciones que son de gran ayuda para el ingeniero de protección. Estos relevadores de nueva generación se coordinan más fácilmente con otros relevadores de otra tecnología, tienen la capacidad de guardar en su memoria una cierta cantidad de ciclos de pre-falla y post-falla (reporte de eventos), se pueden ajustar en laboratorio y probar antes de instalarlos en línea, brindan la certeza de que los ajustes no cambiarán, por lo tanto están libres de mantenimiento predictivo, etc [34, 35, 36, 37, 38, 39].

En la actualidad la tecnología de los microcontroladores también se aplica a otros elementos de protección, como los restauradores y seccionalizadores, los cuales en conjunto con los relevadores y los fusibles integran los esquemas de protección de sobrecorriente en los sistemas de distribución [31].

Los diferentes métodos de estimación de la magnitud de la corriente en los dispositivos de protección se anexan en el apéndice A.

## **1.6 Aportaciones de la Tesis.**

Las aportaciones más sobresalientes en el desarrollo de éste trabajo de tesis son:

- Se crearon cuatro módulos en PSCAD/EMTDC que simulan la operación de los dispositivos de protección de sobrecorriente empleados en las redes de distribución. Los módulos son: módulo Fusible, módulo Relevadores 50/51, módulo Restaurador y módulo Seccionalizador.
- La creación de los módulos de protección permitirá su aplicación didáctica y/o de investigación en esquemas de protección de sobrecorriente.
- Se crearon módulos que distorsionan las señales de las corrientes en los sistemas eléctricos de prueba, estos tienen la finalidad de simular la conexión de cargas no-lineales.
- Se analizó y evaluó la operación de los módulos de protección en diferentes condiciones de carga y falla, de características lineales y no-lineales.

- Se desarrolló un programa en matlab, el cual facilita el análisis gráfico de los datos obtenidos de las simulaciones en PSCAD/EMTDC.

### 1.7 Estructura de la tesis.

A continuación se describe brevemente la estructura y el contenido de cada uno de los capítulos que integran a este trabajo de tesis:

- En el **Capítulo 1**, se da una introducción general al tema de la tesis, describiendo el objetivo general, planteando el problema que se aborda y la justificando de éste trabajo de tesis. En éste mismo capítulo, se describe brevemente el estado del arte referente a la problemática que enfrentan las protecciones sobrecorriente en los sistemas eléctricos, cuando las señales de corriente están distorsionadas. Además, se describe de manera general el concepto y el papel de las protecciones de sobrecorriente en los sistemas eléctricos, así como su desarrollo tecnológico al paso de los años
- En el **Capítulo 2**, se describe la función de los dispositivos de protección de sobrecorriente en la operación de los sistemas eléctricos en general, asimismo como los requisitos que debe cumplir ésta para proveer una protección adecuada y se garantice la continuidad del suministro de energía eléctrica al usuario en condiciones normales de operación y para contingencias en los sistemas eléctricos. También se describe el principio de operación de los dispositivos de protección de sobrecorriente empleados en las redes de distribución, y su aplicación conjunta en esquemas de protección que permiten optimizar el suministro de energía eléctrica cuando ocurren fallas o condiciones anormales de operación en las redes eléctricas de distribución.
- En el **Capítulo 3**, se detalla la lógica de operación de los módulos de protección, los cuales fueron construidos para simular la operación de los dispositivos de protección de sobrecorriente empleados en redes de distribución. Además, se evalúa y analiza la operación de cada uno de los módulos de protección en condiciones de carga nominal, y para diferentes condiciones de falla. Finalmente, se coordinan, evalúan y analizan los

---

cuatro módulos de protección en un esquema típico de protección de sobrecorriente, el cual provee protección a un esquema de prueba.

- En el **Capítulo 4**, se evalúa la operación de los dispositivos de protección modelados en el capítulo tres, los ajustes para la coordinación de estos dispositivos se realiza en primera instancia considerando condiciones de carga y falla lineal. Después de validar la operación de los dispositivos de protección con los ajustes realizados, se evalúa nuevamente su operación, pero ahora en condiciones de corrientes distorsionadas, es decir con carga y/o falla no lineal, además en algunos casos se simula la variación del régimen nominal de carga. En la última parte de éste capítulo, se evalúan los resultados de las simulaciones realizadas, y se proponen nuevos ajustes, los cuales proporcionan una coordinación adecuada.
- En el **Capítulo 5**, se presentan las principales conclusiones que se obtuvieron durante el desarrollo de éste trabajo de tesis. Se anexan recomendaciones para trabajos futuros de investigación que pretendan seguir y continuar en ésta línea de investigación.

## CAPÍTULO 2

### PROTECCIÓN DE SOBRECORRIENTE EN REDES DE DISTRIBUCIÓN.

#### 2.1 Introducción.

Las protecciones de sobrecorriente están diseñadas para operar cuando la magnitud de la corriente del elemento protegido supera un valor predeterminado (corriente de arranque o de operación). Los valores anormales de corriente, pueden ser provocados por sobrecargas en el sistema o por algún tipo de falla (cortocircuito). Los valores excesivos de corriente deben liberarse lo más rápido posible, con el propósito de evitar daños en los elementos del sistema, afectar la calidad de la energía y disminuir interrupciones de servicio a los usuarios.

En los sistemas eléctricos de distribución la protección por sobrecorriente incluye dispositivos como son: fusibles, seccionalizadores, restauradores, relevadores y sus respectivos interruptores. Estos dispositivos carecen de direccionalidad, lo cual restringe su aplicación a sistemas radiales, en sistemas con ésta topología el flujo de potencia es unidireccional. Los sistemas eléctricos de distribución son generalmente radiales, por lo que constituyen el principal campo de aplicación de estos dispositivos. Una característica importante en estos sistemas es que la magnitud de la corriente de cortocircuito disminuye a medida que el punto de falla se aleja de la fuente de generación o subestación. Así, la selectividad de la protección de sobrecorriente puede lograrse usando el criterio de nivel de corriente [33, 41].

## 2.2 Función de la protección.

En la operación de los sistemas eléctricos de potencia pueden ocurrir fallas y regímenes anormales en sus distintos elementos, lo que puede provocar averías en éstos, consecuentemente la alteración del régimen normal de operación del sistema o de sus elementos. Y en consecuencia, interrupciones del servicio a los usuarios, reducción de la calidad de la energía y/o daños en los equipos.

El cortocircuito es el tipo más frecuente y peligroso de falla, ya que origina que fluyan magnitudes muy altas de corriente por los elementos, produciéndose un abatimiento en los niveles de voltaje de algunos elementos del sistema. Esto puede dañar a los elementos y equipos por sobrecalentamiento, y afectar la operación normal de los usuarios, debido a los niveles bajos de voltaje. La sobrecarga es uno de los regímenes anormales más frecuentes, originando que magnitudes de corrientes superiores a las nominales circulen en el sistema, provocando calentamiento excesivo y posible daño de los equipos y/o elementos.

La función principal de la protección es provocar la desconexión automática del elemento del sistema que ha experimentado una falla o régimen anormal de operación, con el objetivo de reducir los daños de ese elemento y evitar así, que afecte la operación normal del resto del sistema. La protección es una de las partes fundamentales del sistema de automatización contra averías del sistema eléctrico, ya que sin ella no sería posible la operación continua de los sistemas eléctricos.

Una segunda función de la protección es dar información sobre el tipo y localización de la falla o régimen anormal que ha ocurrido, con el objetivo de facilitar al personal de servicio una localización rápida, y consecuentemente la eliminación de la causa que provocó la falla [32, 33].

Es importante remarcar que el término protección no indica o implica que el equipo de protección pueda prevenir los problemas. Los dispositivos de protección sólo operan después de que ha ocurrido la falla o régimen anormal. Así, el término protección no indica prevención, sino más bien, minimizar la duración de la falla o régimen anormal, y el tiempo fuera de servicio del elemento o elementos involucrados del sistema [4, 32, 33].

## **2.3 Requisitos de la protección.**

### **2.3.1 Confiabilidad.**

El daño causado por las fallas o regímenes anormales que experimenta un sistema eléctrico se debe principalmente a la magnitud de éstas, más no tanto así de su incidencia. De tal manera, que los dispositivos de protección estarán generalmente en estado de reposo o en vigilancia, y actuarán en tiempos muy cortos, sólo cuando las condiciones del sistema lo requieran. Así, el primer requisito fundamental es la confiabilidad [33, 41]. La confiabilidad se define como la probabilidad de que la protección operará correctamente cuando ésta se requiera. Consiste de dos aspectos: 1) Dependabilidad, es la certeza de una operación correcta cuando ocurra una falla, 2) Seguridad, ésta es la habilidad para evitar operaciones incorrectas durante una falla [4, 7].

### **2.3.2 Selectividad.**

Un requisito importante de un sistema o esquema de protección es la selectividad, que es la habilidad de lograr la desconexión efectiva de sólo aquel elemento o sección del sistema que ha experimentado una falla o régimen anormal, y de esta manera, mantener la continuidad del servicio de suministro eléctrico. Una práctica común para garantizar la selectividad es dividir el sistema eléctrico en zonas de operación, las cuales puedan ser individualmente protegidas y desconectadas en presencia de una falla o régimen anormal, con la finalidad de permitir que el resto del sistema continúe en operación.

En general un sistema de potencia puede ser dividido en zonas de protección, éstas corresponden al: generador, transformador, grupos generador-transformador, motores, barras y líneas. La figura 2.3.1 muestra un sistema con sus diferentes zonas de protección. Se debe notar que las zonas traslapadas en algunos puntos indican que sí una falla ocurre en éste traslape de área, más de un esquema de protección operará [4, 7].

### **2.3.3 Velocidad.**

El segundo requisito fundamental de los dispositivos de protección es la velocidad. La falla o régimen anormal debe eliminarse en el menor tiempo posible, para evitar o disminuir daños a los



elementos o equipos en el sistema, previniendo posibles perturbaciones en otras partes del mismo. De esta manera, se evitan condiciones que involucren la operación de más protecciones, y por lo tanto, se evita la desconexión de más elementos en el sistema.

Zonas de protección:

- 1 Generadores
- 2 Transformadores
- 3 Generador-transformador
- 4 Motor
- 5 Barras
- 6 Líneas de transmisión o distribución.

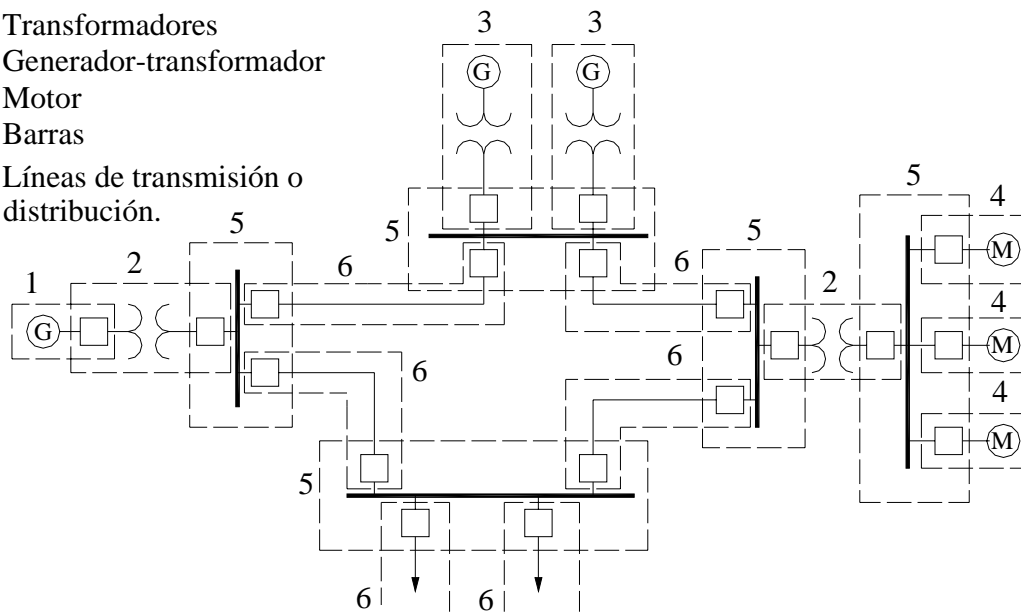


Figura 2.3.1. Un sistema eléctrico típico y sus respectivas zonas de protección.

### 2.3.3.1 Protección primaria y de respaldo.

Todos los elementos de un sistema eléctrico deben protegerse correctamente para que las protecciones operen siempre que ocurra una falla o régimen anormal. Un sistema de protección puede fallar, y en consecuencia no logran la desconexión de aquel elemento o sección del sistema que ha experimentado una falla o régimen anormal. Debido a esto es indispensable contar con una protección alterna o de respaldo que garantice la desconexión.

Algunos relevadores sólo operan para fallas que se presentan dentro de su zona de protección; a ésta se le llama protección unitaria. Por otra parte, otros relevadores son capaces de detectar fallas dentro de su zona de protección y fuera de ella, usualmente en zonas de protección adyacentes, y puede ser usada para brindar protección de respaldo a la protección primaria. Esto es esencial para que cualquier falla sea aislada, incluso sí la protección primaria asociada no opera. Por lo

tanto, cualquier sistema eléctrico debe contar con al menos una protección primaria y una de respaldo.

- La protección primaria debe operar lo más rápido posible, y desconectar la menor cantidad de elementos del sistema cada vez que ésta detecte una falla o régimen anormal. Además, ésta cubre una zona de protección compuesta de uno o más elementos del sistema eléctrico, como: motores, generadores, líneas, barras, etc. Es posible en los sistemas eléctricos de potencia tener varios dispositivos como protección primaria. Sin embargo, esto no implica que todos los dispositivos operen para la misma falla [4].
- Las protecciones de respaldo generalmente operan más lentamente, desconectando más elementos del sistema. Éstas son instaladas para que opere cuando por cualquier razón la protección primaria no pueda liberar la condición de falla. Para lograr esto, la protección de respaldo puede ser de diferente fabricante, para eliminar la probabilidad de que ésta falle por la misma causa que falló la protección primaria. Generalmente, la protección de respaldo opera con un retraso de tiempo para permitir la operación de la protección primaria. También es común que un mismo relevador puede proveer protección de respaldo simultáneamente a diferentes elementos del sistema. Generalmente, un relevador actúa como protección primaria para un elemento del sistema y como protección de respaldo para otros elementos del sistema.

#### **2.3.4 Simplicidad.**

Un sistema de protección como cualquier otra disciplina de la ingeniería, debe buscar la simplicidad como muestra de un buen diseño. Sin embargo, no siempre un sistema de protección más simple o menos complejo es el más económico. La confiabilidad puede ser mejorada con el diseño simplificado de un sistema de protección, puesto que disminuyen el número de elementos que pueden fallar en su funcionamiento [7].

### 2.3.5 Costo.

Es ideal obtener un esquema que ofrezca la máxima protección al menor precio posible, sin embargo, esto deteriora la confiabilidad del esquema o sistema de protección, sin contar las dificultades que puedan presentarse en el momento de su instalación y operación, y además los altos costos de mantenimiento implicados. Realmente, para justificar el costo de la protección es necesario considerar el costo e importancia del equipo que se protegerá, así como evaluar el costo que implique la desconexión de elementos o equipos por una acción incorrecta de la protección.

### 2.4 Principio de operación de la protección de sobrecorriente.

Se denominan protecciones de sobrecorriente a aquellas con selectividad relativa que responden a la corriente del elemento protegido y que operan cuando esa corriente es mayor que cierto valor preestablecido (corriente de arranque: mínima corriente en el relevador para la cual éste opera). Esta protección, por lo general se dispone de modo que cada protección, sea primaria para la línea donde está instalada y protección de respaldo para la o las líneas remotas [7, 33].

La selectividad de las protecciones de sobrecorriente puede lograrse por dos métodos posibles: por tiempo o por corriente. En el primer método, las protecciones primaria y de respaldo son sensibles al cortocircuito, pero tienen tiempos diferentes de operación; los tiempos de operación de las protecciones de respaldo son mayores que los de su protección primaria y en general, desconectan más elementos de la red. En el segundo método el alcance de cada protección se determina en base a la corriente; éste método, se fundamenta en el hecho de que en sistemas radiales el valor de la corriente de cortocircuito disminuye a medida que la falla se aleja de la fuente de generación, ver figura 2.4.1.

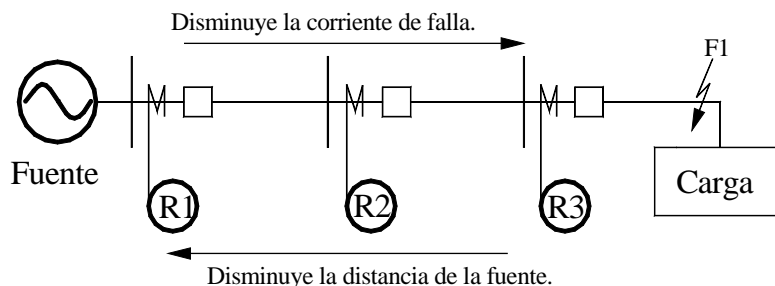


Figura 2.4.1. Proporción de la corriente de falla según la distancia de la fuente.

## 2.5 Dispositivos para protección de sobrecorriente en redes de distribución.

### 2.5.1 Fusible.

El fusible es el más simple de los dispositivos de protección para sobrecorriente. Es un elemento constituido de una aleación metálica, el cuál se funde cuando un valor predeterminado de corriente pasa a través de él. Estos dispositivos se instalan en serie, y se deben seleccionar apropiadamente para que soporten el paso ininterrumpido de la corriente nominal de carga. Si algún elemento o segmento del sistema experimenta alguna falla o régimen anormal, aumentará la magnitud de la corriente que pasa a través del fusible, y consecuentemente, éste se fundirá, provocando la desconexión del elemento fallado [31].

La mayoría de los fusibles usados en los sistemas de distribución operan bajo el principio de expulsión. El elemento fusible se instala dentro de un tubo. El tubo contiene una cubierta interior de fibra des-ionizante, y en presencia de falla, la cubierta interior del tubo se quema, produciendo gases des-ionizantes, los cuales se acumulan en el interior del tubo. El arco eléctrico, producido por la apertura (destrucción) del fusible, es confinado en el tubo, y después es expulsado. La expulsión de los gases por los extremos del tubo, asegura la completa extinción del arco. De esta manera, el arco es extinguido cuando el valor de la corriente cruza por cero. La presencia de los gases des-ionizantes, y la turbulencia en el interior del tubo, aseguran que el arco producido por la corriente de falla, no se reestablezca después que el valor de la corriente crucé por cero.

La zona de operación de los fusibles está limitada por dos curvas: *curva inferior*, ésta es estimada, a partir del tiempo mínimo requerido para provocar la fundición del elemento fusible (**T<sub>m</sub>**) y *curva superior*, determinada por el tiempo total máximo requerido por el fusible para liberar la falla (**T<sub>M</sub>**). En la figura 2.5.1 se observa la curva característica tiempo-corriente para un fusible [40].

El tiempo mínimo de fundición es importante cuando el fusible respalda o sobre alcanza otro dispositivo. El dispositivo de protección instalado aguas abajo (hacia la carga), debe liberar la falla antes de producir daños térmicos al fusible [32].

Los fusibles se pueden clasificar de acuerdo a estándares, principalmente en función de su rango de voltaje, rango de corriente y característica tiempo-corriente. Así, por ejemplo, existen varias secciones de estándares en ANSI/UL 198-1982, los cuales aplican para fusibles con niveles de voltaje inferiores a 600 V. Para fusibles de nivel de voltaje medio y alto (2.3-138 kV), se aplican los estándares como ANSI/IEEE C37, 40, 41, 42, 46, 47 y 48. Realmente, cada organización o país cuenta con sus propios estándares, además, los fabricantes de fusibles tienen su propia clasificación y designación [32].

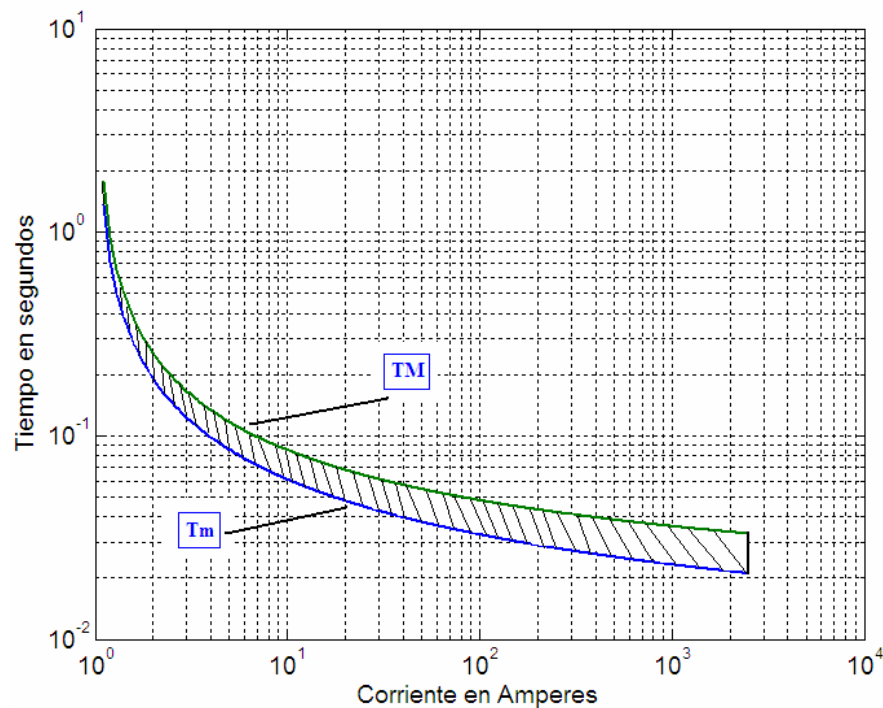


Figura 2.5.1. Curvas características tiempo-corriente para un fusible.

Los siguientes factores deben ser considerados para la selección apropiada de un fusible:

- Nivel de voltaje.
- Tipo de sistema.
- Máximo nivel de corto circuito.
- Corriente de carga.

Los cuatro puntos anteriores determinan la corriente nominal y la capacidad interruptiva de corto circuito del fusible.

### 2.5.2 Relevadores de sobrecorriente.

Basándose en las mismas características de operación, los relevadores de sobrecorriente pueden ser clasificados en tres grupos: de corriente definida, de tiempo definido y de tiempo inverso. Las curvas características de éstos tres tipos se muestran a continuación en la figura 2.5.2.

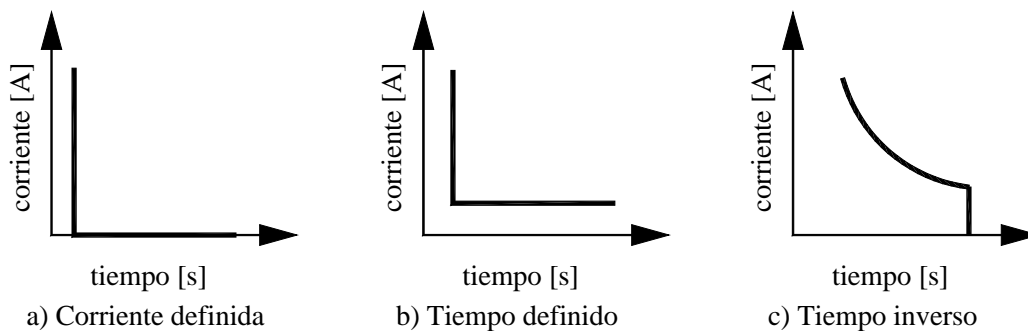


Figura 2.5.2. Tipos de relevadores de sobrecorriente.

*Corriente definida:* Este tipo de relevador instantáneamente opera cuando la corriente alcanza un valor predeterminado [33].

*Tiempo definido:* La variante más utilizada de esta protección es la que tiene dos o tres escalones o zonas con diferentes tiempos de operación, donde el primero de éstos es instantáneo [40].

*Tiempo inverso:* En los relevadores de tiempo inverso, el tiempo de operación lo determina la magnitud de la corriente medida. En la figura 2.5.3, se ilustra un relevador electromecánico de sobrecorriente de tiempo inverso, la característica inversa de tiempo, se obtiene mediante el recorrido de un disco de inducción. El ángulo de rotación del disco, depende de la magnitud de la corriente  $I$  y del tiempo de aplicación de  $I$  [42, 43, 1a].

El muelle (figura 2.5.3) se opone a la rotación positiva del disco. Cuando el torque inducido por  $I$  en el disco, es igual al producido por el muelle, el torque total es cero, y el disco no gira. Cuando la magnitud de  $I$  aumenta, el torque inducido logra vencer al muelle. Sí la magnitud de  $I$  persiste

durante el tiempo suficiente, el disco girará hasta lograr que los contactos se cierren, generándose la señal de disparo para el interruptor. El tiempo de operación para una misma magnitud de corriente, se puede modificar ajustando la palanca de tiempo (dial de tiempo), es decir, moviendo el contacto fijo. Mover el contacto fijo a una posición superior, implica que el ángulo de rotación del disco deberá ser mayor, por lo tanto, habrá un incremento en el tiempo de operación. Sí la magnitud de  $I$  decrece, el disco retornará a su posición inicial. El tiempo en el que el disco se reposiciona, depende principalmente de la fuerza del muelle, la magnitud de  $I$  y del campo magnético de amortiguamiento [1a].

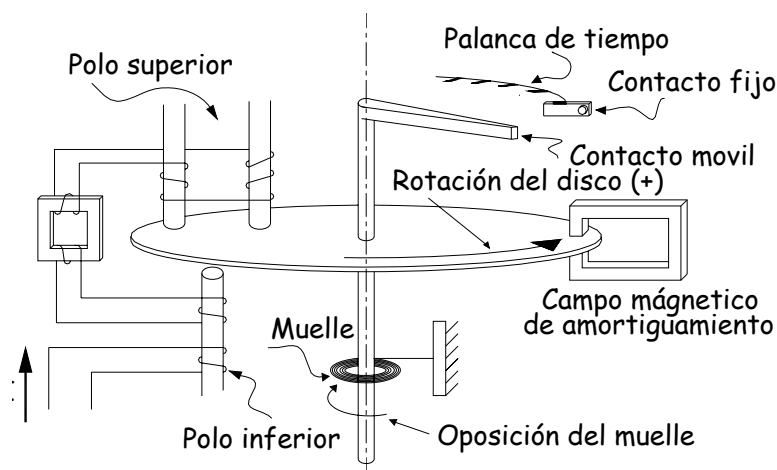


Figura 2.5.3. Relevador electromecánico (disco de inducción) de sobrecorriente de tiempo inverso.

La principal ventaja que ofrece un relevador de tiempo inverso es que éstos operan en un tiempo inversamente proporcional a la magnitud de la corriente de falla, como se puede observar en la figura 2.5.2 (c). La ventaja con respecto al relevador de tiempo definido es que para muy altas corrientes, se puede obtener un tiempo mucho más corto de disparo, sin arriesgar la selectividad de la protección, por ejemplo, cuando la sobrecorriente es de naturaleza transitoria, como la causada por el arranque de un motor o algunas sobrecargas súbitas de duración breve, el relevador no debe operar. El relevador de tiempo inverso tiene un tiempo de retraso inherente que permite una corriente mayor a la *corriente de arranque* por algunos instantes, sin que el relevador opere [46]. Los relevadores de tiempo inverso están generalmente clasificados de acuerdo a sus curvas características (figura 2.5.4), las cuales indican la velocidad de operación. Así, por ejemplo, en la figura 2.5.4, se observan las curvas características para un relevador de sobrecorriente de tiempo inverso analógico de la marca SIEMENS Mod. 7SJ511: (a)

normalmente inversa, (b) muy inversa y (c) extremadamente inversa. Las curvas características se determinan de acuerdo a sus algoritmos normalizados en IEC 255 (ecuaciones 2.5.e1, 2.5.e2 y 2.5.e3) [45].

$$\text{top} = \frac{0.14}{\left(\frac{I}{IT_{ap}}\right)^{0.02} - 1} * \text{pt}; \quad \text{Normalmente inversa} \quad (2.5.e1)$$

$$\text{top} = \frac{13.5}{\left(\frac{I}{IT_{ap}}\right) - 1} * \text{pt}; \quad \text{Muy inversa} \quad (2.5.e2)$$

$$\text{top} = \frac{80}{\left(\frac{I}{IT_{ap}}\right)^2 - 1} * \text{pt}; \quad \text{Extremadamente inversa} \quad (2.5.e3)$$

donde:

$\text{top}$  = tiempo de operación [seg.]

$\text{pt}$  = palanca de tiempo.

$I$  = valor rms de la corriente en el secundario del TC.

$IT_{ap}$  =  $T_{ap}$  de arranque (valor rms) .

Básicamente, son dos los parámetros que se requieren para ajustar un relevador de sobrecorriente de tiempo inverso: Corriente de arranque ( **$IT_{ap}$** ) y palanca de tiempo ( **$\text{pt}$** ).

El relevador es ajustado con una magnitud de corriente de arranque ( **$IT_{ap}$** ), de manera que envíe una señal de disparo para cualquier falla o condición de régimen anormal que se presente en el elemento que esté protegiendo, y si es viable, proporcione protección de respaldo a elementos adyacentes [7].

El retraso de tiempo o palanca de tiempo ( **$\text{pt}$** ), es un parámetro independiente que se obtiene de la familia de curvas características disponibles en el relevador (figura 2.5.4).



Se recomienda en relevadores electromecánico que el múltiplo de corriente de arranque sea entre 3 y 4 para la corriente mínima de la falla que se desee liberar [7].

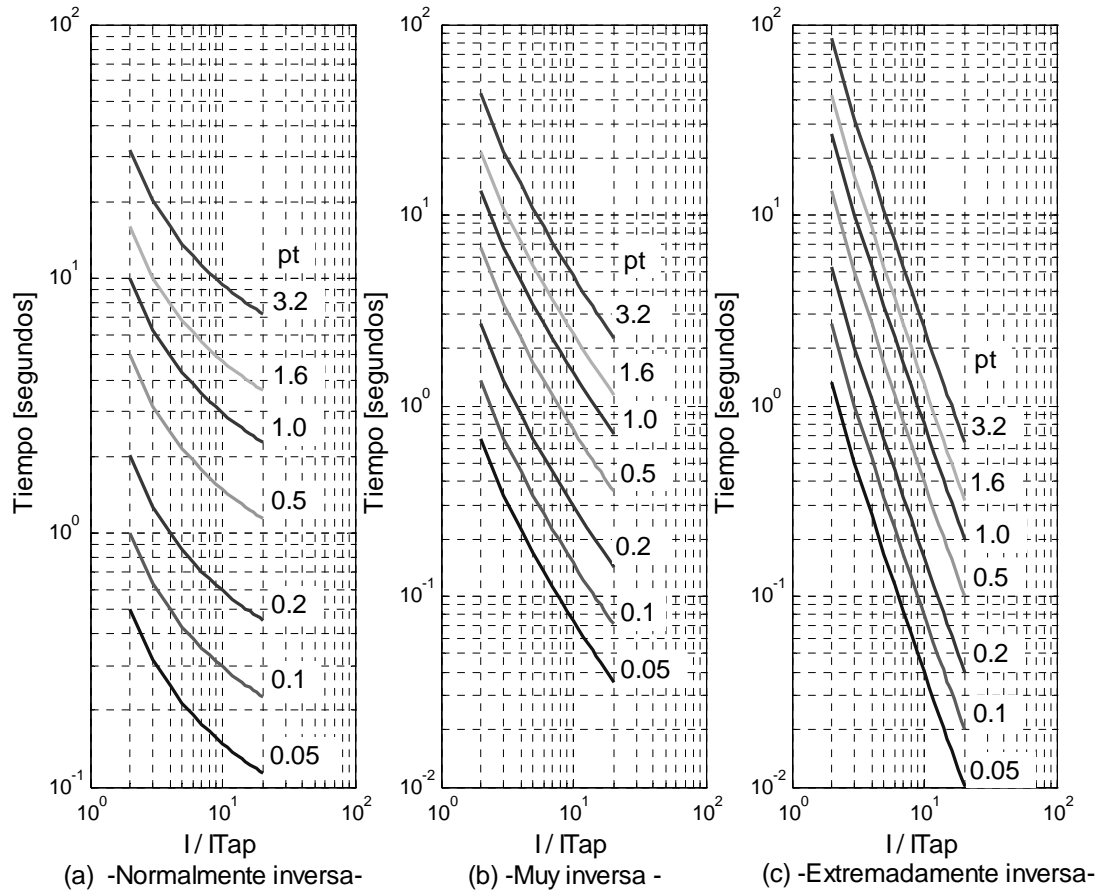


Figura 2.5.4. Curvas características para un relevador de sobrecorriente de tiempo inverso analógico de la marca SIEMENS Mod. 7SJ511.

El ajuste de la corriente de arranque para la protección de fallas entre fases se selecciona entre dos veces la corriente de carga máxima y un tercio de la corriente de falla mínima (usualmente será la correspondiente a una falla entre líneas con una configuración de red y generación reducida).

### 2.5.3 Restaurador automático.

Un restaurador automático es un dispositivo con la capacidad de detectar condiciones de sobrecorriente entre fases y entre fase-tierra, de tal manera que sí la magnitud de la sobrecorriente persiste después de un determinado tiempo, el restaurador operará, desconectando el segmento

del sistema que ha experimentado una falla o régimen anormal de operación, después de un tiempo definido, el restaurador efectuará el re-cierre automáticamente, re-energizando el segmento del sistema. Y sí después de un número predeterminado de operaciones de apertura/re-cierre la magnitud de la corriente en el elemento protegido persiste, el interruptor del restaurador permanecerá abierto. De esta manera, queda permanentemente desconectado el segmento fallado del resto del sistema eléctrico. Todos los restauradores tienen la capacidad de interrumpir corrientes de falla, para lo cual emplean interruptores de vacío, aceite o SF<sub>6</sub> (hexafluoruro de azufre) [40].

Debido a sus características de apertura/re-cierre automáticos, el restaurador permite garantizar a los usuarios la continuidad del servicio eléctrico, cuando se presentan fallas temporales. Los restauradores normalmente están programados para permitir tres operaciones de apertura/re-cierre y una última de apertura permanente. En la figura 2.5.5, se ilustra la secuencia de operación típica de un restaurador.

En los sistemas eléctricos de distribución, entre un 80% y 95% de las fallas son de naturaleza temporal, de éstas, la mayoría persisten durante pocos ciclos o segundos [32, 33, 40]. Para las fallas temporales, una o más operaciones rápidas del restaurador proporcionará el tiempo suficiente para des-ionizar el medio de falla, garantizando la continuidad del servicio eléctrico en la siguiente operación de re-cierre del restaurador. Para fallas permanentes, será necesaria, además de las operaciones rápidas, una operación retardada, la cual proporciona el tiempo suficiente para que libere la falla algún otro dispositivo de sobrecorriente instalado aguas abajo. Sí la magnitud de la sobrecorriente persiste aún después del último re-cierre, el restaurador abrirá de forma permanente sus contactos, desconectando así el elemento que ha experimentado una falla.

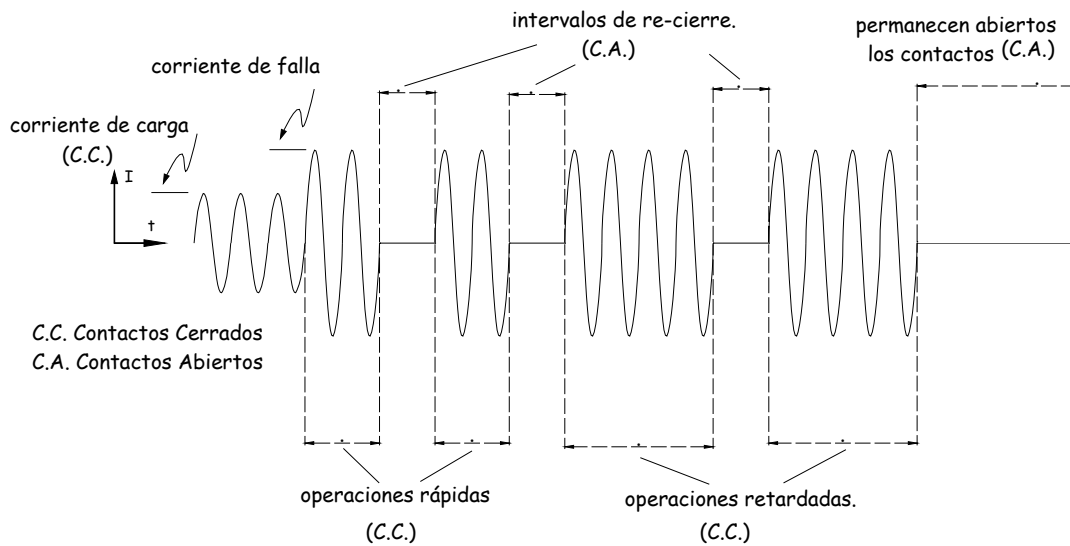


Figura 2.5.5. Secuencia típica de operación de un restaurador.

Los restauradores cuentan con curvas características de operación tiempo-corriente, lo que facilita su coordinación con otros dispositivos de sobrecorriente, como relevadores y fusibles. En la figura 2.5.6, se muestran las curvas características tiempo-corriente para un restaurador. La característica de operación tiempo-corriente de los restauradores, se puede seleccionar de una familia de curvas proporcionada por el fabricante. En muchos casos, el restaurador se programa para cuatro operaciones, en las cuales se incluyen dos operaciones rápidas (curva A) y dos operaciones retardadas (curva B ó C), esta secuencia de operación no necesita seccionador [31]. Realmente, se pueden programar otras secuencias de operación en el restaurador. En la figura 2.5.7, se ilustra la secuencia típica de un restaurador para fallas permanentes, para esta secuencia de operación es necesario coordinar el restaurador con un seccionador. La primera operación es rápida para liberar fallas temporales, las tres operaciones posteriores son retardadas para permitir que otros dispositivos desconecten el elemento fallado.

Existen restauradores monofásicos y trifásicos. Los restauradores monofásicos, son empleados cuando la carga es predominantemente monofásica. En estos casos, cuando ocurre una falla permanente monofásica, el restaurador desconecta la fase fallada, lo que garantiza el suministro de energía a las cargas conectadas en las otras fases. Los restauradores trifásicos, se emplean en

sistemas donde es necesario desconectar las tres fases, para prevenir el desbalance de cargas en el sistema eléctrico.

Los siguientes factores deben ser considerados para la selección de un restaurador:

- Voltaje del sistema.
- Nivel de corto circuito.
- Corriente de carga máxima.
- Corriente mínima de corto circuito.
- Coordinación con otros dispositivos de protección, instalados aguas arriba (entre la fuente o subestación y el restaurador), y aguas abajo (entre el restaurador y la carga).
- Sensibilidad de operación para fallas a tierra.

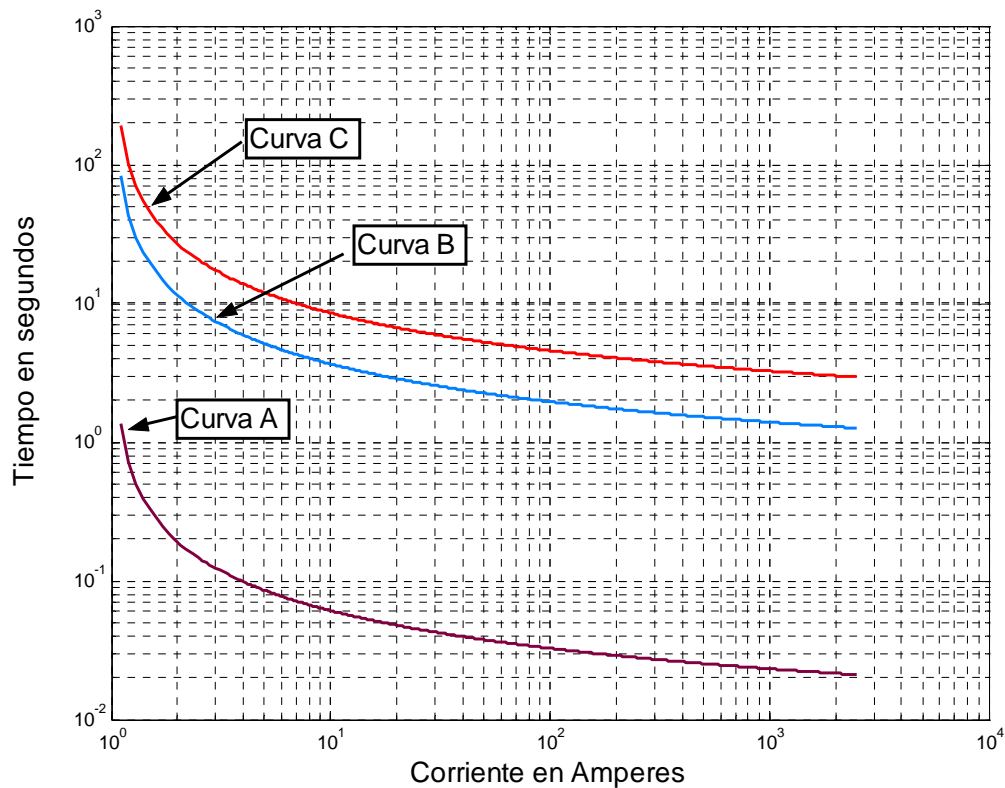


Figura 2.5.6. Curvas características de operación de un restaurador.

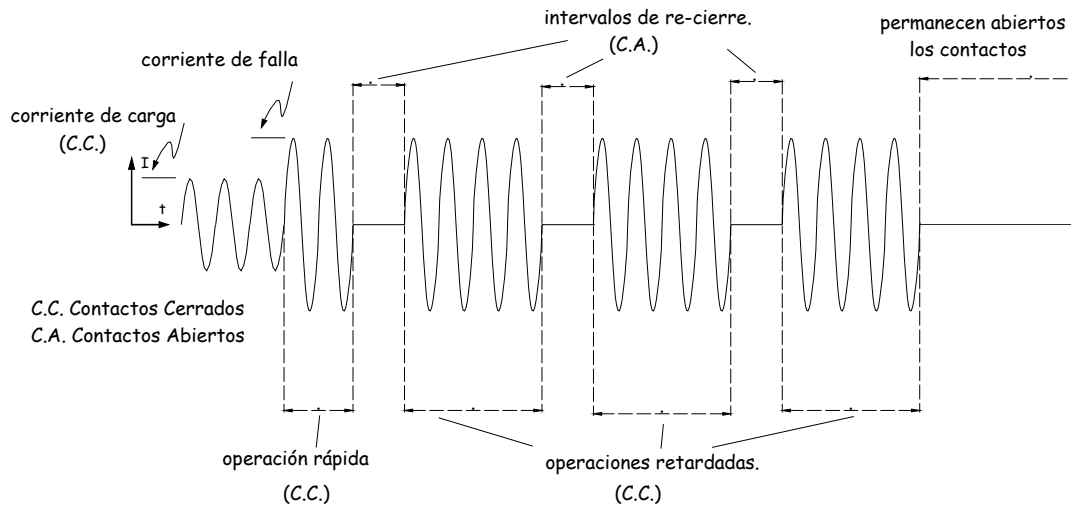


Figura 2.5.7. Secuencia típica de un restaurador para fallas permanentes (coordinación restaurador-seccionalizador)

La capacidad interruptiva y el voltaje del restaurador deben ser iguales, o mayores a los valores que existan en el punto de instalación. Además, debe tomarse en cuenta la magnitud de la corriente máxima de carga. Esto es necesario, para asegurar que la magnitud de la corriente de una falla al final de la línea será lo suficientemente alta como para producir la operación del restaurador [40].

#### 2.5.4 Seccionalizador automático.

El seccionalizador automático, llamado simplemente seccionalizador, es otro dispositivo comúnmente usado en los sistemas de distribución. La aplicación conjunta de estos dispositivos de protección en los sistemas de distribución optimiza los esquemas de protección. Un seccionalizador es un dispositivo que automáticamente desconecta aquellos elementos que han experimentado alguna falla, una vez que un restaurador o interruptor instalado aguas arriba (cerca de la generación) ha interrumpido la corriente de falla, y se instalan normalmente aguas abajo de un restaurador [40]. Así pues, el seccionalizador está diseñado para abrir el circuito mientras éste se encuentra desconectado de la fuente (des-energizado). La interrupción del circuito se realiza después que el seccionalizador ha detectado un número predeterminado de interrupciones

realizadas por el restaurador. Se fabrican seccionalizadores para disparo monopolar y tripolar. Estos dispositivos no cuentan con características de disparo tiempo-corriente.

El hecho que el seccionalizador no tenga la capacidad de interrumpir corrientes de falla, hace que el diseño del dispositivo sea más simple y económico. Esencialmente, el seccionalizador está constituido por un detector de fallas, un contador y un interruptor. Usualmente, los contactos del interruptor están inmersos en aceite, para soportar la interrupción de corrientes de carga. Esto permite emplear al seccionalizador como un interruptor manual.

Las fallas en las ramas de un sistema de distribución se pueden liberar usando en el esquema de protección un seccionalizador, de este modo, se evita la operación de la protección del alimentador principal.

En las figuras siguientes se ilustran dos aplicaciones de los seccionalizadores. En la figura 2.5.8, el restaurador **R** está programado para realizar dos operaciones rápidas y dos operaciones con retardo. Para una falla en **P**, el fusible **F** usualmente se fundirá en la tercera operación del restaurador, es decir, en la primer operación retardada. Sí el seccionalizador **S** está programado para operar en dos operaciones del restaurador, esto implica que antes de la tercera operación de **R**, la rama donde se encuentra la falla **P** ya estará desconectada del sistema. De esta manera, se asegura la continuidad del servicio eléctrico a las cargas instaladas antes del seccionalizador. En la figura 2.5.9, el restaurador **R** está programado para realizar una operación rápida y tres con retardo, permitiendo que el fusible libere la falla **P** en la segunda operación de **R** (primer operación retardada); para permitir esta secuencia de operaciones, es necesario programar al seccionalizador para que opere después de tres operaciones de **R** [31].

Otra aplicación de los seccionalizadores se ilustra en la figura 2.5.10. El restaurador **R** está programado para dos operaciones rápidas y dos retardadas, para una falla **P**, el seccionalizador **S3** operará después de la primer operación de **R**, desconectando el segmento del sistema donde se encuentra la falla **P**, permitiendo la continuidad del servicio eléctrico a las cargas conectadas antes de **S3**. Sí se presentará una falla entre **S2** y **S3**, entonces **S2** operará después de la segunda operación de **R**.

Los siguientes factores deben ser considerados para la selección de un seccionador:

- Voltaje del sistema.
- Máxima corriente de carga.
- Máximo nivel de cortocircuito.
- Coordinación con otros dispositivos de protección, instalados aguas arriba, y aguas abajo.

El voltaje y corriente nominal del seccionador, deben ser iguales o mayores que los valores de voltaje y corriente de carga máxima en el punto de instalación del seccionador.

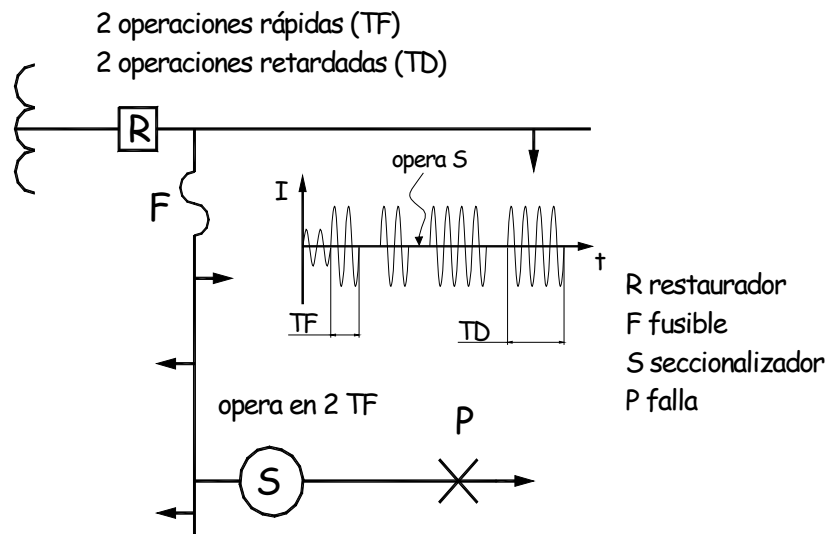


Figura 2.5.8. Aplicación de un seccionador, programado para que opere en dos operaciones del restaurador.

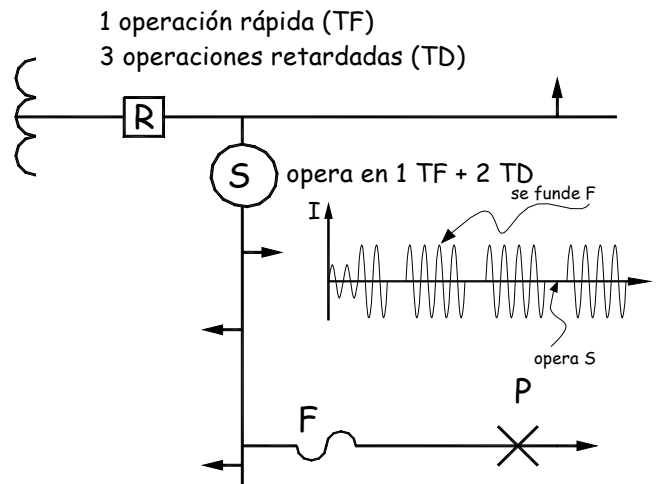


Figura 2.5.9. Aplicación de un seccionizador, programado para que opere en tres operaciones del restorador.

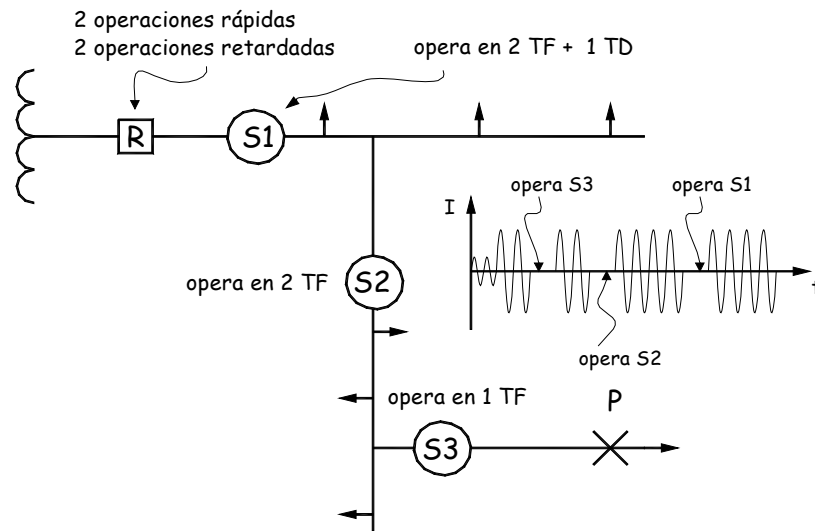


Figura 2.5.10. Esquema de protección usando un restorador **R** tres seccionizadores **S1**, **S2** y **S3**.





## CAPITULO 3

### MODELADO DE LOS DISPOSITIVOS DE SOBRECORRIENTE Y SU COORDINACIÓN.

#### 3.1 Introducción.

En la operación de las redes de distribución se pueden presentar fallas y/o regímenes anormales en sus elementos, lo que puede provocar averías en éstos, y consecuentemente la alteración del régimen normal de operación del sistema o de sus elementos. Además, las interrupciones del servicio eléctrico a los usuarios, reducción de la calidad de la energía y/o daños en los equipos.

La protección por sobrecorriente en las redes de distribución, incluye dispositivos como son: fusibles, relevadores, restauradores y seccionalizadores. La aplicación conjunta de estos dispositivos de protección en las redes de distribución, optimiza los esquemas de protección, garantizando a los usuarios un mejor servicio eléctrico aún en distintas condiciones de falla.

Para representar las características de operación de los dispositivos de sobrecorriente como son: los fusibles, relevadores de sobrecorriente (instantáneos y de tiempo inverso), restauradores y seccionalizadores, se construyeron módulos, empleando modelos y bloques contenidos en la biblioteca del software PSCAD/EMTDC. Estos módulos, se evaluaron de manera independiente y posteriormente de manera conjunta para evaluar su coordinación. Se simularon distintas condiciones de falla (tipo de falla, duración y ubicación) con la finalidad de evaluar y analizar la lógica de operación de los módulos.

### 3.2 Módulo fusibles.

Un fusible es un elemento construido con una aleación metálica, el cual permite el paso continuo de la corriente de carga, y se funde, para una magnitud de corriente predeterminada. Cuando ocurre alguna falla, la magnitud de la corriente que fluye por él se incrementa, provocando la fundición del elemento fusible, y consecuentemente la desconexión del elemento fallado. El tiempo total requerido por el fusible para liberar la falla, es inversamente proporcional a la magnitud de la corriente, como se puede observar en la figura 3.2.1.

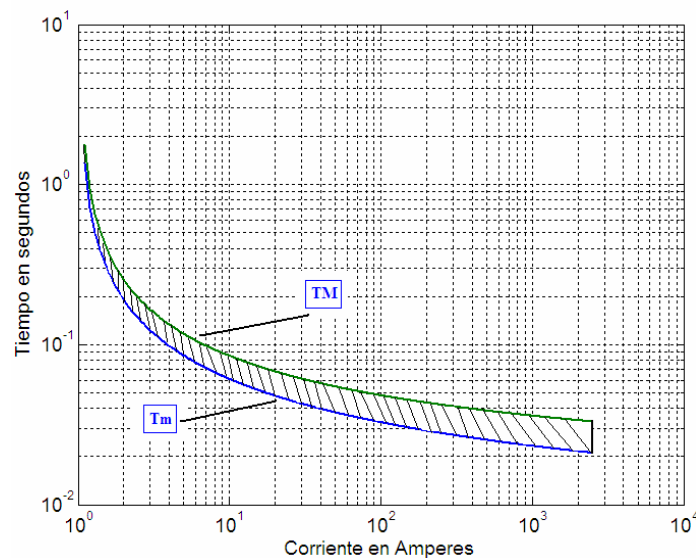


Figura 3.2.1. Curvas características tiempo-corriente para un fusible. (T<sub>m</sub>): Tiempo mínimo requerido para provocar la fundición del fusible. (T<sub>M</sub>): tiempo total máximo requerido por el fusible para liberar la falla.

#### 3.2.1 Construcción del módulo Fusible.

La curva superior del fusible **TM**, define el tiempo total requerido para la desconexión del elemento fallado. Esta curva característica, se simula con un relevador de sobrecorriente de tiempo inverso (**R-51**<sup>\*</sup>), el cual está disponible en la biblioteca de PSCAD/EMTDC.

Para realizar la desconexión del elemento fallado, se emplea un interruptor monofásico también disponible en la biblioteca de PSCAD/EMTDC. La señal emitida por el **R-51** es la señal de

\* Indica relevador de tiempo inverso.

entrada para el interruptor, así de esta manera para una magnitud de corriente predeterminada (en función de los ajustes en el **R-51**) el interruptor actuará como medio de desconexión.

En la figura 3.2.2, se observa el módulo construido para simular la característica de operación de un fusible de cruce por cero. La señal **IaE**, corresponde a la señal de corriente que entra al fusible, y la señal **IaS**, es la corriente que sale.

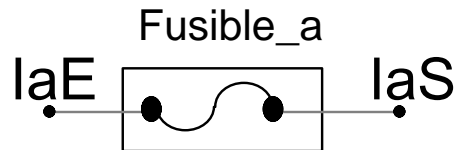


Figura 3.2.2. Módulo que simula la característica de operación de un fusible.

En la figura 3.2.3, se observa en detalle el contenido del módulo **Fusible\_a**. El nodo eléctrico **IaE**, ingresa al módulo la corriente que atraviesa al fusible y sale por el nodo eléctrico **IaS**. La corriente es medida por el ampermetro **I**. El bloque **RMS**, calcula el valor **rms** de la señal de corriente **I**. Dependiendo de los ajustes (**ITap\*** y **pt†**, en el **R-51**), y en función del valor **rms** medido, así como del tiempo que este valor persista, el bloque **R51** emitirá o no, una señal de disparo. La señal de disparo se sostiene por las compuertas lógicas “**Y**” y “**O**”; si control (**Ctrl**) habilita la salida, la señal de disparo **Fus** se envía hacia el interruptor **Int**. El interruptor monofásico está configurado para abrir sólo cuando la corriente pasa por cero, simulando la característica de operación de un fusible de cruce por cero.

### 3.2.2 Simulación y evaluación del módulo Fusible en diferentes condiciones de falla.

Para evaluar la operación del módulo **Fusible**, se modeló el sistema de prueba de la figura 3.2.4 en el PSCAD/EMTDC. Este mismo sistema de prueba, se emplea para evaluar la operación del módulo de **Rele 50/51** y el módulo del restaurador **R**. Los módulos de protección que son simulados tienen como función proveer protección al sistema de prueba de la figura 3.2.4, el cual

\* Corriente de arranque.

† Palanca de tiempo.

está diseñado para operar con una magnitud de 1 A-rms considerada como corriente máxima permitida.

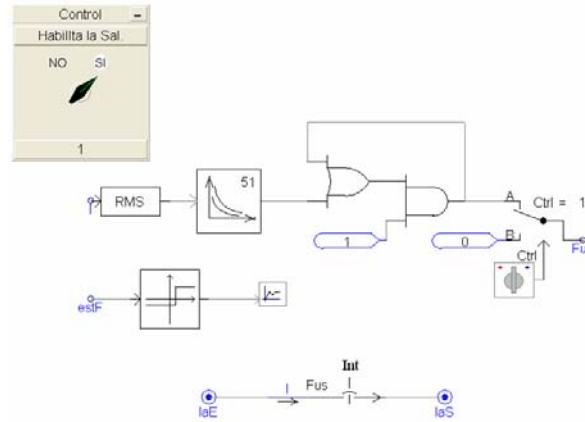


Figura 3.2.3. Contenido detallado del Módulo **Fusible\_a** (dispositivos de medición, nodos eléctricos de conexión, interruptor, **R-51**, compuertas lógicas y panel de control).

Los parámetros de ajuste para los modelos y bloques del sistema de prueba de la figura 3.2.4, se encuentran en el apéndice B-1.

Las fallas que se avalúan son:

- monofásica a tierra, **a-T**.
- bifásicas sólida, **ab**.
- trifásica sólida, **abc**.

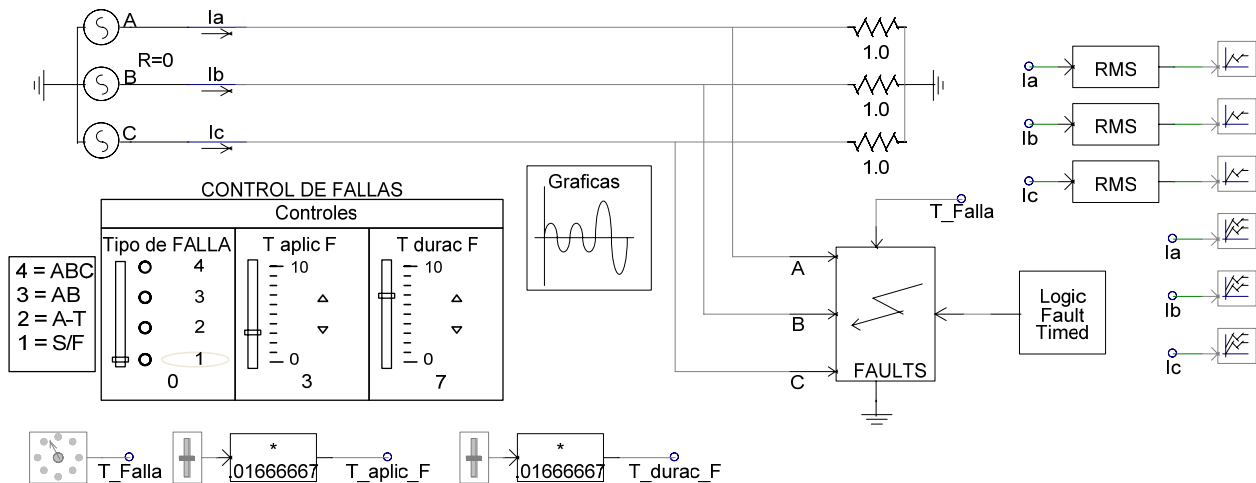


Figura 3.2.4. Sistema de prueba para evaluar la operación de los módulos de protección.

Para la simulación de fallas en el sistema de prueba, se emplea el módulo de fallas **FAULTS**, el cual a su vez, es controlado por otro módulo de controles **Control de Fallas**, en éste, se selecciona el tipo de falla, el tiempo de inicio de la falla y la duración de la misma. En la tabla 3.2.1, se observan los tipos de fallas y su respectivo valor designado en el módulo de control de fallas del PSCAD/EMTDC.

Tabla 3.2.1. Tipos de fallas y su correspondiente valor de asignación en PSCAD/EMTDC.

0 = Sin falla	3 = <b>c-T</b>	6 = <b>bc-T</b>	9 = <b>ac</b>
1 = <b>a-T</b>	4 = <b>ab-T</b>	7 = <b>abc-T</b>	10 = <b>bc</b>
2 = <b>b-T</b>	5 = <b>ac-T</b>	8 = <b>ab</b>	11 = <b>abc</b>

Sin embargo, para evaluar la operación del módulo de protección, sólo se simularon las fallas antes mencionadas, pues la evaluación en estas condiciones de falla, garantiza la operación adecuada de los módulos para el resto de los casos. Las fallas simuladas y su respectivo valor asignado en el módulo **Control de Fallas**, se muestran en la tabla 3.2.2.

Tabla 3.2.2. Fallas simuladas y su respectivo valor asignado en el módulo **Control de Fallas** de la figuras.

<b>1 = Sin falla</b>
<b>2 = a-T</b>
<b>8 = ab</b>
<b>11 = abc</b>

Con la finalidad de obtener los valores **rms**, para los cuales deberán ajustarse los módulos de fusibles, se simulan las diferentes condiciones de fallas en el sistema de prueba de la figura 3.2.4. El tiempo de simulación corresponde a 10 ciclos (de la frecuencia fundamental del sistema 60 Hz.), las fallas se aplican a los 3 ciclos y permanecen hasta el final de la simulación. En las figuras 3.2.5 a la 3.2.12, se observan el valor pico y el valor **rms** de la corriente de las fases **a**, **b** y **c** registradas por los medidores **Ia**, **Ib** y **Ic** respectivamente, en cada una de las líneas del sistema de prueba, para las diferentes condiciones.

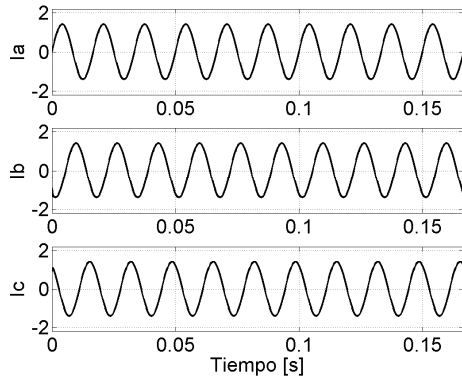


Figura 3.2.5. Corrientes\* trifásicas en el sistema de prueba sin falla,  $I_{abc}^\dagger = 1.414$  A-pico.

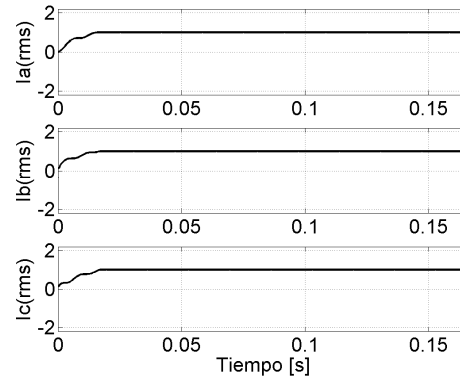


Figura 3.2.6. Valores **rms** de las corrientes en el sistema de prueba sin falla,  $I_{abc} = 1$  A.

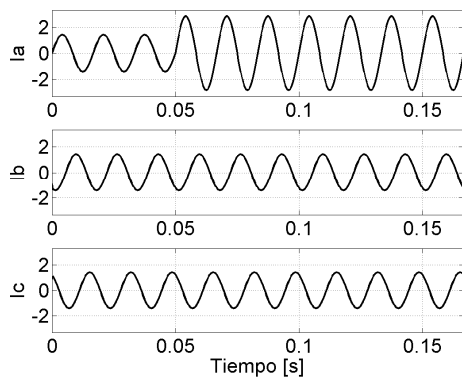


Figura 3.2.7. Corrientes trifásicas para una falla monofásica a-T,  $I_{a_{max}}^\ddagger = 2.825$  A-pico

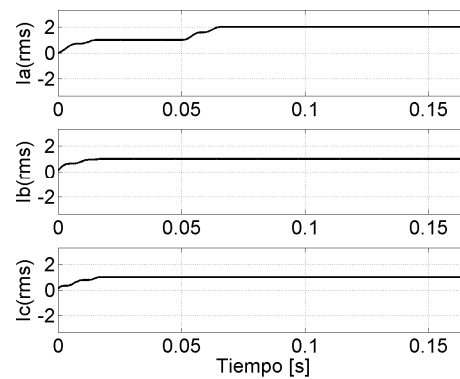


Figura 3.2.8. Valores **rms** de las corrientes para una falla monofásica a-T,  $I_{a_{max}} = 2$  A.

\* Todas las magnitudes indicadas (al no ser que se indique lo contrario) de las corrientes corresponden a los valores medidos en las líneas del sistema.

† Se emplea  $I_{abc}$  para indicar que  $I_a$ ,  $I_b$  e  $I_c$  tiene la misma magnitud.

‡ Se emplea  $I_{a_{max}}$  para indicar la magnitud máxima de  $I_a$ .

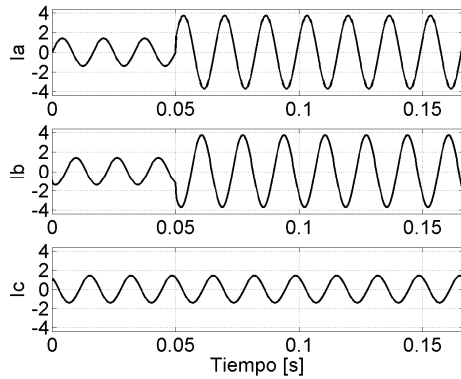


Figura 3.2.9. Corrientes trifásicas en el sistema de prueba para una falla bifásica sólida **ab**,  $I_{ab_{max}}^* = 3.741$  A-pico.

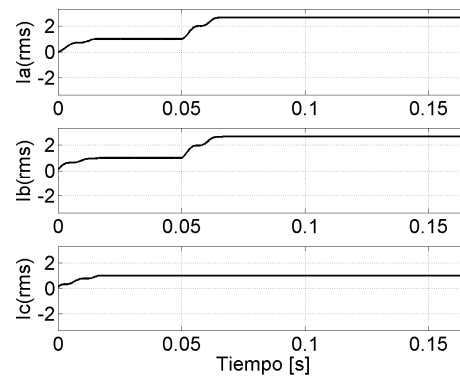


Figura 3.2.10. Valores **rms** de las corrientes en el sistema de prueba para una falla bifásica sólida **ab**,  $I_{ab_{max}} = 2.64575$  A.

Como se observa en la figura 3.2.6, el valor **rms** de la corriente de carga es de 1 A (corriente máxima permitida). Los fusibles deberán ser ajustados para soportar el paso continuo de la corriente de carga, y a su vez, éstos deberán proteger al sistema de prueba contra fallas monofásicas. De la simulación para una falla monofásica (figura 3.2.8), el valor **rms** de la corriente es de 2 A, los fusibles tendrán que desconectar al elemento fallado cuando por ellos pase una corriente mayor a 1 A, de esta manera se asegura que los fusibles brinden protección al sistema de prueba para el resto de las condiciones de falla.

En la figura 3.2.9 y 3.2.10, se observan las magnitudes **pico** y **rms**, respectivamente de las corrientes para una falla bifásica entre las fases **a** y **b**.

En la figura 3.2.11 y 3.2.12, se observan las magnitudes **pico** y **rms**, respectivamente de las corrientes para una falla trifásica, **abc**.

En la figura 3.2.13, se observan los módulos de fusibles **Fusible\_a**, **Fusible\_b** y **Fusible\_c**, que protegen a las líneas de las fases **a**, **b** y **c**, respectivamente.

\* Se emplea  $I_{ab_{max}}$ , para indicar que **Ia** e **Ib** tiene la misma magnitud máxima.



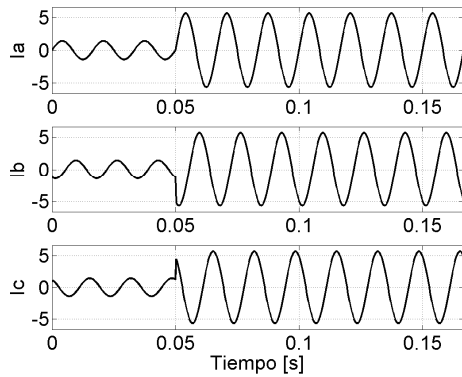


Figura 3.2.11. Corrientes trifásicas en el sistema de prueba para una falla trifásica sólida **abc**,  $I_{abc_{max}}^* = 5.65$  A-pico.

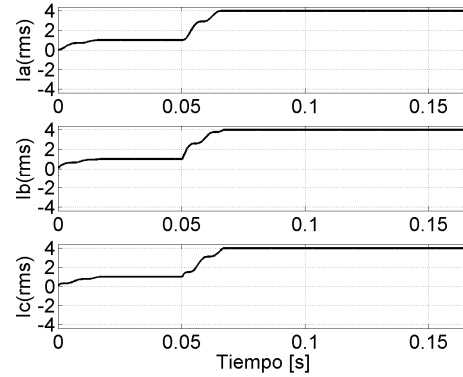


Figura 3.2.12. Valores **rms** de las corrientes en el sistema de prueba para una falla trifásica sólida **abc**,  $I_{abc_{max}} = 4$  A.

Los parámetros de ajuste para los fusibles que protegen al sistema de prueba de la figura 3.2.13, se encuentran en el apéndice B-2.

El módulo **CONTROL DE FALLAS** de la figura 3.2.13, permite simular las condiciones de falla de la tabla 3.2.2. Para cada una de las fallas simuladas se grafican las variables que se obtienen mediante la simulación en PSCAD/EMTDC. Las variables que se grafican son las siguientes: corrientes primarias en cada fase del sistema **IaF**, **IbF** e **IcF**, y las variables **estF\_a**, **estF\_b** y **estF\_c**, que corresponden a los estados de los fusibles.

Los datos generados por la simulación en PSCAD/EMTDC, se guardan en archivos de salida automáticamente. Los datos guardados son importados y graficados, mediante un programa en MatLab (véase el apéndice D). Los datos correspondientes a las corrientes de cada fase del sistema, se grafican en una sola figura. En otra figura se grafican los estados de operación de los fusibles, además, se obtiene el tiempo de operación en segundos.

\* Se emplea  $I_{abc_{max}}$ , para indicar que **Ia**, **Ib** e **Ic** tiene la misma magnitud máxima.

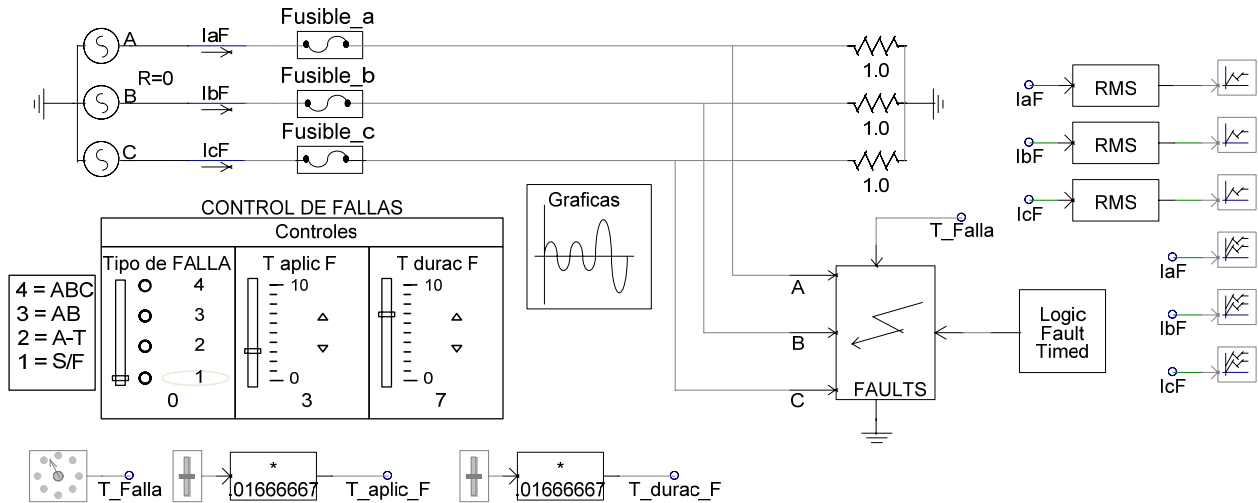


Figura 3.2.13. Diagrama en PSCAD para la simulación y evaluación de los módulos **Fusible\_a**, **Fusible\_b** y **Fusible\_c**.

### 3.2.2.1 Sistema de prueba sin falla.

En la figura 3.2.14, se observan las corrientes registradas por los medidores **IaF**, **IbF** e **IcF** en el sistema de prueba. En la figura 3.2.15, se observan los estados lógicos de los interruptores, los cuales realizan la acción de desconexión en los módulos **Fusible**.

Las corrientes instantáneas en la figura 3.2.14, corresponden a las corrientes de carga sin falla. Los estados de operación de los interruptores, en la figura 3.2.15, indican que los fusibles soportan el paso continuo de la corriente de carga.

### 3.2.2.2 Sistema de prueba considerando una falla monofásica.

Para la simulación de una falla monofásica (**a-T**) en el sistema de prueba, se obtienen las corrientes presentadas en la figura 3.2.16. En la gráfica correspondiente a la corriente medida en la línea de la fase **a**, se puede observar que el módulo **Fusible\_a** liberó la falla, mientras que las líneas de las fases **b** y **c** continúan en servicio. Para que el módulo **Fusible\_a** liberará la falla fueron necesarios 0.10868 s (6.5 ciclos) después de que ocurrió la falla (los dígitos que aparecen en los cuadros de la figura 3.2.17 consideran el tiempo desde el inicio de la simulación hasta el

momento en el cual el fusible libera la falla), como se puede observar en la figura 3.2.16 la acción de desconexión (para el elemento fallado) ocurre cuando la corriente pasa por cero.

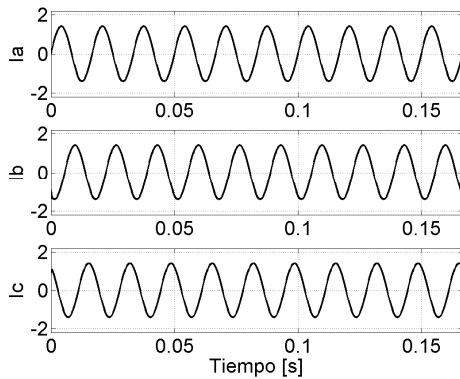


Figura 3.2.14. Corrientes nominales medidas en el sistema de prueba.

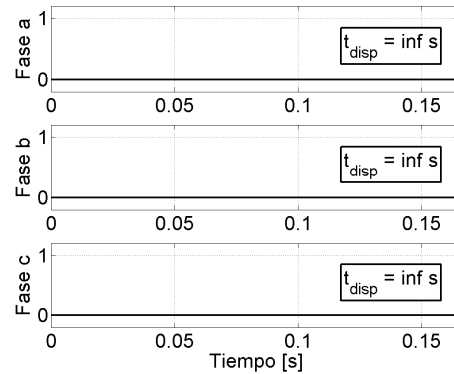


Figura 3.2.15. Estados de operación de los interruptores en los módulos **Fusible**.

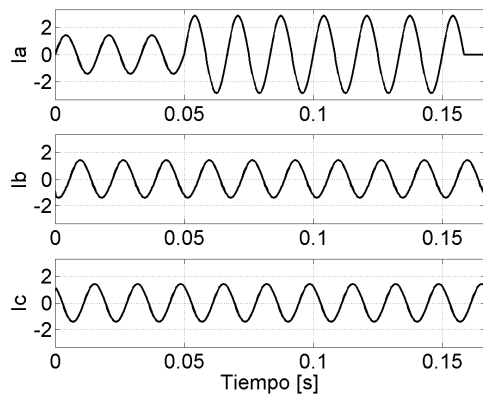


Figura 3.2.16. Corrientes medidas, para una falla monofásica.

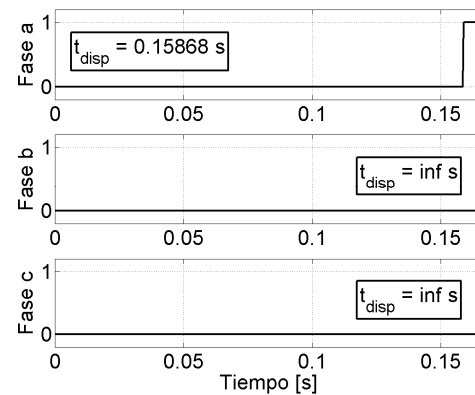


Figura 3.2.17. Estados de operación de los módulos **Fusible**.

### 3.2.2.3 Sistema de prueba considerando una falla bifásica sólida.

En la figura 3.2.18, se observan las corrientes en las líneas del sistema de prueba cuando se simula una falla bifásica sólida entre las líneas **a** y **b**. Los valores **rms** de las corrientes de falla son mayores, por lo tanto, el tiempo de liberación es menor. Las corrientes de falla fueron liberadas en aproximadamente 2.5 ciclos en ambas líneas. El tiempo necesario para liberar la falla en cada fusible, se observa en la figura 3.2.19.

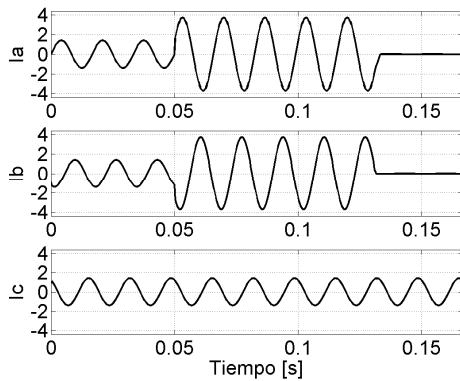


Figura 3.2.18. Corrientes medidas, para una falla bifásica sólida **ab**.

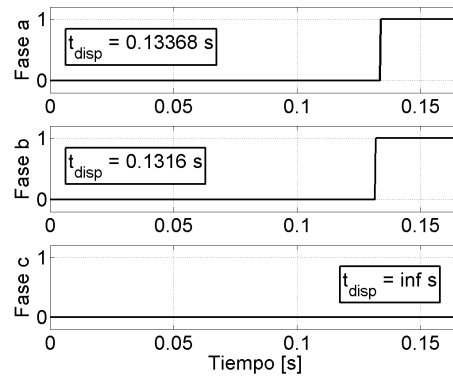


Figura 3.2.19. Estados de operación de los interruptores en los módulos **Fusible**.

### 3.2.2.4 Sistema de prueba considerando una falla trifásica sólida.

La simulación de una falla trifásica sólida en el sistema de prueba, se obtienen las corrientes que se observan en la figura 3.2.20. Los valores **rms** de las corrientes en una falla trifásica sólida son mayores, por lo tanto, el tiempo de liberación es mucho menor comparado con los casos de fallas simuladas anteriormente. La falla fue liberada después de 1.5 ciclos, el tiempo para liberación de la falla se observa en la figura 3.2.21.

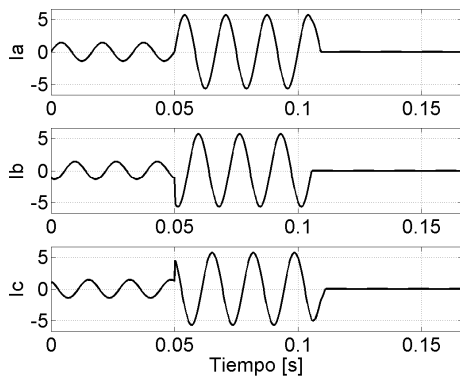


Figura 3.2.20. Corrientes medidas, para una falla trifásica sólida.

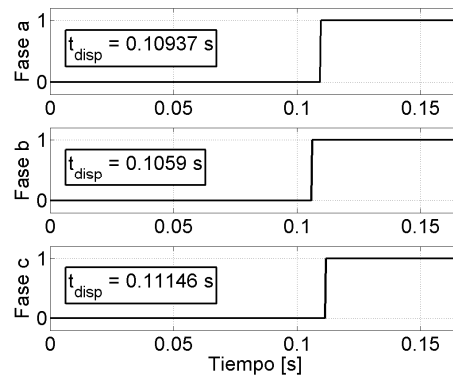


Figura 3.2.21. Estados de operación de los interruptores en los módulos **Fusible**.

### 3.3 Módulo de protección con relevador instantáneo y relevador de sobre corriente de tiempo inverso.

Este módulo de protección está constituido por un relevador de corriente definida o también llamado relevador instantáneo (**R-50**<sup>\*</sup>) y un relevador de sobrecorriente de tiempo inverso (**R-51**). En el **R-50**, la señal de disparo, se emite de manera instantánea, cuando el valor **rms** de la corriente de falla alcanza un valor predeterminado o de ajuste. Como se ha explicado en el capítulo anterior, en el **R-51**, el tiempo en el que se emite la señal de disparo, varía en forma inversamente proporcional a la magnitud de la corriente que está midiendo. La característica inversa de tiempo se obtiene mediante el recorrido de un disco de inducción (en los relevadores electromagnéticos), el cual cierra un contacto al final de su recorrido, generándose así la señal de disparo. El ángulo de rotación del disco, depende del valor **rms** de la corriente **I** y de la duración de **I**, como se observará más adelante.

El **R-50** debe ajustarse para liberar fallas con magnitudes de corrientes que puedan causar daños a los elementos y equipo en el sistema, proporcionando de esta manera una protección instantánea para magnitudes de corrientes de falla peligrosas para el sistema en general. El **R-51**, deberá operar sólo para liberar fallas en las cuales la magnitud de la corriente y el tiempo de duración de ésta, no produzca daños en los elementos o equipos del sistema. Estos parámetros son tomados en cuenta para determinar el ajuste en la coordinación con otros esquemas de protección.

Este módulo de protección, está diseñado para liberar fallas: monofásicas a tierra, bifásicas a tierra, trifásica a tierra, bifásicas sólidas y trifásica sólida.

La simulación y evaluación de este módulo de protección, se realizó en el software PSCAD/EMTDC. En la figura 3.3.1 se ilustra el circuito, los módulos y controles, que en conjunto permiten simular y evaluar la operación de este módulo de protección.

En la figura 3.3.1, se observa un circuito trifásico, formado por una fuente trifásica ideal de voltaje, que alimenta a una carga resistiva conectada en estrella (se utiliza el mismo sistema de

---

\* Indica relevador instantáneo de sobrecorriente.

prueba de la figura 3.2.4). El control de conexión y desconexión de la carga, lo realiza el interruptor de disparo monopolar. Los medidores **IaRI**, **IbRI** e **IcRI**, obtienen las cantidades instantáneas de corriente en cada línea (fase **a**, fase **b** y fase **c**). El módulo de fallas **Faults**, permite simular la ocurrencia de algún tipo de falla (las características de la falla depende de los parámetros ajustados en el módulo de control **Controls**). En el módulo de transformadores de corriente **Transf. de corriente**, se reducen las magnitudes de las señales de corriente de entrada **IaRI**, **IbRI** y **IcRI**, hacia la salida de este módulo, y éstas son las señales de entrada para el módulo de relevadores de sobrecorriente **Rele 3F\_MP R50/R51**. En el módulo **Rele 3F\_MP R50/R51**, se implementaron los relevadores **R-50** y **R-51** para cada fase, y en función de la magnitud de la corriente medida en ese instante, se emitirá o no la señal de disparo correspondiente, la cual actuará en el interruptor (el interruptor abre cuando la magnitud de la corriente cruza por cero) de la línea correspondiente. Desconectándose de esta manera, el elemento del sistema que ha experimentado la falla o régimen anormal de operación.

### 3.3.1 Construcción del módulo de transformadores de corriente.

En este módulo, se adecuan las magnitudes de las señales de corriente proporcionadas por los medidores **IaRI**, **IbRI** e **IcRI**, para proporcionar la entrada adecuada de corriente al módulo **Rele 50/51**. En la figura 3.3.2, se observan los elementos componentes del módulo. Las etiquetas de importación de datos **TC\_a**, **TC\_b** y **TC\_c**, proporcionan las magnitudes de corrientes primarias para los transformadores de corriente (TC's\*) de cada fase correspondiente. Los TC's, reducen la magnitud de la corriente primaria, en función de los parámetros de configuración. Las etiquetas de exportación, **a\_TC**, **b\_TC** y **c\_TC**, proporcionan las magnitudes de corriente secundaria de los respectivos TC's.

---

\* Indica el plural de transformadores de corriente.

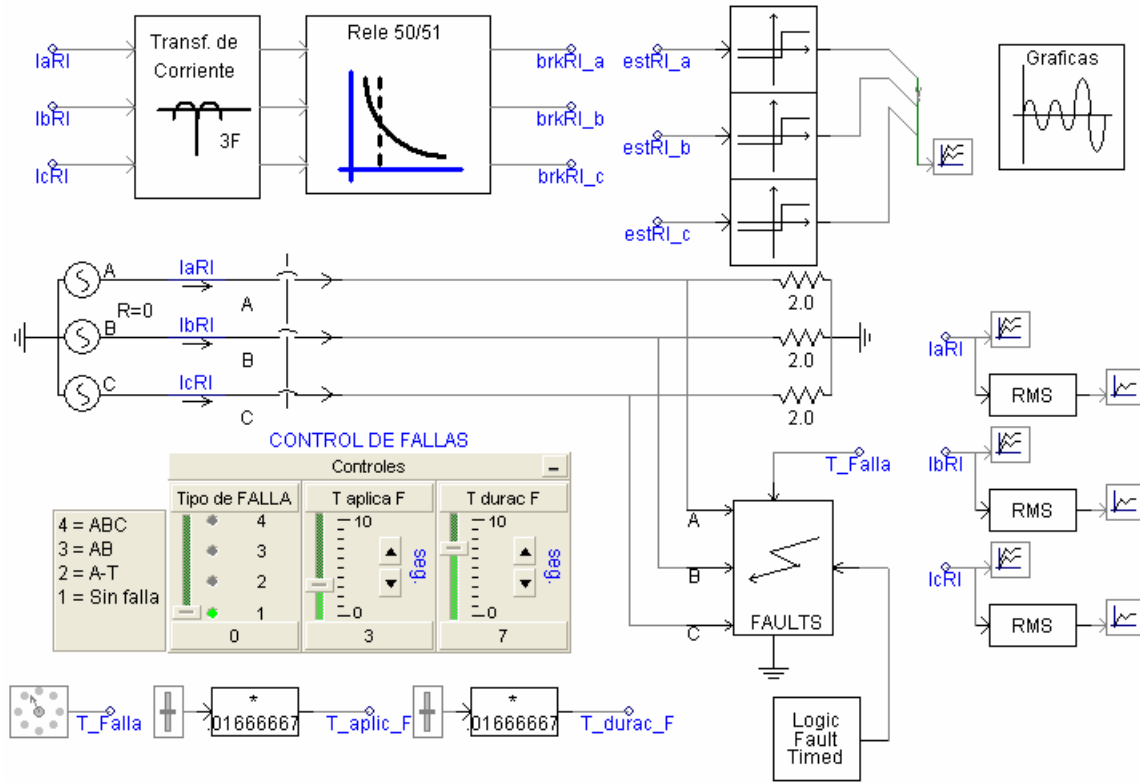


Figura 3.3.1 Diagrama en PSCAD para la simulación y evaluación del módulo **Rele 50/51**.

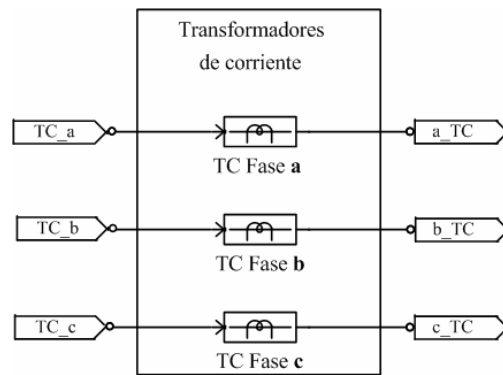


Figura 3.3.2. Componentes del módulo **Transf. de corriente**.

### 3.3.2 Construcción del módulo Rele 50/51.

Es en este módulo, se encuentran los relevadores **R-50** y **R-51**, requeridos para proporcionar protección a cada fase respectiva del sistema. El módulo, emite señales de disparo para interruptores con capacidad de operación monopolar, esta característica permite que sólo aquella

o aquellas fases involucradas en la falla sean desconectadas, garantizando el suministro de energía en la o las fases restantes que no han experimentado alguna falla o régimen anormal.

El ajuste en los **R-50**, debe garantizar que la protección actúe para aquellas fallas, donde la magnitud de dicha corriente puedan producir daños en los elementos o equipos del sistema, y para magnitudes de corriente de falla menores, los **R-51**, deberán proteger al sistema. Es importante considerar en los ajustes del **R-51**, que la magnitud de la corriente de falla permanezca por un determinado tiempo, antes de emitir la señal de disparo correspondiente, cuidando siempre que la magnitud y la duración de la corriente de falla no cause daños en los elementos y equipos del sistema. Además, al proponer los ajustes de ambos dispositivos de protección, se tendrá que considerar la coordinación con otros esquemas de protección.

En la figura 3.3.3, se ilustran los elementos componentes del módulo **Rele 50/51** de disparo monopolar. La lógica para el funcionamiento de la protección en las tres fases es igual, por esta razón, sólo se explicará la protección para la fase **a**.

La etiqueta **I<sub>a</sub>**, suministra la corriente secundaria proporcionada por el módulo de transformadores de corriente. El bloque **RMS**, obtiene el valor **rms** de la señal de corriente **I<sub>a</sub>**. Cuando el valor **rms** de la corriente, es mayor que la corriente de arranque (ITap ajustado en el **R-51**), y además, éste valor persiste durante el tiempo suficiente, el **R-51** emitirá la señal de disparo, respondiendo de acuerdo a su curva de operación. Si el valor absoluto pico de la corriente, es mayor que la corriente de ajuste en el **R-50**, entonces, será éste el que emitirá la señal de disparo. Si la señal de disparo, es emitida por el **R-50** o **R-51**, la compuerta lógica “**Y**” emitirá una señal con valor de **1**. Si control (**Ctrl**) habilita la salida, la señal de disparo se envía hacia el interruptor **Int**. El interruptor trifásico de disparo monopolar **Int** está configurado para abrir sólo cuando la corriente pasa por cero.



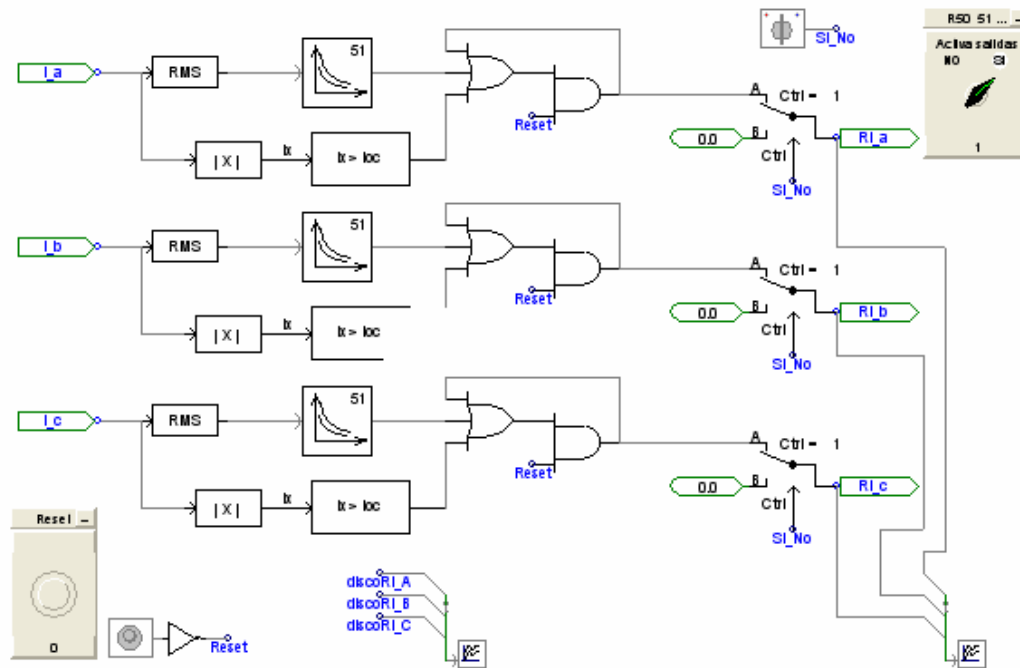


Figura 3.3.3. Elementos componentes del módulo **Relevadores R50/R51** de disparo monopolar.

### 3.3.3 Simulación y evaluación del módulo Rele 50/51 en diferentes condiciones de falla.

El esquema de protección, se simulará y evaluará para cada una de las fallas de la tabla 3.2.3. Además, para cada una de las fallas simuladas, se grafican las variables que se obtienen mediante la simulación en PSCAD/EMTDC. Las variables que se grafican son las siguientes: corrientes primarias en cada fase del sistema, las señales de disparo del módulo de relevadores, los estados de operación de los interruptores, y el recorrido del disco en cada uno de los **R-51's**\*.

Los datos generados por la simulación en PSCAD/EMTDC, se guardan en archivos de salida automáticamente. Los datos guardados, son importados y graficados, mediante un programa en Matlab. Los datos correspondientes a las corrientes de cada fase del sistema, se grafican en una sola figura. En otra figura se grafican las señales de disparo emitidas por el módulo de relevadores, los estados de operación de los interruptores, y además, se obtiene el tiempo de

\* Indica el plural de relevador de sobrecorriente de tiempo inverso.

disparo del relevador y del interruptor respectivamente. Finalmente, se grafica el recorrido del disco para cada uno de los **R-51's**.

Los parámetros de ajuste para los transformadores de corriente y los relevadores de la figura 3.3.1 se encuentran en el apéndice B-3.

### 3.3.3.1 Sistema de prueba sin falla.

En la figura 3.3.4, se observan las corrientes para cada una de las fases del sistema eléctrico sin falla (régimen de operación normal), el sistema tiene una carga balanceada. Puesto que no existe falla en el sistema, ninguno de los relevadores del esquema de protección opera, ni los interruptores, como se observa en la figura 3.3.5 y 3.3.6, respectivamente. Como el valor de la corriente en el sistema se encuentra por debajo de la corriente de arranque de los **R-51's**, no existe desplazamiento alguno en los discos, como se ve en la figura 3.3.7

El esquema de protección empleando el módulo **Rele 50/51**, opera de manera correcta cuando no existe falla en el sistema.

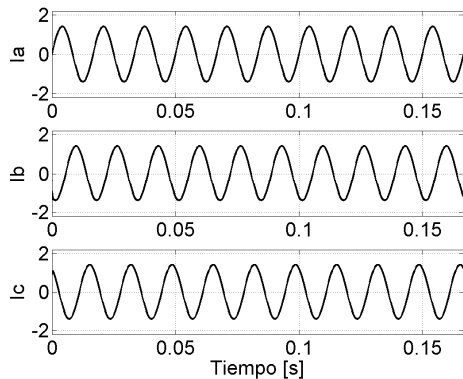


Figura 3.3.4. Corrientes en las fases **a**, **b** y **c**, cuando no existe falla en el sistema de prueba.

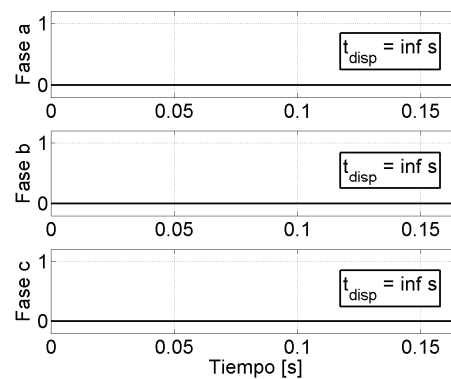


Figura 3.3.5. Estados de operación de los relevadores.

### 3.3.3.2 Sistema de prueba considerando una falla monofásica.

En la figura 3.3.8, se observan las magnitudes de corriente primaria para una falla monofásica (fase **a**-T), y la desconexión de la línea en la fase **a** (liberación de la falla). Debido a que la falla sólo se presentó en la fase **a**, las dos fases restantes continúan suministrando energía al resto de la carga.

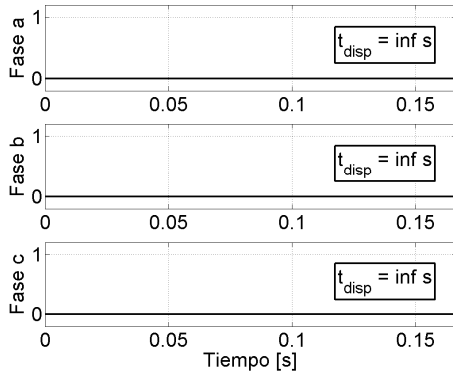


Figura 3.3.6. Estados de operación de los interruptores.

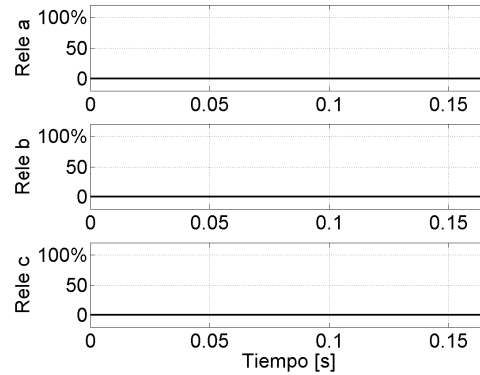


Figura 3.3.7. Recorrido de los discos en los relevadores **R-51's**.

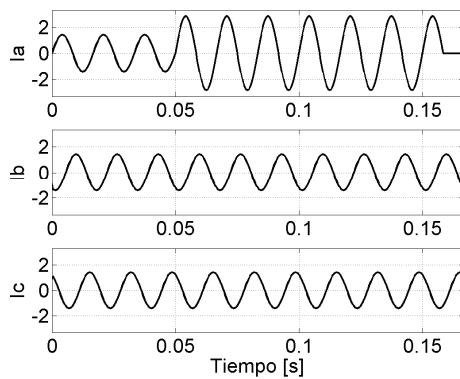


Figura 3.3.8. Corrientes en las fases **a**, **b** y **c**, para una falla **a**-T.

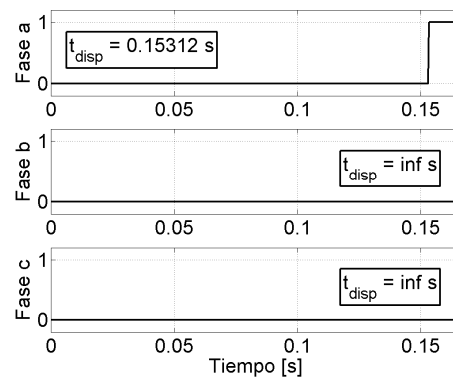


Figura 3.3.9. Estados de operación del módulo **Rele 50/51**.

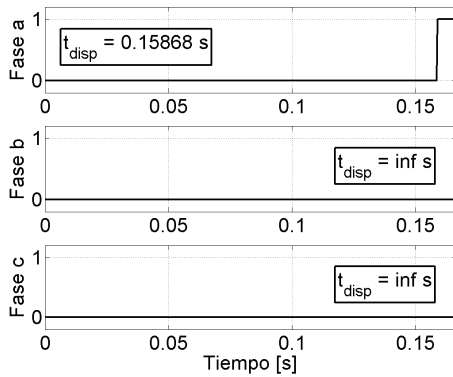


Figura 3.3.10. Estados de operación de los interruptores.

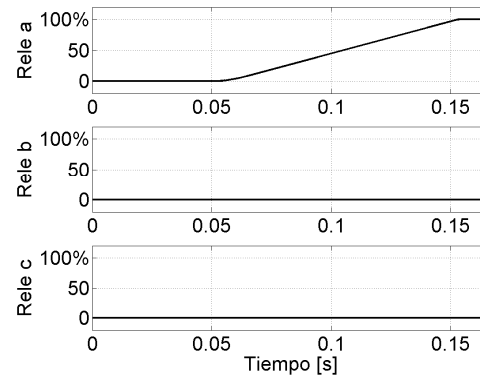


Figura 3.3.11. Recorrido de los discos en los relevadores **R-51**.

Debido a la magnitud de la corriente de falla, el **R-51** es el que emite la señal de disparo para el interruptor de la fase **a**, como se ve en la figura 3.3.9. La señal de disparo del relevador se emitió a los 0.15312 s, sin embargo el interruptor finalmente desconectó la línea a los 0.158 s (cuando la magnitud de la corriente de falla cruza por cero). La diferencia de tiempo entre la operación del relevador y la operación del interruptor es de 0.00556 s, esto se debe a que el interruptor debe esperar hasta que la magnitud de la corriente de falla cruce por cero. En la figura 3.3.11, se observa que el disco del **R-51** que protege a la fase **a**, comienza su avance cuando el valor (en el secundario del **TC**) de la corriente de falla supera la corriente de arranque o **ITap** de ajuste en el **R-51**. La señal de disparo se emite, cuando el disco completa su recorrido; el disco inicia su reposicionamiento cuando decrece el valor (en el secundario del **TC**) de la corriente de falla.

El esquema de protección opera correctamente para una falla monofásica. La simulación y operación correcta del esquema para la falla de la fase **a-T**. Entonces, es posible establecer que también se tiene una operación correcta del esquema para las fallas: **b-T** y **c-T**.

### 3.3.3.3 Sistema de prueba considerando una falla bifásica sólida.

En la figura 3.3.12, se observan las corrientes primarias en las fases **a**, **b** y **c**, para una falla bifásica sólida entre las fases **a** y **b**. Los interruptores desconectan las líneas de las fases **a** y **b**, y la fase **c** continua suministrando energía a la carga restante.

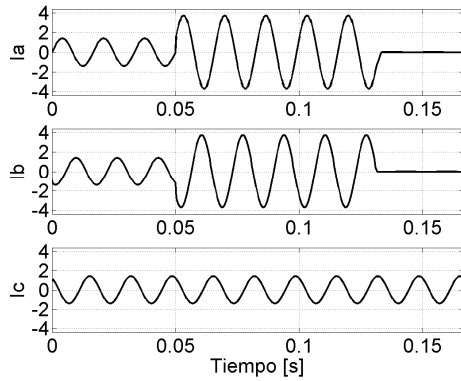


Figura 3.3.12. Corrientes en las fases **a**, **b** y **c**, para una falla **ab**.

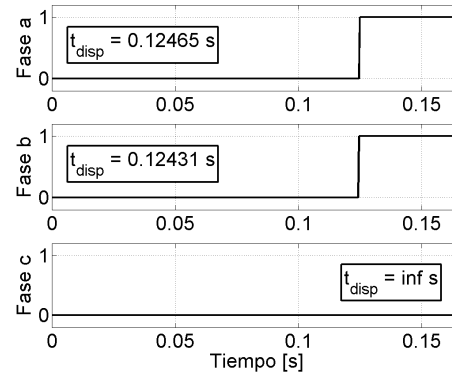


Figura 3.3.13. Estados de operación del módulo **Rele 50/51**

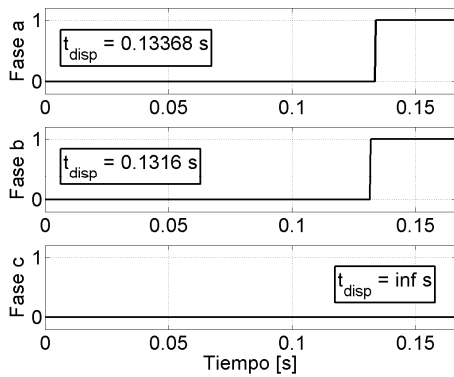


Figura 3.3.14. Estados de operación de los interruptores.

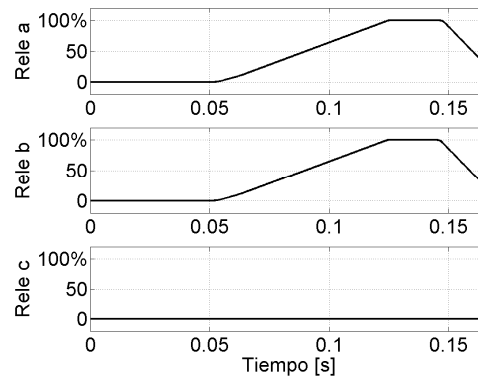


Figura 3.3.15. Recorrido de los discos en los **R-51**.

El valor **rms** de las corrientes en las líneas, para una falla bifásica sólida aumenta, y el tiempo de operación de los **R-51's** decrece, es decir, para una falla bifásica sólida, el tiempo de liberación de la falla es menor. En la figura 3.3.13, se observan los tiempos de operación para los **R-51's** de las fases **a** y **b**, en la figura 3.3.14, se observan los tiempos de operación de los interruptores que protegen a las fases **a** y **b**. El recorrido y el re-posicionamiento de los discos de los **R-51's**, se observan en la figura 3.3.15.

El esquema de protección, opera correctamente para una falla bifásica sólida. La simulación y operación correcta del esquema para una falla sólida entre las fases **a** y **b**. Entonces, es posible

establecer que también se tiene una operación correcta del esquema para las fallas sólidas: **bc** y **ca**.

### 3.3.3.4 Simulación de una falla trifásica sólida.

En la figura 3.3.16, se observan las corrientes primarias en las fases **a**, **b** y **c** para una falla trifásica sólida. Los interruptores desconectan las líneas de las fases **a**, **b** y **c**, eliminando el suministro de energía a la falla y a la carga del sistema de prueba.

El valor de las corrientes en las líneas aumenta para una falla trifásica sólida (con respecto al resto de las fallas), y supera el valor de ajuste en los **R-50's**\*. La señal de disparo es emitida por los **R-50's**. Los tiempos de operación de los **R-50's** y los interruptores, se observan en la figura 3.3.17 y 3.3.18, respectivamente. El recorrido y el re-posicionamiento de los discos de los **R-51's** para las fases **a**, **b** y **c**, se observan en la figura 3.3.19.

El esquema de protección, opera correctamente para una falla trifásica sólida.

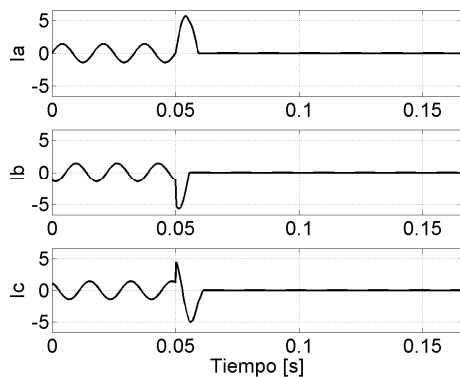


Figura 3.3.16. Corrientes en las fases **a**, **b** y **c**, para una falla **abc**.

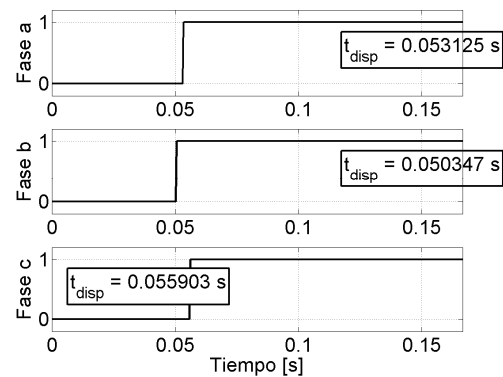


Figura 3.3.17. Estados de operación del módulo **Rele 50/51**.

\* Indica el plural de elevador instantáneo de sobrecorriente.

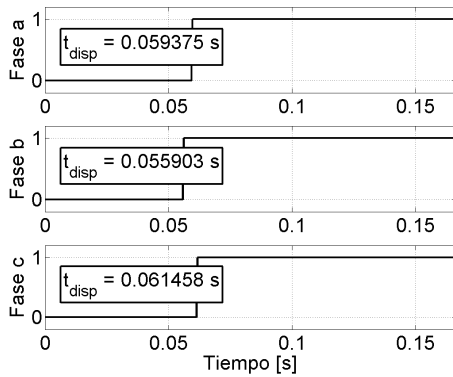


Figura 3.3.18. Estados de operación de los interruptores.

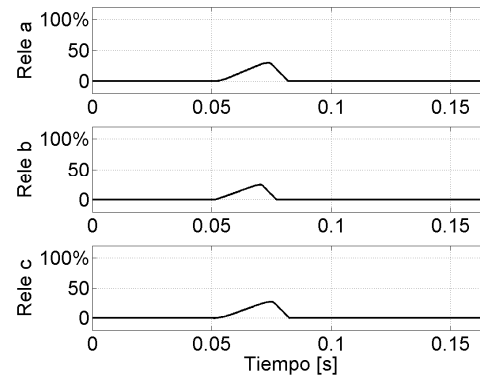


Figura 3.3.19. Recorrido de los discos en los **R-51**.

### 3.4 Módulo Restaurador.

Un restaurador es un dispositivo que permite garantizar el suministro de energía a los usuarios, aún cuando ocurren fallas de naturaleza temporal en las redes de distribución, debido a sus características automáticas de apertura y re-cierre. Además, el restaurador también es un medio de protección para fallas permanentes. Las estadísticas indican que en las redes de distribución, entre un 80% y 95% de las fallas son de naturaleza temporal, y la mayoría persisten durante pocos ciclos o segundos [32, 33, 40]. Para las fallas temporales, una o más operaciones rápidas del restaurador proporcionará el tiempo suficiente para des-ionizar el medio de falla, garantizando así la continuidad del servicio eléctrico para la siguiente operación de re-cierre del restaurador. En fallas permanentes será necesaria, además de las operaciones rápidas, una operación retardada, que proporcione el tiempo suficiente para que libere la falla algún otro dispositivo de sobrecorriente instalado aguas abajo (cercano a la carga). Sí la magnitud de la sobrecorriente persiste, aún después del último re-cierre, el restaurador abrirá sus contactos de forma permanente, desconectando de esta manera el elemento que ha experimentado una falla.

En la figura 3.4.1, se observa el módulo **R** (restaurador), el cual simula la operación de un restaurador automático de operación monopolar.

### 3.4.1 Construcción del módulo Restaurador.

La lógica de funcionamiento en este módulo, simula la operación de un restaurador de operación monopolar, esta característica, permite que sólo aquella o aquellas fases involucradas en la falla, sean desconectadas, garantizando el suministro de energía en la o las fases restantes que no han experimentado alguna falla o régimen anormal.

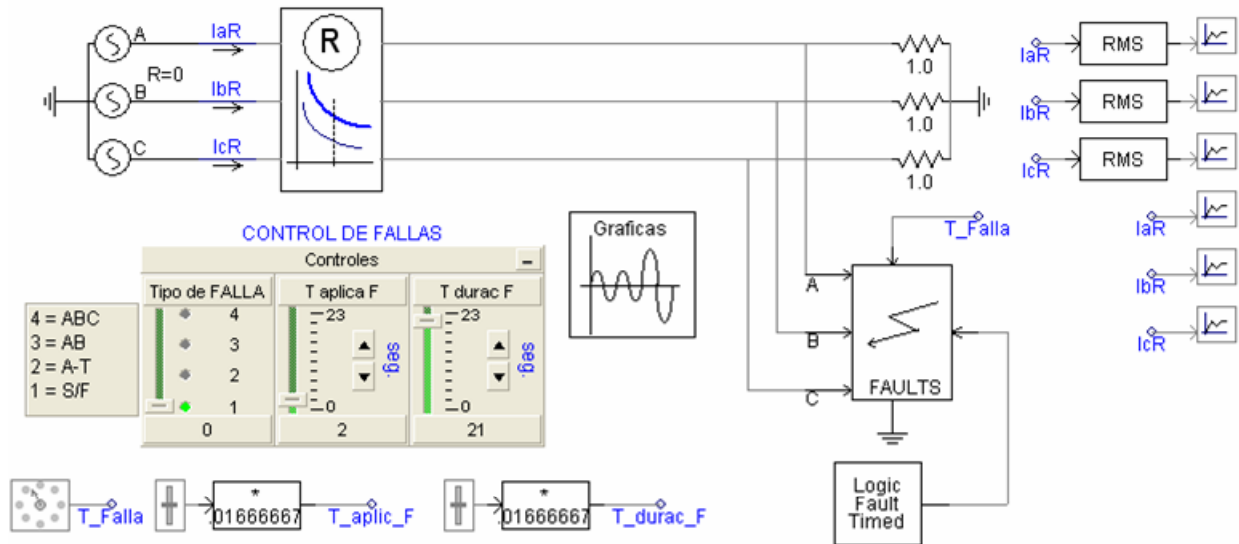


Figura 3.4.1. Diagrama en PSCAD/EMTDC para la simulación y evaluación del módulo **R** (restaurador).

En la figura 3.4.2, se ilustran los elementos componentes del módulo **R** (restaurador) de operación monopolar.

El módulo de controles **control RESTAURADOR** (véase la figura 3.4.2) permite modificar la secuencia de operación del módulo. Con en el control deslizable **T\_DesEnerg**, se controla el periodo de tiempo (en ciclos), durante el cual, permanecen abiertos los contactos del restaurador antes de realizar el re-cierre (tiempo de des-energización). El control **Op. Rápidas**, permite seleccionar el número de operaciones rápidas, que efectuará el módulo, antes de pasar a las operaciones lentas. Con el control **Op. Lentas**, se selecciona el número de operaciones lentas, que efectuará el módulo antes de bloquear la secuencia re-cierre. Y el control **Activa Salidas** habilita o deshabilita la salida de las señales hacia el interruptor trifásico monopolar **Int**.



En la figura 3.4.2, se observa los elementos componentes del módulo **R**, básicamente éstos se dividen en cuatro grupos: Secuencia de operaciones rápidas, Secuencia de operaciones lentas, Señales de disparo y nodos de conexión-Interruptor.

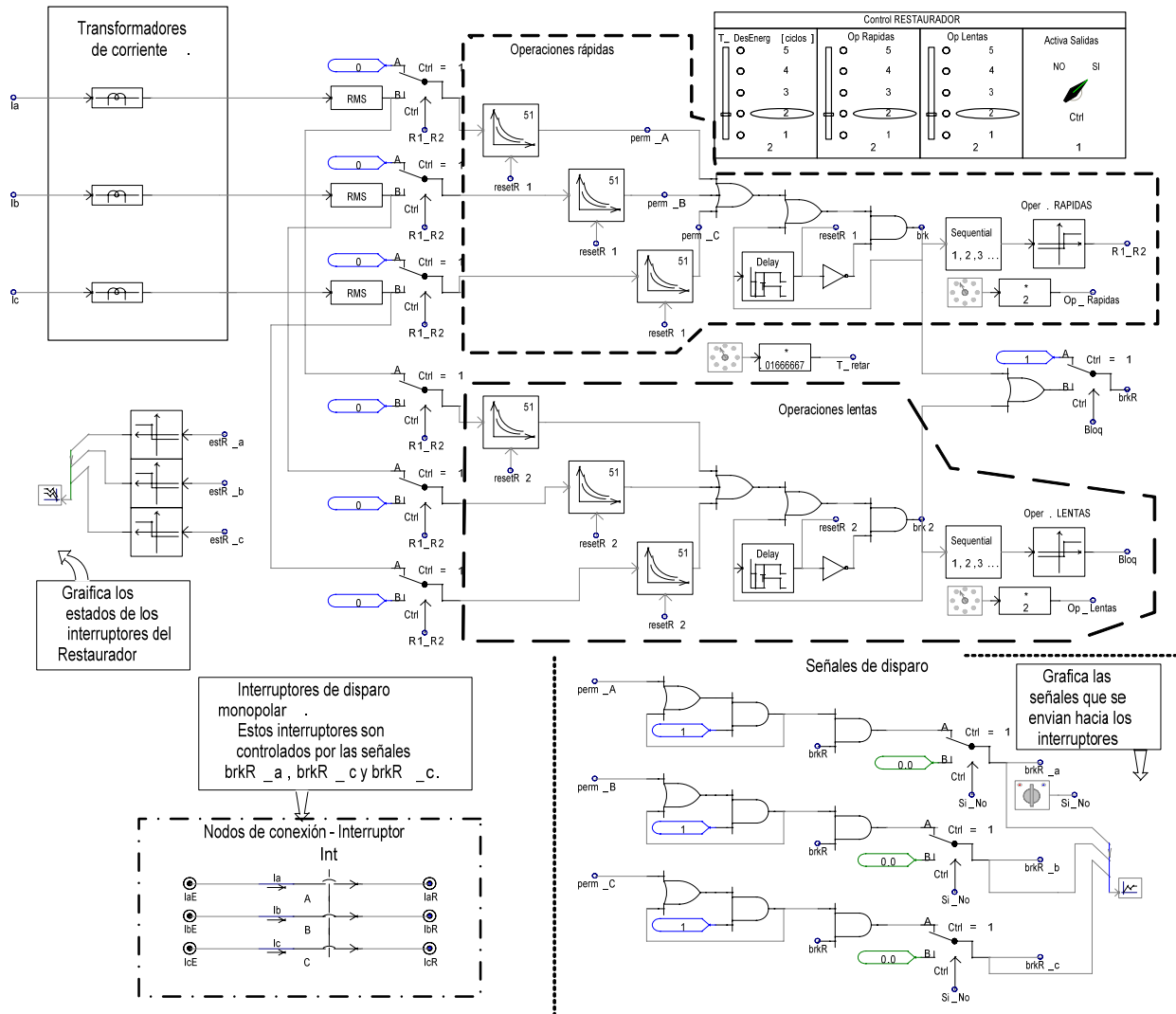


Figura 3.4.2. Elementos componentes del módulo **R** (restaurador) de operación monopolar.

Las características para las operaciones rápidas y lentas en el módulo, se representan utilizando las curvas inversas de tiempo-corriente, y estas características se simulan empleando el modelo de relevador **R-51** de la librería de PSCAD/EMTDC. Modificando la palanca de tiempo en los **R-51**'s, para un mismo ajuste de corriente de arranque (**ITap**), se obtienen las curvas de operación rápida y lenta (véase la figura 3.4.3, curvas A y B, respectivamente).

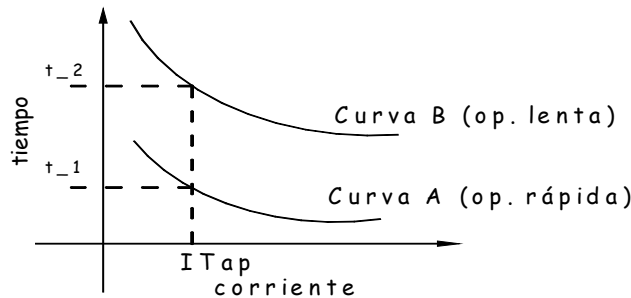


Figura 3.4.3. Curvas características de operación de un restaurador.

Mediante los nodos eléctricos **IaE**, **IbE** e **IcE**, se ingresan al módulo las corrientes. Las magnitudes de las corrientes medidas **Ia**, **Ib** e **Ic**, se adecuan con los transformadores de corriente **TC's**. Las corrientes secundarias de los **TC's** alimentan a los medidores **RMS** de cada fase. Los bloques **RMS** obtienen el valor **rms** de la señal de corriente, respectivamente. En función de las características del valor **rms** de la corriente, y de los ajustes en el **R-51** (que representan las curvas de operación del restaurador), éste emitirá o no, una señal de disparo. Si cualquiera de los tres **R-51's**, del grupo **Secuencia de operaciones rápidas**, emite una señal de disparo. Entonces, la compuerta “**Y**” emite la señal **brk** (**brk** se re-assigna como **brkR** en el selector **selec**), la señal emitida por el **R-51** queda sostenida, hasta que el bloque **Delay**, desactiva la compuerta “**Y**”, originándose al mismo tiempo la señal **resetR1**, la cual reposiciona los tres **R-51's** del grupo **Secuencia de operaciones rápidas**. El tiempo de ajuste para **Delay** se designa con el control **T\_DesEnerg**. Cada vez que se emite la señal **brk**, se incrementa el valor de la variable **Sequantial**, después de un determinado valor (ajustado en el control **Op. Rápidas**), el comparador de **Oper. Rápidas**, emite la señal **R1\_R2**, esto indica que se han cumplido el número de operaciones rápidas predeterminadas.

En el grupo **Secuencia de operaciones rápidas**, la señal **R1\_R2**, controla las salidas de los bloques **RMS** para que se conmuten hacia el grupo **Secuencias de operaciones lentas**. La lógica de operación en el segundo y primer grupo es igual; pero en el segundo grupo, la señal que emite la compuerta “**Y**” es **brk2**. Cada vez que se emite la señal **brk2** (**brk2** se re-nombra como **brkR** en el selector **selec**), y se incrementa el valor en la variable **Sequantial**. Después de un determinado valor (ajustado en el control **Op. Lentas**), el comparador **Oper. Lentas**, emite la señal **Bloq**, esto indica que se han cumplido el número de operaciones lentas predeterminadas. La

señal **Bloq** controla el selector **selec**, y conmuta la salida del selector hacia la entrada **A**, de esta manera la señal **brkR** queda permanentemente con el valor de **1**.

La lógica de operación en el grupo **Salidas de disparo**, es igual para las tres fases, por lo tanto, sólo se explica el funcionamiento para la **Fase a**. Si el **R-51** (en el primer grupo), correspondiente a la fase **a** opera, la señal emitida se nombra **perm\_A**, esta señal se sostiene (en el grupo **Salidas de disparo**), por lo tanto, la segunda compuerta “**Y**” recibe permanentemente una señal con valor de **1**, si el valor de la señal **brkR** es **1**, entonces la salida de esta compuerta será de valor **1**. Las etiquetas de **brkR\_a**, **brkR\_b** y **brkR\_c**, envían las señales de disparo hacia el interruptor trifásico monopolar **Int** (en el grupo **Nodos de conexión - Interruptor**).

### 3.4.2 Evaluación del módulo Restaurador con diferentes condiciones de falla y secuencias de operación.

Para la simulación y evaluación de la operación del **R**, se emplea el sistema de prueba de la figura 3.2.4, las fallas que se simulan son monofásicas, bifásicas y trifásicas. Además, se simulan dos secuencias de operación en el módulo, en la primer secuencia se programa al módulo para que permita dos operaciones rápidas y dos lentas, con la segunda secuencia el módulo permite una operación rápida y dos lentas. El tiempo de des-energización es de dos ciclos para ambas secuencias.

Los parámetros de ajuste para el restaurador de la figura 3.4.1 se encuentran en el apéndice B-4.

#### 3.4.2.1 Sistema de prueba sin falla.

En la figura 3.4.4, se observan las corrientes primarias medidas en las líneas de las fases **a**, **b** y **c** en el sistema de prueba (sin falla). Como las magnitudes de las corrientes medidas son inferiores a los valores de ajuste en el **R**, el restaurador mantiene su estado de conducción como puede observarse en la figura 3.4.5.

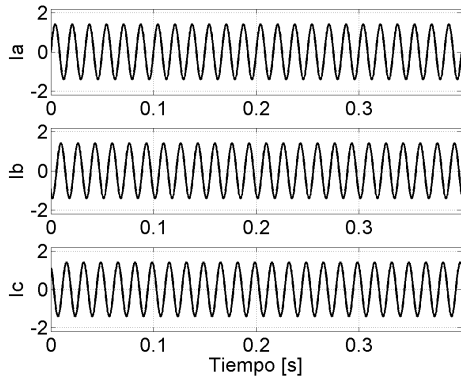


Figura 3.4.4. Corrientes en las fases **a**, **b** y **c**, sin falla.

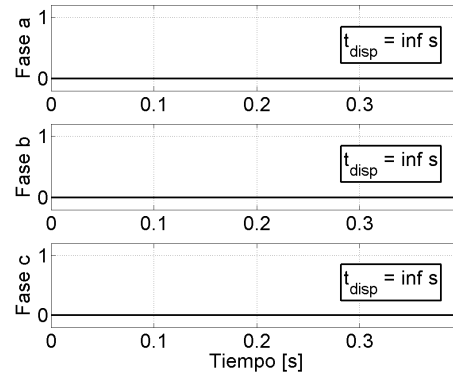


Figura 3.4.5. Estados de operación del módulo **R**.

### 3.4.2.2 Sistema de prueba considerando una falla monofásica, con dos operaciones rápidas y dos operaciones lentas en el Restaurador.

En este caso, se simula una falla monofásica **a-T**, la falla inicia en los primeros dos ciclos de la simulación, con una duración hasta el final de la simulación. Como la falla es permanente, el restaurador permite dos operaciones rápidas y dos últimas operaciones lentas, debido a que la falla persiste, el interruptor interno del Restaurador asociado a la fase **a**, desconecta de manera permanente al elemento fallado. La característica de operación monopolar del Restaurador permite continuar suministrando energía al resto de las cargas, como se puede observa en la figura 3.4.6.

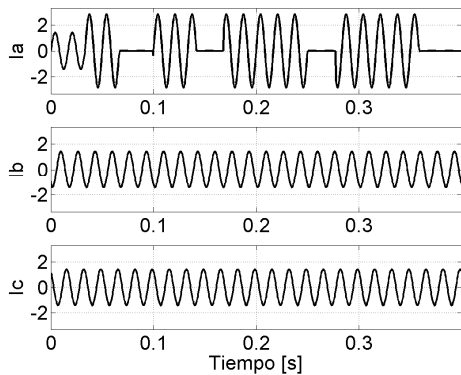


Figura 3.4.6. Corrientes en las fases **a**, **b** y **c**, para una falla **a-T** permanente.

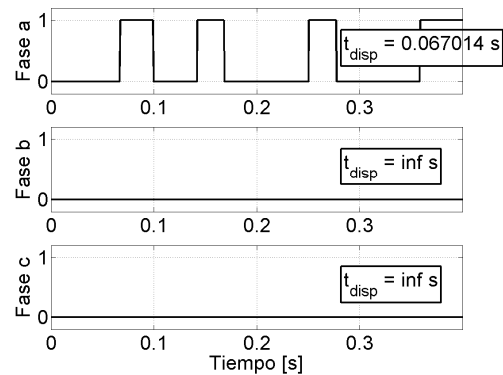


Figura 3.4.7. Estados de operación del módulo **R**.

En la figura 3.4.7, se observan los cambios de estado en el Restaurador durante el tiempo de simulación, además, se observa que la primer operación rápida se realizó a los 0.067014 s (4 ciclos).

### 3.4.2.3 Sistema de prueba considerando una falla bifásica temporal, con dos operaciones rápidas y dos operaciones lentas en el Restaurador.

En la figura 3.4.8, se observan las corrientes primarias medidas en las líneas correspondientes a las fases **a**, **b** y **c**. Para este caso se simula una falla bifásica **ab**, la falla inicia después de los dos primeros ciclos de la simulación, con una duración de 11 ciclos. Se observa en la figura 3.4.9 que fueron necesarias dos operaciones rápidas y una lenta para liberar la condición de falla, después del último re-cierre, el sistema continúa suministrando energía a las cargas conectadas.

Los estados del **R** durante la simulación se observan en la figura 3.4.9.

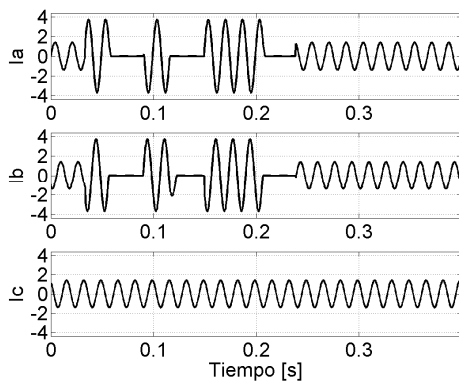


Figura 3.4.8. Corrientes primarias en las fases **a**, **b** y **c**, para una falla **ab** temporal.

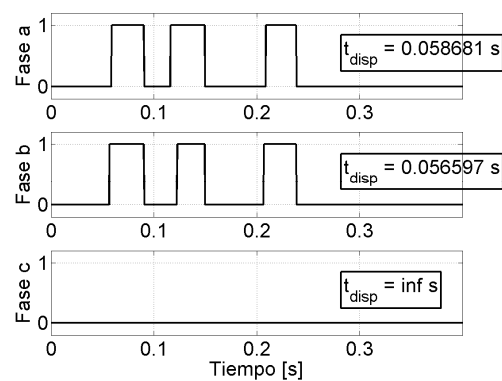


Figura 3.4.9. Estados de operación del módulo **R**.

### 3.4.2.4 Sistema de prueba considerando una falla monofásica, con una operación rápida y dos operaciones lentas en el Restaurador.

En la figura 3.4.10, se observan las corrientes medidas en las líneas correspondientes a las fases **a**, **b** y **c**, para una falla monofásica **a-T**. La falla inicia después de dos ciclos y continúa durante la simulación. El restaurador se programa para que permita una operación rápida y dos operaciones lentas. Como la falla es permanente, el interruptor del **R** que protege a la línea de la fase **a**, permanece abierto después de la secuencia de operaciones programadas, desconectando permanentemente del sistema al elemento fallado. Los estados del módulo **R** durante la simulación se observa en la figura 3.4.11.

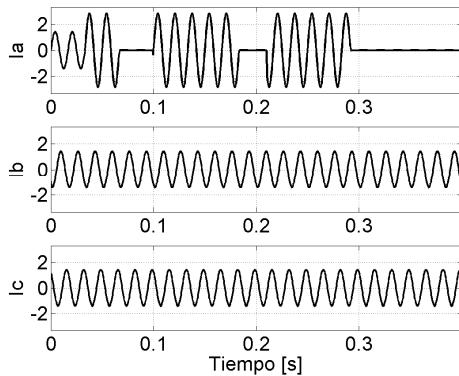


Figura 3.4.10. Corrientes primarias en las fases **a**, **b** y **c**, para una falla **a-T** permanente.

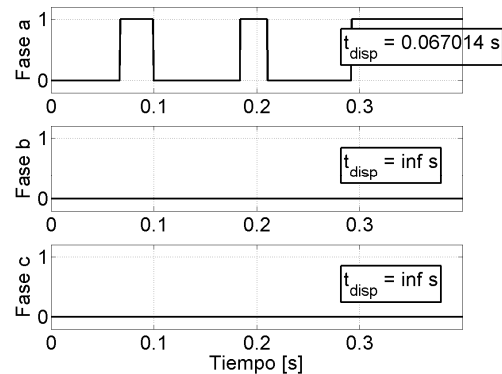


Figura 3.4.11. Estados de operación del módulo **R**.

### 3.4.2.5 Sistema de prueba considerando una falla trifásica temporal, con una operación rápida y dos operaciones lentas en el Restaurador.

Se simula una falla trifásica **abc**, la falla inicia después de los dos ciclos y persiste durante 2 ciclos. En la figura 3.4.12, se observa las corrientes primarias medidas en las líneas correspondientes a las fases **a**, **b** y **c**. Para liberar la condición de falla, sólo fue necesario que el **R** realizará una operación rápida, en el último re-cierre el sistema continua suministrando energía a las cargas conectadas.

Los estados del **R** durante la simulación se observan en la figura 3.4.13.

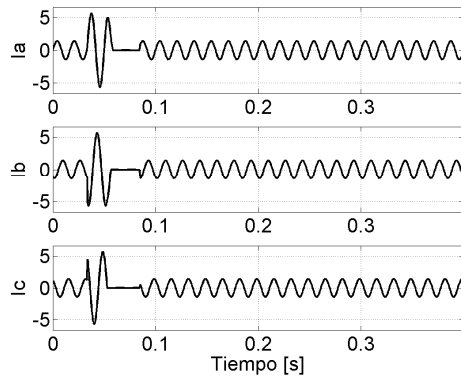


Figura 3.4.12. Corrientes primarias en las fases **a**, **b** y **c**, para una falla **abc** temporal.

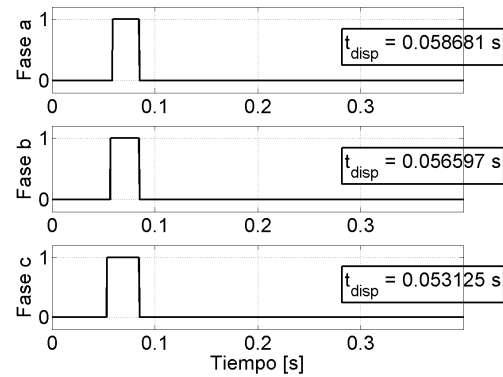


Figura 3.4.13. Estados de operación del módulo **R**.

### 3.5 Módulo Seccionalizador.

La aplicación conjunta de estos dispositivos de protección en los sistemas de distribución optimiza los esquemas de protección. Un seccionalizador es un dispositivo que automáticamente desconecta aquellos elementos que han experimentado alguna falla, una vez que un restaurador o interruptor instalado aguas arriba (cercano a la fuente de generación o subestación) ha interrumpido la corriente de falla, normalmente se instalan aguas abajo de un restaurador, de esta manera se evita la operación de la protección del alimentador principal. Así pues, el seccionalizador está diseñado para abrir el circuito mientras éste se encuentra desconectado de la fuente (des-energizado). La interrupción del circuito se realiza después de que el seccionalizador ha detectado un número predeterminado de interrupciones realizadas por el restaurador o interruptor.

En la figura 3.5.1, se observa el módulo seccionalizador (**S**), el cual simula la operación de un seccionalizador automático de operación monopolar.

Los ajustes para los parámetros del sistema eléctrico para evaluar el seccionalizador se encuentran en el apéndice B-5.

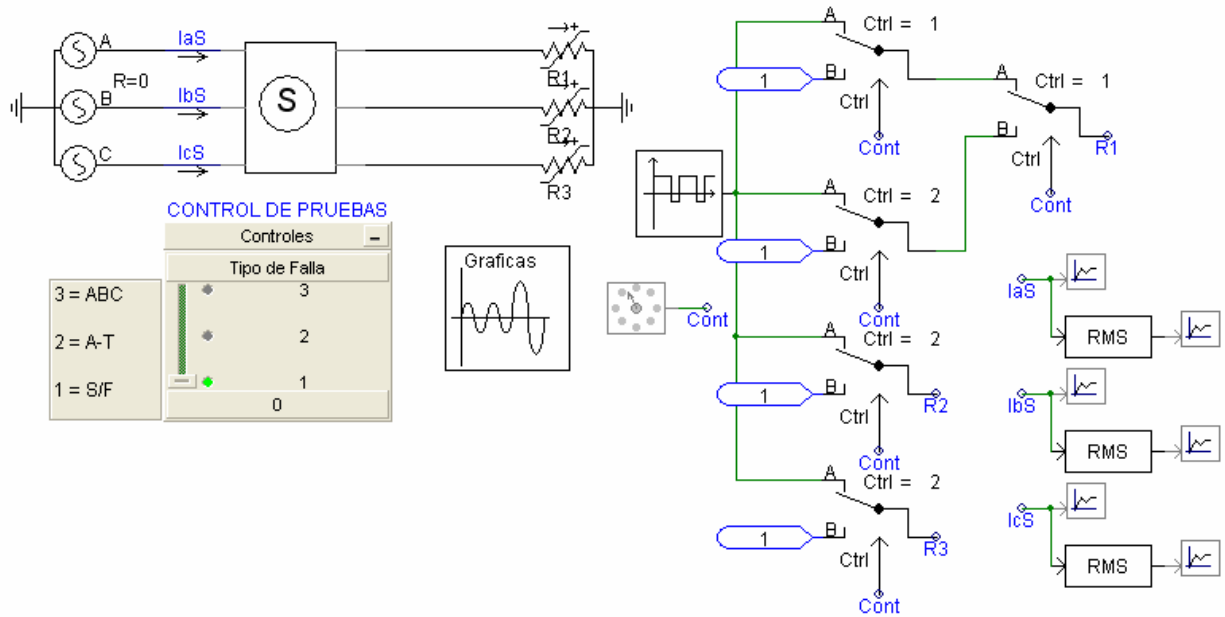


Figura 3.5.1. Diagrama en PSCAD para la simulación y evaluación del módulo **S** (seccionalizador).

### 3.5.1 Construcción del módulo Seccionalizador.

La lógica de funcionamiento en este módulo, representa la operación de un seccionalizador de operación monopolar, esta característica, permite que sólo aquella o aquellas fases involucradas en la falla, sean desconectadas, garantizando el suministro de energía en la o las fases restantes que no han experimentado alguna falla o régimen anormal de operación.

En la figura 3.5.2, se ilustran los elementos componentes del módulo **S** de operación monopolar. El módulo de controles **Controles Seccionalizador** permite modificar los ajustes del módulo. Con en el control deslizante # **acciones**, se controla el número de interrupciones de energía que el módulo permitirá antes de realizar la desconexión permanente. El control **Inom(rms)**, permite seleccionar la magnitud **rms** de la corriente nominal secundaria, la cual será medida por el seccionalizador. El control **Imin[%]**, permite ajusta el porcentaje mínimo de la corriente nominal, si el valor **rms** de la corriente secundaria decrece hasta el valor ajustado, el **Seccionalizador** toma éste valor como una interrupción de energía, esto asegura que el contador del seccionalizador se incrementará cuando exista corriente remanente en el sistema. El control **Iaccion[%]**, permite ajustar el valor **rms** máximo que deberá tener la señal de corriente previa a la des-energización. El control **Activa Salidas** habilita o deshabilita la salida de las señales hacia



el interruptor trifásico monopolar **Int**, esta acción permite representar la indisponibilidad del seccionalizador para simulaciones con esquemas que requieran dispositivos para protección de respaldo.

Los nodos eléctricos **IaE**, **IbE** e **IcE** (véase la figura 3.5.2) introducen las corrientes al módulo, éstas son medidas por los registradores de corriente **Ia**, **Ib** e **Ic**. Las magnitudes de las corrientes **Ia**, **Ib** e **Ic**, se adecuan en los transformadores de corriente. Las corrientes secundarias de los transformadores de corriente alimentan a los medidores **RMS**.

Puesto que la lógica de operación es similar para cada una de las fases que protege el seccionalizador, sólo se explica la operación para la fase **a**.

El bloque **RMS** obtiene el valor **rms** de la señal respectiva de corriente. Si el valor **rms** de la señal de corriente previa a la des-energización supera el valor de ajuste en **Iacción[%]**, la variable en **sequential\_1** se incrementa en uno. Por otro lado, cada vez que el valor **rms** de la señal de corriente decrece por abajo del ajuste en **Imin[%]**, la variable **sequential\_2** se incrementa en uno. Sí el valor en las variables **sequential\_1** y **sequential\_2** es igual al valor del ajuste en **#acciones** se emite la señal de disparo hacia el interruptor de la fase **a**, desconectando así del sistema la condición de falla en el próximo recierre del restaurador o interruptor.

### 3.5.2 Evaluación del módulo Seccionalizador en diferentes condiciones de falla.

En la figura 3.5.1, se observa el diagrama del circuito eléctrico utilizado para simular y evaluar la operación del **S**. El módulo **CONTROL DE PRUEBAS** permite evaluar dos tipos de des-energizaciones: monofásica y trifásica. Se simulan dos condiciones des-energización con corrientes de falla: monofásica y trifásica. Además, se simula una condición de des-energización monofásica con corriente nominal de carga.

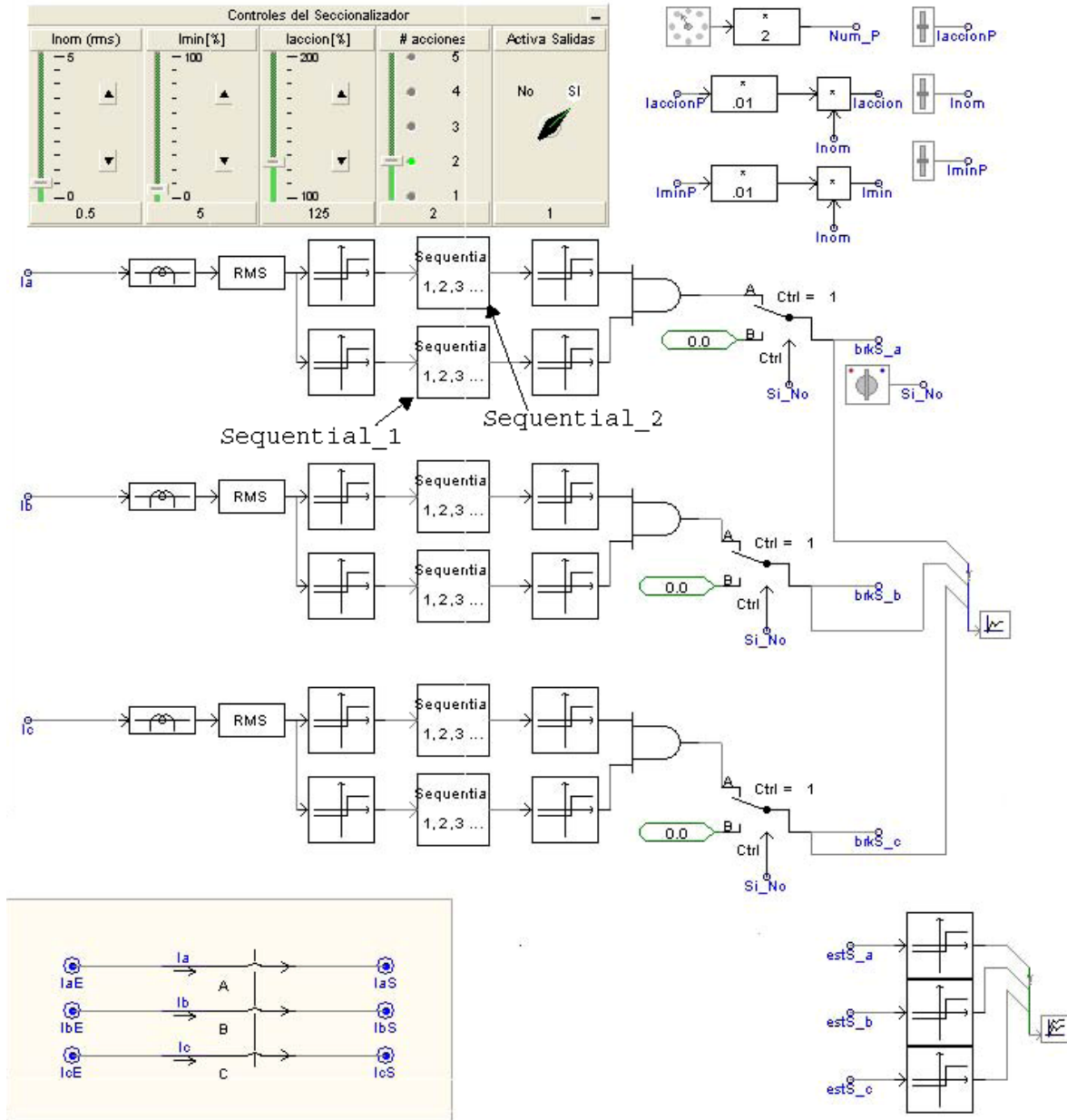


Figura 3.5.2. Elementos componentes del módulo S.

El S se ajusta para que permita dos operaciones de des-energización, y considera una corriente de falla cuando el valor **rms** de la señal de corriente supera el 40% del valor de la corriente nominal.

Los ajustes del seccionizador se encuentran en el apéndice B-6.

### 3.5.2.1 Sistema de prueba sin falla.

En la figura 3.5.3, se observan las corrientes nominales medidas en las líneas de las fases **a**, **b** y **c** del sistema eléctrico de prueba. Como no existe ninguna des-energización, los interruptores del **S** mantienen su estado de conducción (véase la figura 3.5.4).

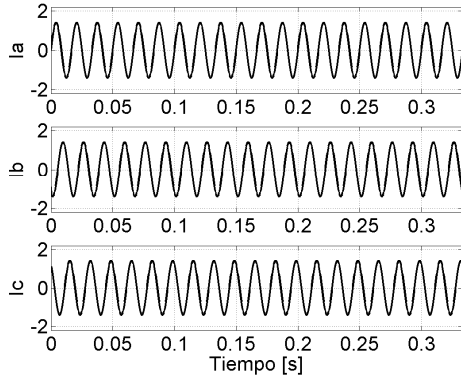


Figura 3.5.3. Corrientes en las fases **a**, **b** y **c**, sin falla.

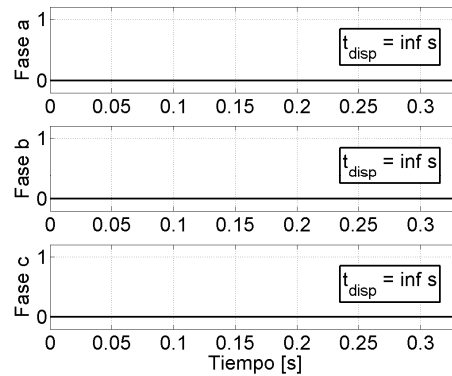


Figura 3.5.4. Estados de operación del módulo **S**.

### 3.5.2.2 Sistema de prueba considerando una des-energización monofásica con corriente de falla.

En la figura 3.5.5, se observan las corrientes medidas en las líneas correspondientes a las fases **a**, **b** y **c**, respectivamente. En la gráfica correspondiente a la fase **a**, se observa que después de dos interrupciones de corriente de falla (debido a la acción de un restaurador instalado aguas arriba), el interruptor interno del **S** desconecta de manera permanente a la línea fallada. La operación monopolar del **S** (véase la figura 3.5.6), permite garantizar el suministro de energía al resto de las cargas.

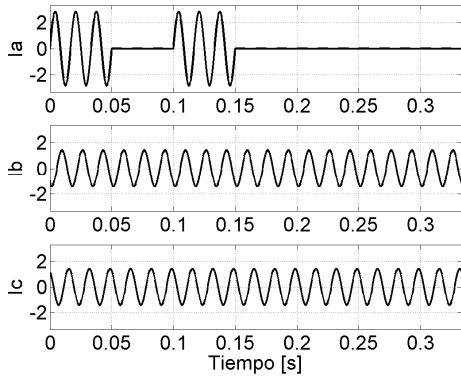


Figura 3.5.5. Corrientes en las fases **a**, **b** y **c**, para una falla monofásica **a-T**, permanente.

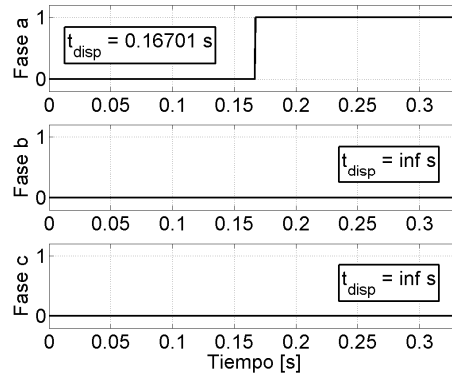


Figura 3.5.6. Estados de operación del módulo **S**.

### 3.5.2.3 Sistema de prueba considerando una des-energización trifásica con corriente de falla.

En la figura 3.5.7, se observan las corrientes medidas en las líneas correspondientes a las fases **a**, **b** y **c**, respectivamente. El interruptor interno del **S** desconecta las tres líneas después de que ocurre la segunda interrupción de la corriente de falla, de esta manera los contactos del interruptor interno del **S** se abren cuando la línea está desenergizada. En la figura 3.5.8, se observan los estados del **S** durante la simulación.

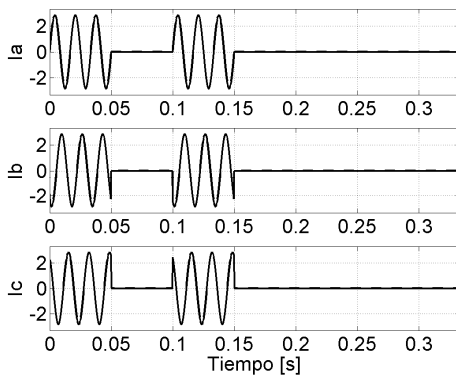


Figura 3.5.7. Corrientes en las fases **a**, **b** y **c**, para una falla trifásica, permanente.

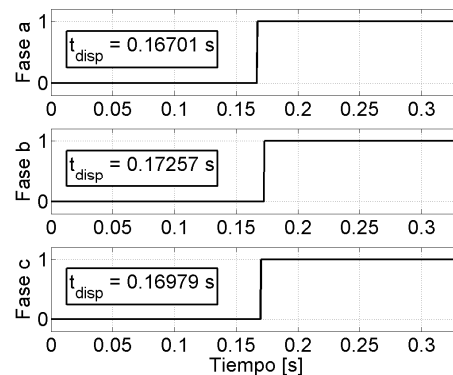


Figura 3.5.8. Estados de operación del módulo **S**.

### 3.5.2.4 Sistema de prueba considerando una des-energización monofásica con corriente de nominal de carga.

En la figura 3.5.9, se observan las corrientes medidas en las líneas correspondientes a las fases **a**, **b** y **c**, respectivamente. En la señal de corriente correspondiente a la fase **a**, se observa que se han realizado tres des-energizaciones, sin embargo, la magnitud de la corriente previa a la des-energización no excede el valor de la corriente nominal de carga, por lo tanto, no se emite la señal de disparo hacia el correspondiente contacto del interruptor interno del seccionador (véase la figura 3.5.10). Esta operación del seccionador, permite garantizar el suministro de energía a aquellas cargas que no están involucradas en la condición de falla (la cual ocasiono la operación del restaurador o interruptor instalado aguas arriba).

Después de realizar las simulaciones y evaluar la operación del módulo seccionador, se considera que éste opera de manera correcta según los ajustes realizados para los casos de prueba descritos anteriormente

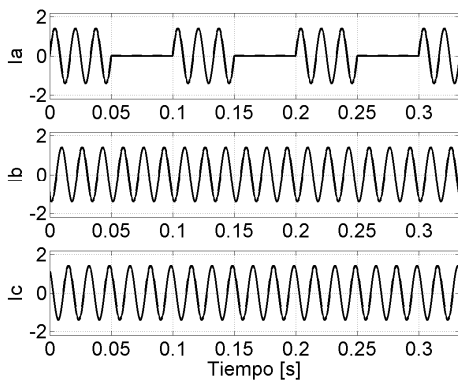


Figura 3.5.9. Corrientes en las fases **a**, **b** y **c**, para una des-energización monofásica, con corriente nominal de carga.

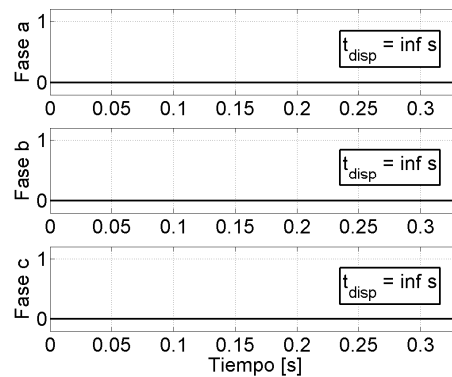


Figura 3.5.10. Estados de operación del módulo **S**.

## 3.6 Coordinación, evaluación y análisis de los módulos de protección en un sistema de prueba.

En la figura 3.6.1, se ilustra un esquema de protección de sobrecorriente comúnmente empleado en sistemas de distribución, éste se emplea como esquema de prueba.

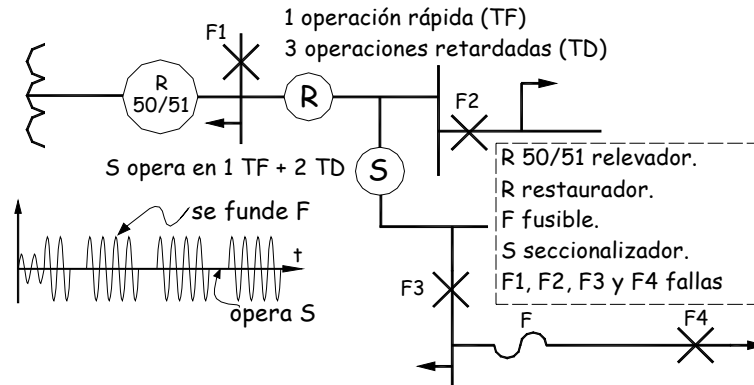


Figura 3.6.1. Esquema de protección de sobrecorriente para un sistema de distribución (esquema de prueba).

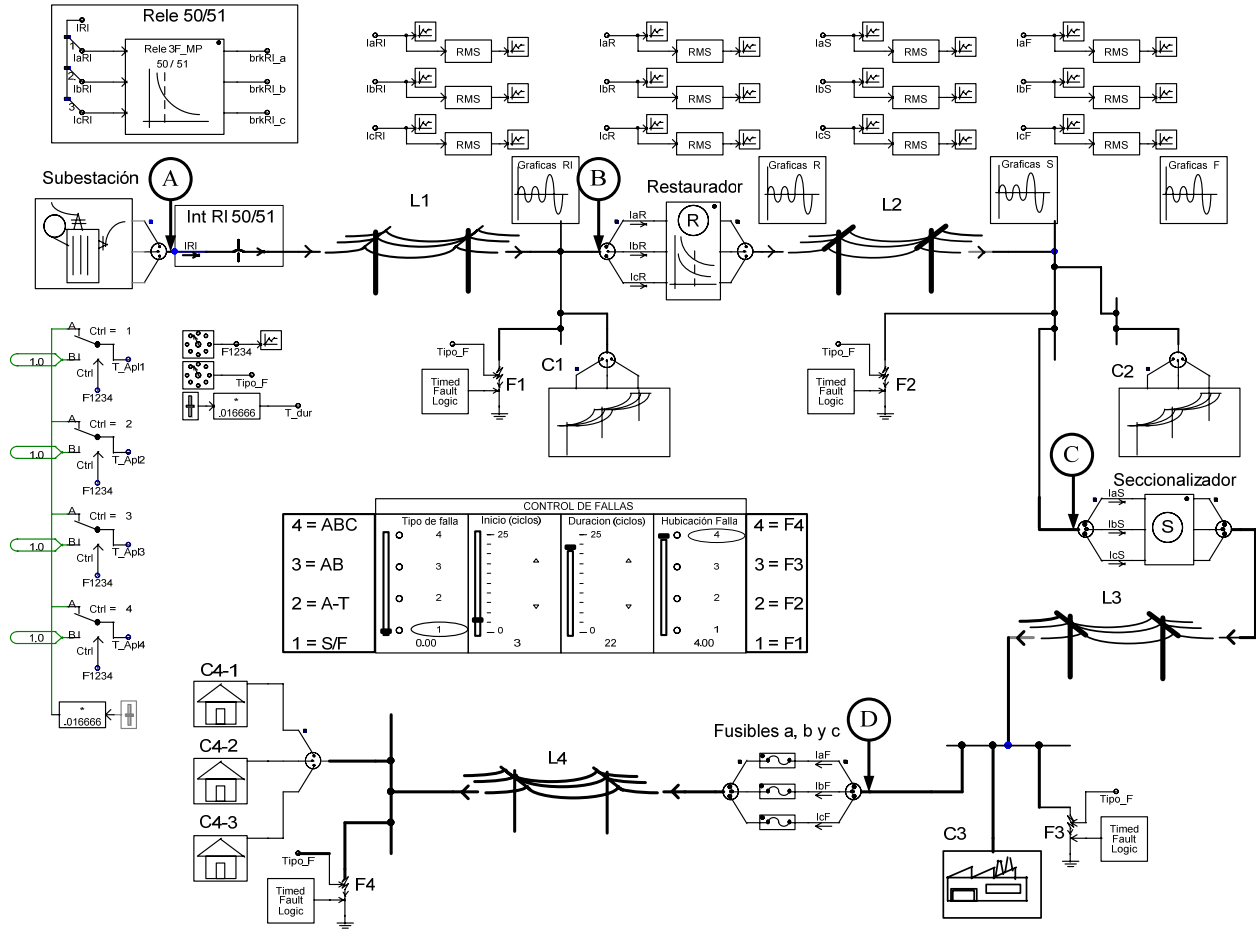
En el esquema de la figura 3.6.1, el restaurador **R** está programado para realizar una operación rápida y tres con retardo, permitiendo que el respectivo fusible libere la falla **F4** en la segunda operación de **R** (primera operación retardada); para permitir esta secuencia de operaciones, es necesario programar al seccionizador para que opere después de tres acciones de **R**.

Los módulos, modelos, medidores y controles de la figura 3.6.2, permiten simular el sistema de prueba de la figura 3.6.1. Los ajustes de los parámetros se encuentran en el apéndice B-7.

### 3.6.1 Evaluación del esquema de protección para la falla F4.

La falla **F4**, se simula entre los fusibles y la carga, como se observa en la figura 3.6.1. Se simula una falla monofásica de la fase a a tierra (**a-T**). La falla se aplica a los dos ciclos y persiste hasta el final de la simulación.

En la figura 3.6.3, se observan las corrientes primarias medidas en el punto **D**, correspondientes a las corrientes que pasan por los fusibles. Se observa que el fusible de la fase **a**, liberó la falla, y las cargas conectadas a las fases **b** y **c**, continúan en servicio.



3.6.2. Diagrama unifilar en PSCAD para simular el sistema de prueba de la figura 3.5.1.

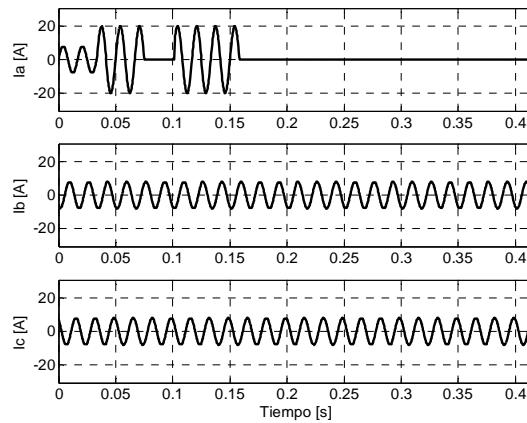


Figura 3.6.3. Corrientes medidas en el punto **D**, para una falla **F4** monofásica (**a-T**).

### 3.6.2 Evaluación del esquema de protección para la falla F3.

Para evaluar la operación del esquema ante una falla **F3**, se simula una falla monofásica (**a-T**). La falla se aplica a los dos ciclos y persiste hasta el final de la simulación.

En la figura 3.6.4, se observan las corrientes primarias medidas en el punto **B**, correspondientes a las señales de corriente que mide el restaurador, y se puede ver que éste realizó tres operaciones de apertura/re-cierre (véase la figura 3.6.5), y en el último re-cierre, la condición de falla ya había sido liberada por el seccionizador.

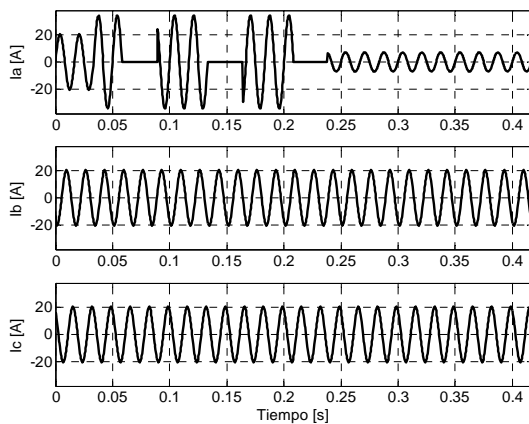


Figura 3.6.4. Corrientes medidas en el punto **B**, para una falla **F3** monofásica (**a-T**).

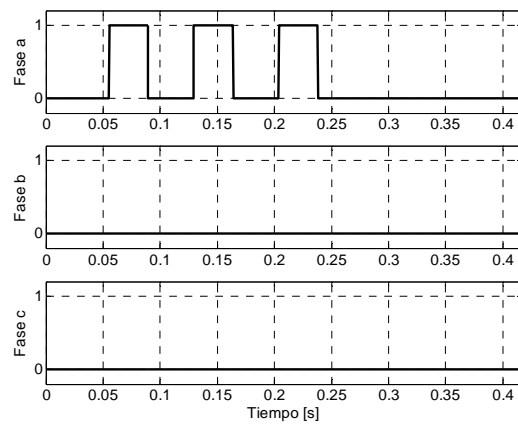


Figura 3.6.5. Señales de salida del **R**.

En la figura 3.6.6, se observan las corrientes primarias medidas en el punto **D**, correspondientes a las señales de corriente medidas por el seccionizador. En la misma figura, se observa que el **S** liberó la condición de falla, después de tres operaciones del restaurador (véase la figura 3.6.7).

### 3.6.3 Evaluación del esquema de protección para la falla F2.

Para evaluar la operación del restaurador, se simula una falla **F2** trifásica sólida. La falla se aplica a los dos ciclos y persiste hasta el final de la simulación.

En la figura 3.6.8, se observan las corrientes primarias medidas en el punto **B**, correspondientes a las señales de corriente que mide el restaurador. En la misma figura, se observa que el restaurador



después de realizar tres operaciones de apertura/re-cierre y una última de re-cierre (véase la figura 3.6.9.) liberó la falla **F2**.

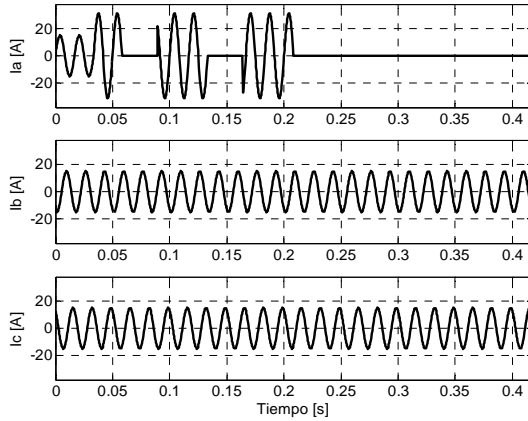


Figura 3.6.6. Corrientes medidas en el punto **C**, para una falla **F3** monofásica (**a-T**).

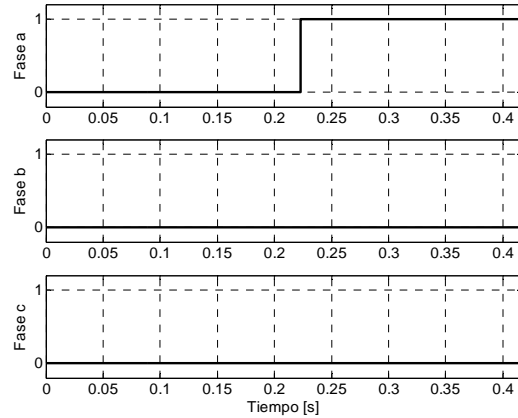


Figura 3.6.7. Señales de salida del **S**.

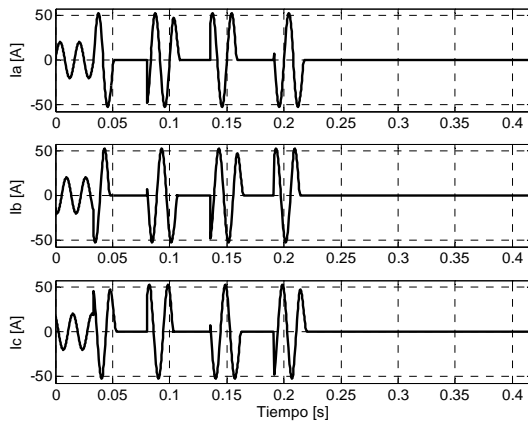


Figura 3.6.8. Corrientes medidas en el punto **B**, para una falla **F2** trifásica, **abc**

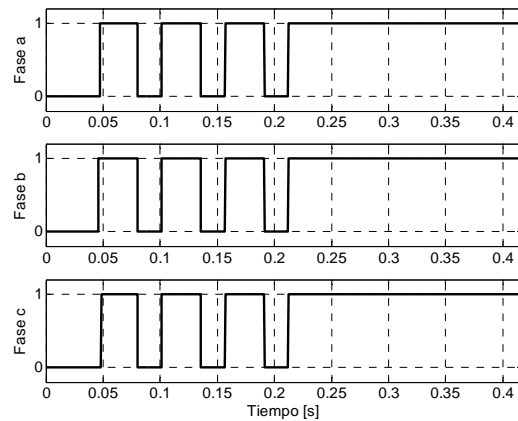


Figura 3.6.9. Señales de salida del **R**.

En la figura 3.6.10, se observan las corrientes primarias medidas en el punto **A**, correspondientes a las señales de corriente medidas por el módulo de relevadores (**Rele 50/51**). En la señal de corriente, correspondiente a la fase **a**, se ven los cambios en la magnitud de la corriente debidos a las operaciones del restaurador; después de que el restaurador liberó la falla, continua el suministrando energía a la carga restante.

Como la magnitud de la corriente de falla no persiste en tiempo, el **Relé 50/51**, no emite señal de disparo (véase la figura 3.6.11.). En la figura 3.6.12, se observa el recorrido y re-posicionamiento de los discos en los relevadores de tiempo inverso, debido a la duración de la corriente de falla, éstos no completan su recorrido, por lo tanto no emiten la señal de disparo hacia el interruptor.

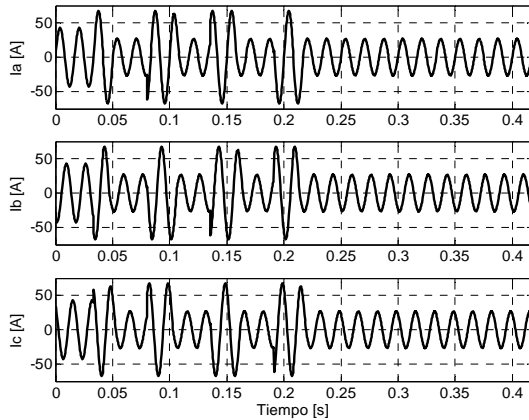


Figura 3.6.10. Corrientes medidas en el punto **A**, para una falla **F2** trifásica, **abc**.

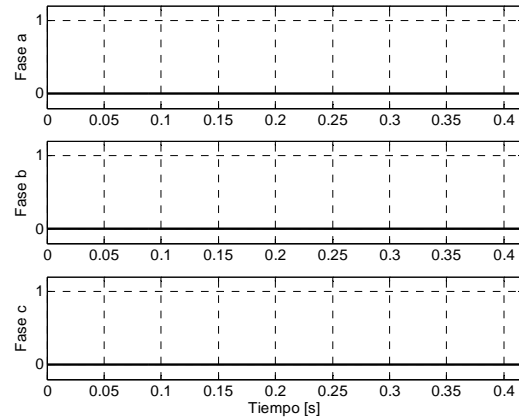


Figura 3.6.11. Señales de salida del **Relé 50/51**.

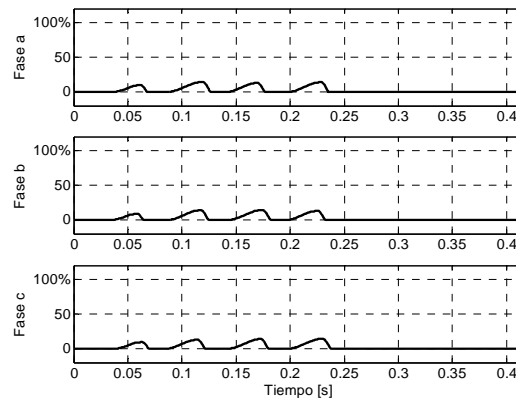


Figura 3.6.12. Recorrido de los discos en los relevadores **R-51**.

### 3.6.4 Evaluación del esquema de protección para la falla **F1**.

El **Relé 50/51**, está constituido por un relevador instantáneo **R-50** y uno de tiempo inverso **R-51**, para cada fase. Para evaluar la operación del relevador de sobrecorriente de tiempo inverso **R-51**, se simula una falla **F1** monofásica (**a-T**). La falla se aplica a los dos ciclos y persiste hasta el final de la simulación.

En la figura 3.6.13, se observan las corrientes primarias medidas en el punto **A**, correspondientes a las señales de corriente que mide el **Rele 50/51**. En la figura 3.6.13, se observa que la magnitud de corriente de falla persiste durante 4.5 ciclos antes de que el relevador **R-51**, correspondiente a la fase a, emita la señal de disparo (véase la figura 3.6.14) hacia el interruptor, y finalmente se desconecta el elemento fallado.

La señal de disparo es emitida, cuando el disco del relevador **R-51** (correspondiente a la fase **a**) completa su recorrido (véase la figura 3.6.15), el cuál, se re-posiciona después de un cierto tiempo.

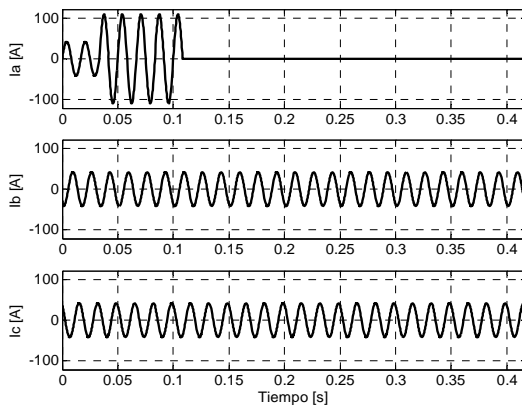


Figura 3.6.13. Corrientes medidas en el punto **A**, para una falla **F1** monofásica, **a-T**.

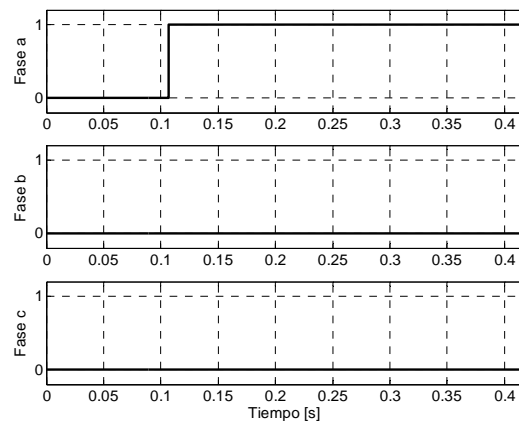


Figura 3.6.14. Señales de salida del **Rele R50/51**.

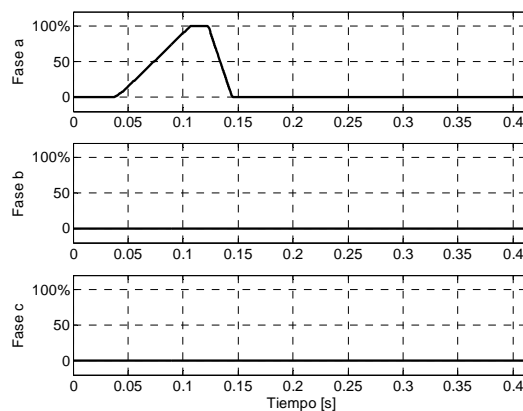


Figura 3.6.15. Recorrido de los discos en los relevadores **R-51**.

Para evaluar la operación de los relevadores instantáneos **R-50**, se simula una falla **F1** trifásica sólida. La falla se aplica a los dos ciclos y persiste hasta el final de la simulación.

En la figura 3.6.16, se observan las corrientes primarias medidas en el punto **A**, correspondientes a las señales de corriente que mide el **Rele 50/R51**. La magnitud de la corriente de falla persiste aproximadamente un ciclo, antes de que los relevadores correspondientes a cada fase, emitan la señal de disparo (véase la figura 3.6.17) hacia el interruptor.

Las señales de disparo son emitidas por los relevadores instantáneos, sin embargo, los discos en los relevadores de tiempo inverso, no completaron su recorrido (véase la figura 3.6.18), por lo tanto, éstos no envían la señal de disparo.

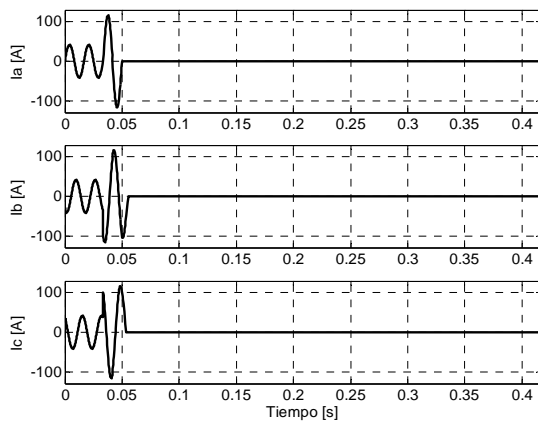


Figura 3.6.16. Corrientes medidas en el punto **A**, para una falla **F1** trifásica, **abc**.

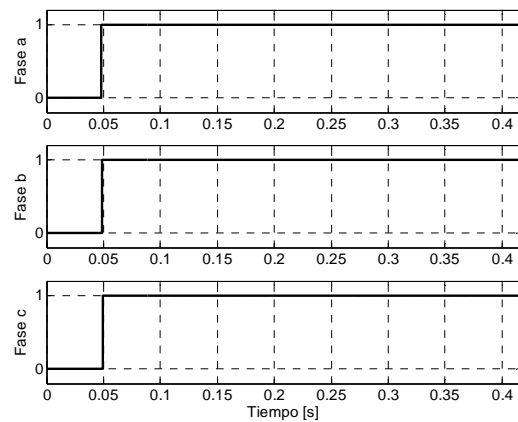


Figura 3.6.17. Señales de salida del **Rele 50/51**.

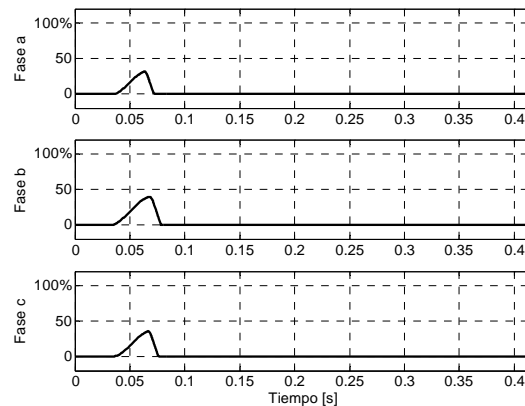


Figura 3.6.18. Recorrido de los discos en los relevadores **R-51**.



## **CAPÍTULO 4:**

### **EVALUACIÓN Y COORDINACIÓN DE LOS DISPOSITIVOS DE SOBRECORRIENTE EN CONDICIONES DE SEÑALES DISTORSIONADAS.**

#### **4.1 Introducción.**

Normalmente los ajustes para las protecciones están basados en el análisis de los sistemas eléctricos en condiciones de operación con voltajes y corrientes considerando cargas y fallas lineales, es decir, con forma de onda puramente senoidal [13, 22, 47,48, 49]. Sin embargo, la forma de onda de las corrientes y voltajes es distorsionada debido a cargas y/o condiciones de fallas no lineales, provocando como consecuencia que en algunos casos se pierda la coordinación en la operación de dichos dispositivos.

En este capítulo se evalúa la operación de los dispositivos de protección modelados en el capítulo tres, los ajustes para la coordinación de estos dispositivos se realiza en primera instancia considerando condiciones de carga y falla lineal. Después de validar la operación de los dispositivos de protección con los ajustes realizados, se evalúa nuevamente su operación, pero ahora en condiciones de corrientes distorsionadas, es decir con carga y/o falla no lineal, además en algunos casos se simula la variación del régimen nominal de carga. En la última parte de este capítulo, se evalúan los resultados de las simulaciones realizadas, y se proponen nuevos ajustes, los cuales deberán proporcionar una coordinación adecuada.

Las condiciones de carga y falla no lineal se simulan con módulos y/o sistemas construidos a partir de elementos de las librerías del software PSCAD/EMTDC, además, se creó un programa en MatLab para realizar la representación gráfica de los datos obtenidos de las simulaciones.

## 4.2 Evaluación de los fusibles en condiciones de corrientes distorsionadas por carga nominal no-lineal.

El diagrama de la figura 4.2.1, permite simular un sistema de prueba para evaluar la operación de los fusibles en condiciones de carga lineal o no-lineal, y falla lineal. En el módulo **CONTROL DE FALLAS** de la figura 4.2.1, se selecciona el tipo, tiempo de inicio y tiempo de duración de la falla, y además, se puede seleccionar entre una carga lineal y un módulo que simula una carga no lineal. El módulo **FFT** obtiene la transformada rápida de Fourier de las señales de corriente medidas en cada una de las líneas que alimentan a la carga, y en su caso al módulo de fallas. El módulo **FFT** permite obtener la magnitud **rms** de cada un de los componentes armónicos de la señal respectiva de corriente.

Se emplea el mismo sistema eléctrico de prueba del capítulo tres, el cual evalúa la operación de los fusibles. Los parámetros de ajuste para el módulo de carga no-lineal se encuentran en el apéndice C-1.

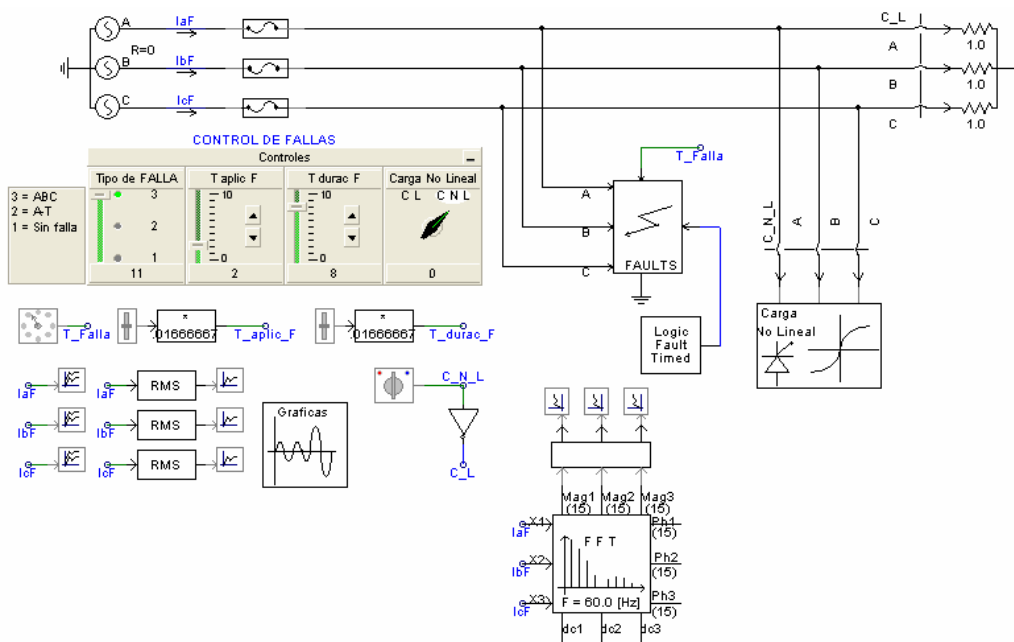


Figura 4.2.1 Diagrama en PSCAD para la simulación y evaluación de los fusibles con señales de corriente distorsionadas.

### 4.2.1 Ajuste y evaluación de los fusibles en condiciones de carga lineal.

Para proponer los ajustes en los fusibles, se realizan las siguientes simulaciones del sistema de prueba:

- Condición de carga nominal.
- Falla monofásica de la fase **a** a tierra, **a-T**.
- Falla trifásica, **abc**.

Las gráficas de barras de las figuras 4.2.2, 4.2.3 y 4.2.4, muestran el espectro armónico de la señal de corriente correspondientes a la fase **a** (la magnitud en las barras están dadas en valor **rms**). Como las condiciones de carga y falla son lineales únicamente se observa la armónica correspondiente a la componente fundamental ( $h1^*$ ).

Así, en la figura 4.2.2, el valor de  $h1$  es de 1 A para condición de carga nominal, en la figura 4.2.3, la magnitud de corriente en una falla **a-T** es de 2 A, finalmente, para una falla **abc** la magnitud de corriente es de 4 A.

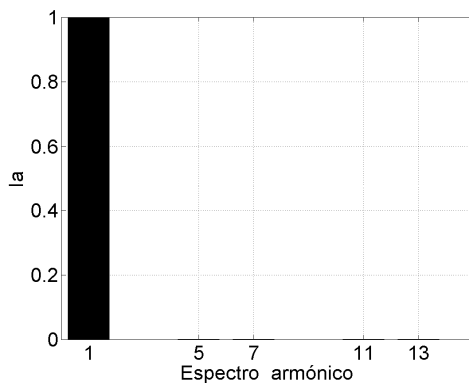


Figura 4.2.2. Espectro armónico de la señal de corriente para carga lineal nominal.

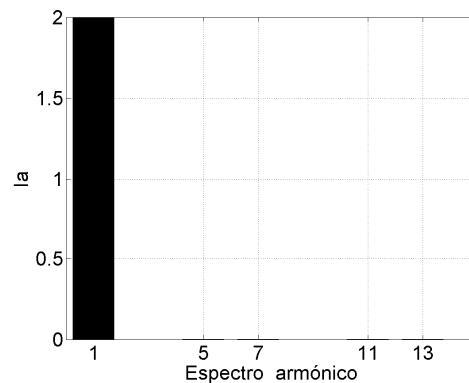


Figura 4.2.3. Espectro armónico de la señal de corriente para falla monofásica a tierra, **a-T**.

Si se permite una variación en la corriente nominal del 25%, entonces se ajustan los fusibles para que soporten una corriente de 1.25 A-**rms** de manera permanente, es decir, sin que se funda o

---

\*  $h1$  se emplea para indicar el armónico de frecuencia fundamental (60 Hz).



sufra algún esfuerzo térmico. El fusible se deberá fundir para desconectar el elemento fallado cuando por él pasen  $2 A\text{-rms}$  de la componente fundamental después de un máximo de 6.5 ciclos (los valores de los ajustes se encuentra en el apéndice C-1).

#### 4.2.1.1 Evaluación de los fusibles en condiciones de carga nominal lineal.

En la figura 4.2.5, se observan las formas de onda correspondientes a las corrientes primarias en las fases **a**, **b** y **c**, respectivamente. Debido a que la carga es lineal, las formas de las corrientes corresponden a señales senoidales fundamentales, es decir con frecuencia de 60 Hz. El valor **rms** de cada fase se observa en la figura 4.2.6.

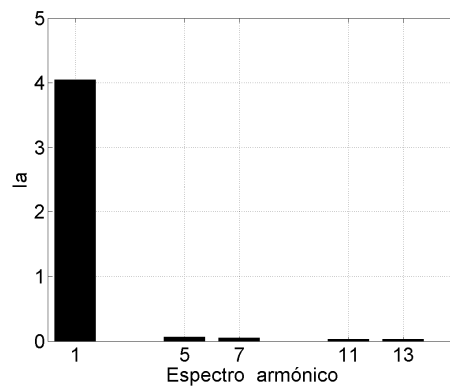


Figura 4.2.4. Espectro armónico\* de la señal de corriente para falla trifásica, **abc**.

Como el valor **rms** de las señales de corriente no supera el valor de ajuste en los fusibles, estos no se funden como se puede observar en la figura 4.2.7.

---

\* Los valores del eje horizontal de la gráfica corresponden a los múltiplos de la frecuencia fundamental.

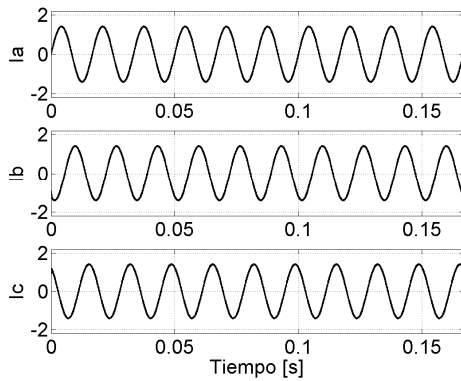


Figura 4.2.5. Formas de onda de las corrientes,  $I_{abc}^* = 1.414$  A-pico.

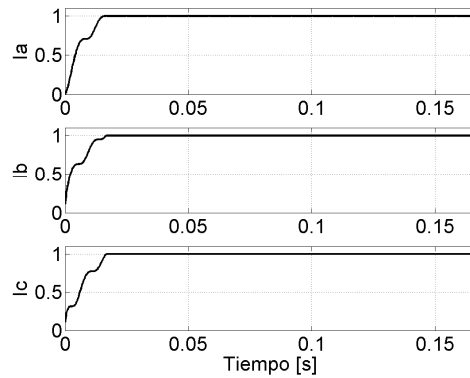


Figura 4.2.6. Valores **rms** de las señales de corriente,  $I_{abc} = 1.0$  A.

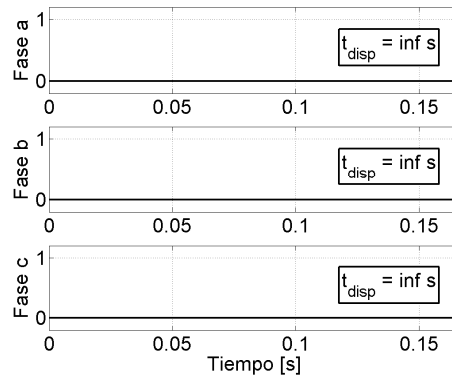


Figura 4.2.7. Estados de operación de los fusibles.

#### 4.2.1.2 Evaluación de los fusibles en condiciones de falla a-T.

Para una falla **a-T**, el valor **rms** de la corriente en la fase **a** sí supera el ajuste del fusible (véase la figura 4.2.9), por lo tanto el fusible que provee protección a dicha fase se funde desconectando el elemento fallado (véase figura 4.2.10). En la figura 4.2.8, se observa que después de 6.5 ciclos el fusible liberó la condición de falla, esto verifica los ajustes realizados en los módulos. La desconexión del elemento fallado se realiza hasta que la corriente cruza por cero, puesto que así se diseñaron los módulos para los fusibles.

---

\* Se emplea  $I_{abc}$ , para indicar que  $I_a$ ,  $I_b$  e  $I_c$  tiene la misma magnitud.

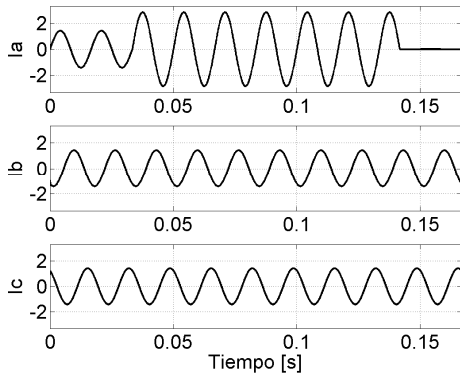


Figura 4.2.8. Formas de onda de las corrientes,  $I_{a_{\max}}^* = 2.828 \text{ A-pico}$

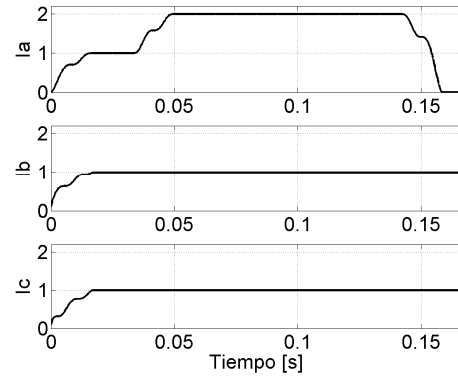


Figura 4.2.9. Valores **rms** de las señales de corriente,  $I_{a_{\max}} = 2.0 \text{ A}$ .

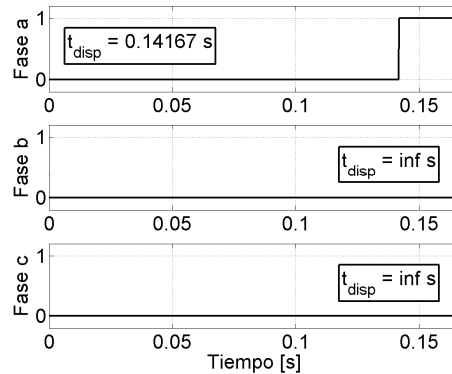


Figura 4.2.10. Estados de operación de los fusibles.

### 4.2.1.3 Evaluación de los fusibles en condiciones de falla trifásica abc.

Finalmente, para una falla trifásica **abc**, se observa en la figura 4.2.11 y 4.2.12 que los fusibles desconectaron la condición de falla después de 3 ciclos (con respecto a la fase **a**).

\* Se emplea  $I_{a_{\max}}$  para indicar la magnitud máxima de **Ia**.

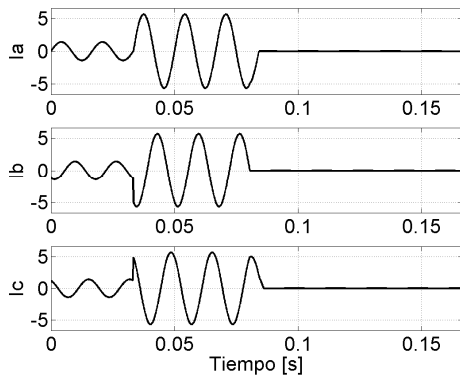


Figura 4.2.11. Formas de onda de las corrientes,  $I_{abc_{max}}^* = 5.657$  A-pico.

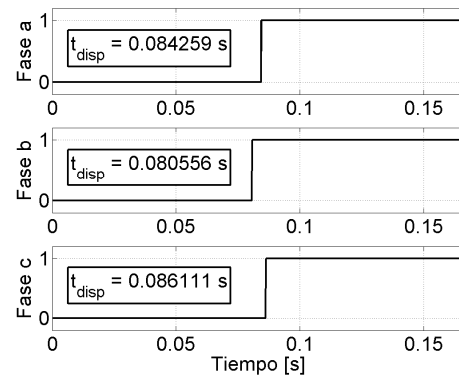


Figura 4.2.12. Estados de operación de los fusibles.

## 4.2.2 Evaluación de los fusibles en condiciones de carga no-lineal.

En el sistema de prueba de la figura 4.2.1, se selecciona el módulo de carga no-lineal, esto con la finalidad de obtener formas distorsionadas de onda y evaluar en estas condiciones la operación de los fusibles, los cuales ya han sido ajustados en base a carga y fallas lineales.

### 4.2.2.1 Evaluación de los fusibles en condiciones de carga nominal no-lineal.

El módulo simula una carga no-lineal correspondiente a un rectificador trifásico de 6 pulsos [23]. La figura 4.2.13, muestra el espectro armónico de la señal de corriente correspondiente a la fase **a** (las magnitudes en las barras están dadas en valor **rms**), el espectro armónico para las dos fases restantes es similar.

Para la condición de carga nominal no-lineal, se mantiene el valor **rms** de la componente fundamental de la corriente h1 (con respecto a la condición nominal de carga lineal), sin embargo el valor **rms** total aumenta debido al alto espectro armónico (véase la figura 4.2.15). La magnitud **rms** de la corriente supera el valor de ajuste de 1.25 A de los fusibles, en función a esto, los fusibles se funden desconectando la carga (véase la figura 4.2.14 y 4.2.16), esto sucede sin que exista alguna condición de falla en el sistema.

---

\* Se emplea  $I_{abc_{max}}$ , para indicar que **Ia**, **Ib** e **Ic** tiene la misma magnitud máxima.

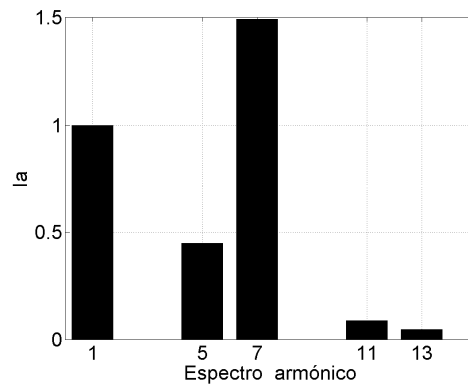
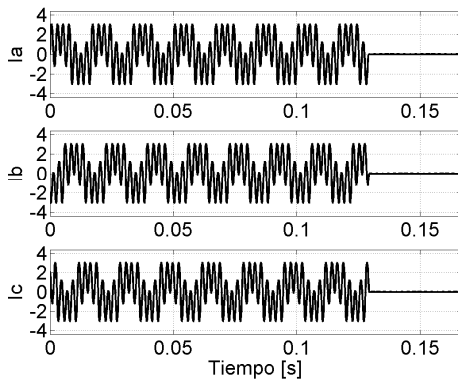
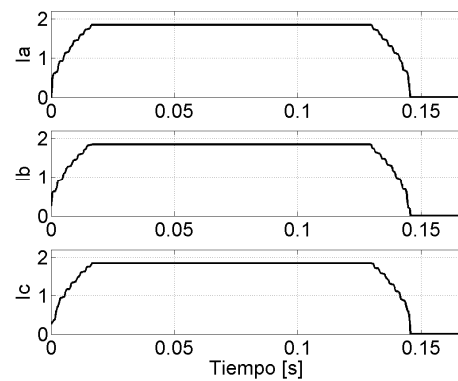


Figura 4.2.13. Espectro armónico de las señales de corriente.

Figura 4.2.14. Formas de onda de las corrientes,  $I_{abc_{max}}=3.1$  A-pico.Figura 4.2.15. Valores **rms** de las señales de corriente,  $I_{abc_{max}}=1.851$  A.

Para este caso, los fusibles han operado de manera inesperada, pues estos deberían de soportar sin fundirse el paso continuo de la corriente nominal de carga.

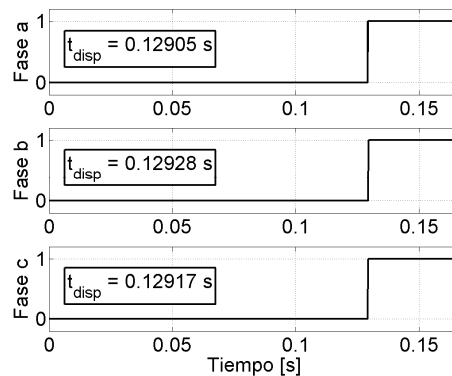


Figura 4.2.16. Estados de operación de los fusibles.

#### 4.2.2.2 Evaluación de los fusibles en condiciones de carga nominal no-lineal y falla a-T.

En condiciones de carga no-lineal y falla lineal **a-T**, se obtiene que el valor **rms** de la componente fundamental h1 es igual a 2 A, sin embargo, existen las demás componentes armónicas debidas a la carga no-lineal, como lo muestra el espectro armónico de la figura 5.2.17. Debido al espectro armónico el valor **rms** de la corriente de falla también aumenta con respecto al de una falla lineal (véase la figura 4.2.19).

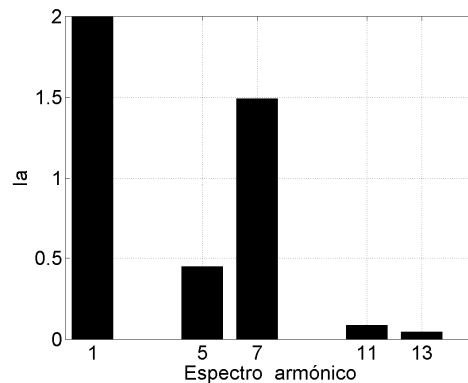


Figura 4.2.17. Espectro armónico de las señales de corriente.

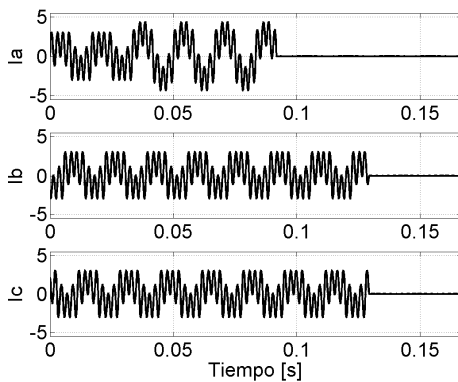


Figura 4.2.18. Formas de onda de las corrientes,  $I_{a_{max}}=4.4$  A-pico.

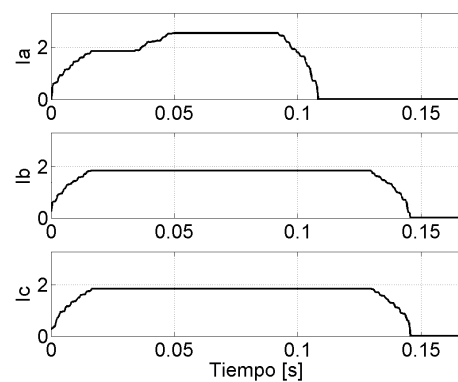


Figura 4.2.19. Valores **rms** de las señales de corriente,  $I_{a_{max}}=2.535$  A.

En función al aumento del valor **rms** de la señal de corriente para una falla **a-T**, el fusible desconecta el elemento fallado más rápidamente que para una falla lineal, como lo indica la gráfica correspondiente a la fase **a** de la figura 4.2.20.

La solución a este problema es seleccionar fusibles considerando la forma de onda de la corriente que demanda la carga no-lineal, es decir, tomar el valor **rms** de la forma de onda de la corriente demandada.

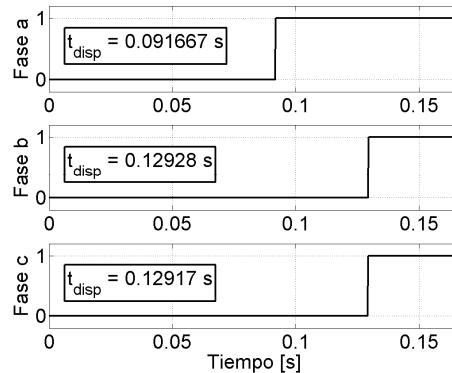


Figura 4.2.20. Estados de operación de los fusibles.

### 4.3 Evaluación del relevador 50/51 en condiciones de corrientes distorsionadas por carga nominal no-lineal y falla no-lineal.

Los ajustes en el relevador 50/51 se realizan considerando sólo la componente fundamental para las diferentes condiciones de carga nominal y de falla. Se proponen los ajustes para que se permita un margen máximo del 35% sobre el valor de la corriente de carga nominal.

El diagrama de la figura 4.3.1, permite simular un sistema de prueba para evaluar la operación del módulo **Rele 50/51** (relevadores 50 y 51) en condiciones de carga nominal lineal o no-lineal, y para diferentes tipos de falla lineal o no-lineal. En el módulo **CONTROL DE FALLAS** de la figura 4.3.1, se selecciona el tipo, tiempo de inicio y tiempo de duración de la falla, además, se puede seleccionar entre una carga lineal y un módulo que simula una carga no lineal. Para cada caso en particular se creó un módulo de falla, el cual permite simular ciertas condiciones de falla no-lineal que producen distorsión de la forma de onda de la corriente. El módulo **FFT** obtiene la transformada rápida de Fourier de las señales de corriente medidas en cada una de las líneas que alimentan a la carga. El módulo **FFT** permite obtener la magnitud **rms** de cada uno de los componentes armónicos de la señal respectiva de corriente.

Las curvas características de operación de los **R-51's**\* y para el restaurador, están basadas en el Estándar de IEEE de ecuaciones características de tiempo inverso para relevadores de sobrecorriente. Las constantes para la ecuación del estándar corresponden a la característica -moderadamente inversa- [46].

Se emplea el mismo sistema eléctrico de prueba del capítulo tres, el cual evalúa la operación del módulo **Rele 50/51**.

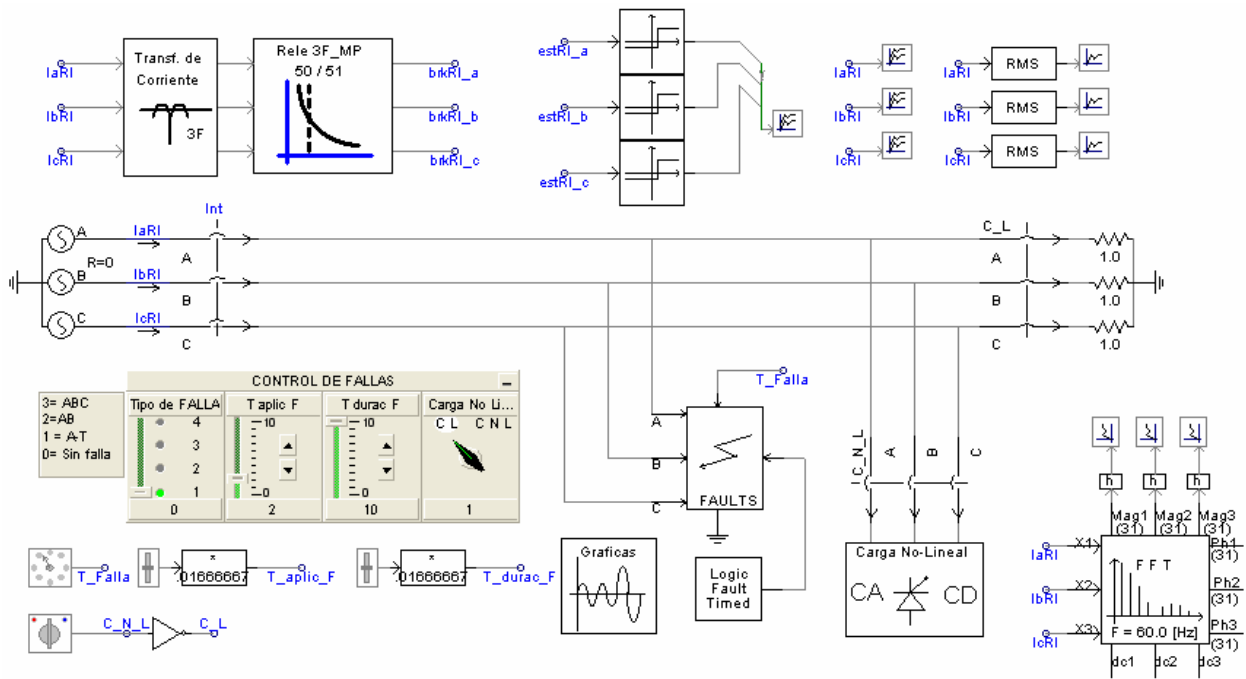


Figura 4.3.1. Diagrama en PSCAD para la simulación y evaluación del módulo **Rele 50/51** con señales de corriente distorsionadas.

### 4.3.1 Ajuste y evaluación del relevador 50/51 en condiciones de carga lineal.

Para proponer los ajustes del módulo **Rele 50/51**, se realizaron las siguientes simulaciones:

- Condición de carga nominal.
- Falla monofásica de la fase **a** a tierra, **a-T**.
- Falla bifásica entre las fases **a** y **b**, **ab**
- Falla trifásica, **abc**.

\* Se emplea **R-51's** para indicar el plural de relevador de sobrecorriente de tiempo inverso.



Las condiciones de falla se aplican en los dos ciclos, y permanecen hasta el final de la simulación.

Después de realizar las simulaciones, se obtiene las gráficas de barras de las figuras 4.3.2, 4.3.3, 4.3.4 y 4.3.5, las cuales muestran el espectro armónico de la señal de corriente nominal o falla, correspondiente a la fase **a**, donde la magnitud en las barras está dada en valor **rms**. Como las condiciones de carga y falla son lineales, únicamente se observa la armónica correspondiente a la componente fundamental.

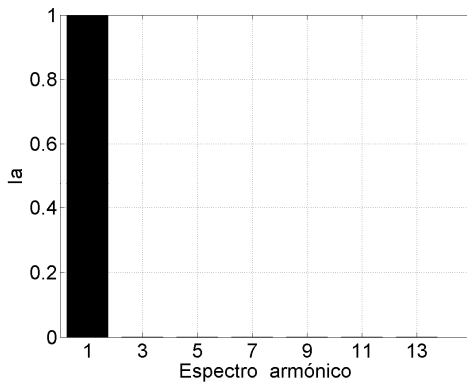


Figura 4.3.2. Espectro armónico de la señal de corriente para carga nominal lineal.

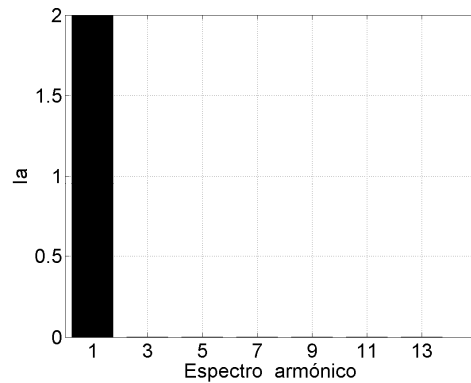


Figura 4.3.3. Espectro armónico de la señal de corriente para falla lineal monofásica a tierra, **a-T**.

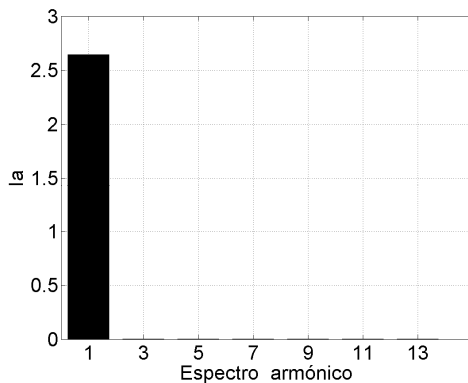


Figura 4.3.3. Espectro armónico de la señal de corriente para falla lineal bifásica, **ab**.

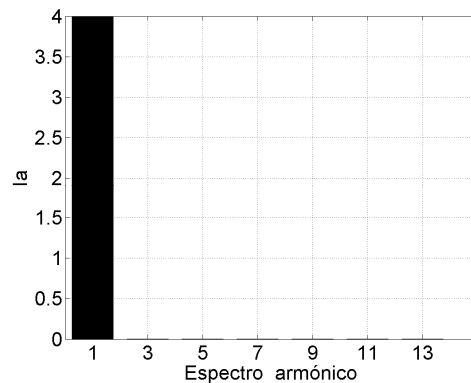


Figura 4.3.4. Espectro armónico de la señal de corriente para falla lineal trifásica, **abc**.

Los ajustes para los relevadores de tiempo inverso, deberán permitir un incremento del 35% en la corriente nominal antes de considerar una condición de falla. Para corrientes de falla monofásica, los relevadores de tiempo inverso tendrán que liberar la condición de falla de 2 A-**rms** en un máximo de seis ciclos. Por otro lado, para magnitudes de corrientes altas, como las debidas a una falla trifásica **abc**, serán los relevadores instantáneos los que liberen la condición de falla. Los ajustes en los relevadores instantáneos, se realizan considerando el máximo valor pico absoluto que se permita en el sistema eléctrico. En este caso, el valor pico correspondiente a una falla lineal trifásica **abc** es de 5.65 A-**pico** (  $4 Arms * \sqrt{2}$  ). Para este caso en particular, se requiere que el relevador instantáneo libere sólo fallas trifásicas, es decir, que para el resto de fallas deberá operar el relevador de tiempo inverso. Entonces los ajustes del relevador deberán ser tales que permitan corrientes debidas a fallas bifásicas, pero que hagan que operen los relevadores instantáneos para corrientes debidas a fallas trifásicas. Si para una falla bifásica, el valor pico es de 3.74 A-**pico**, y para una falla trifásica es de 5.65 A-**rms**, entonces, se ajustan los relevadores instantáneos para un máximo valor pico absoluto de 5 A, este ajuste asegura que los relevadores operarán para una falla trifásica y no operarán para una falla bifásica.

Los valores de los ajustes se encuentran en el apéndice C-2.

#### **4.3.1.1 Evaluación de los relevadores en condiciones de carga nominal no-lineal.**

En la figura 4.3.5, se observa la forma de onda de las corrientes primarias en las fases **a**, **b** y **c**. La forma de onda es senoidal debido a que la carga es lineal.

Puesto que el valor **rms** no supera el valor de ajuste en los relevadores, éstos no emiten ninguna señal de disparo, como se observa en la figura 4.3.6.

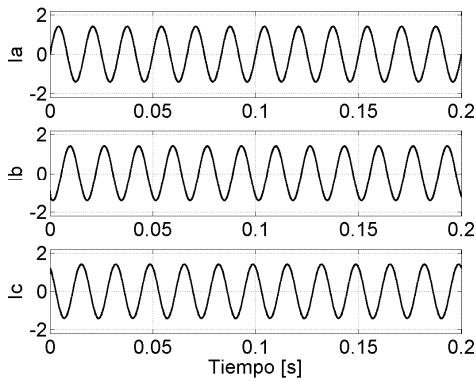


Figura 4.3.5. Forma de onda de las corrientes,  $I_{abc_{max}}=1.414$  A-pico.

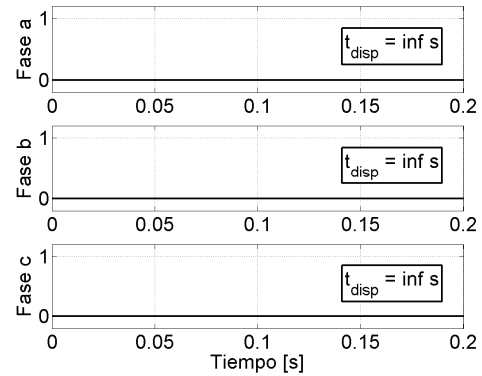


Figura 4.3.6. Estados de operación de los relevadores de tiempo inverso.

### 4.3.1.2 Evaluación de los relevadores en condiciones de falla monofásica a-T.

Para una falla monofásica **a-T**, la corriente en la fase **a** superó el valor de ajuste del respectivo relevador, por lo tanto, el disco del relevador de la fase **a** empieza a desplazarse (véase la figura 4.3.8), hasta que alcanza el 100% de sus recorrido y finalmente emite la señal de disparo. En la figura 4.3.9, se observa que la señal de disparo se emite un poco después de los seis ciclos de falla, sin embargo la falla se liberó en los 6.5 ciclos (véase figura 4.3.7), esto se debe a que el interruptor abre sus contactos hasta que la corriente de falla cruza por cero.

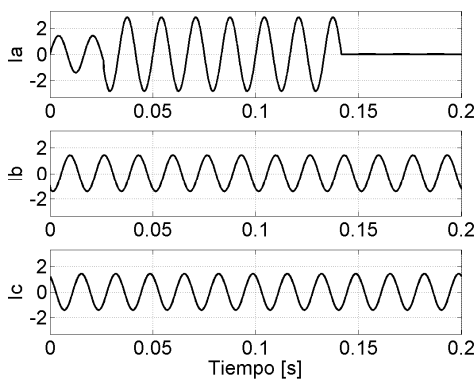


Figura 4.3.7. Forma de onda de las corrientes,  $I_{a_{max}}=2.828$  A-pico.

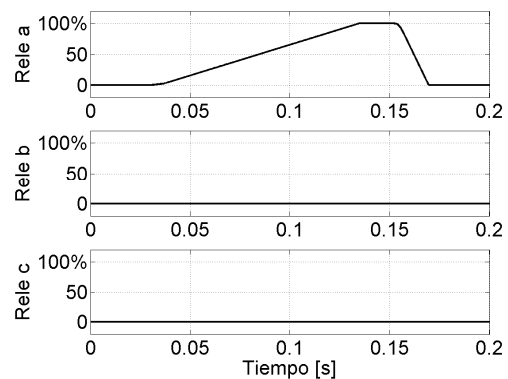


Figura 4.3.8. Recorrido de los discos en los relevadores de tiempo inverso.

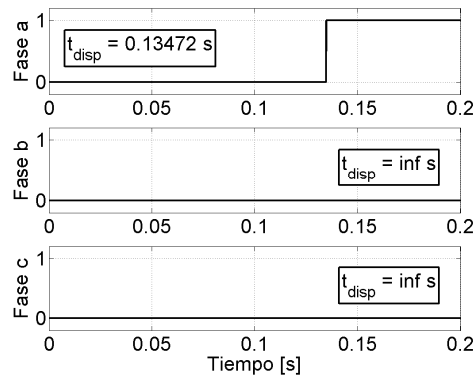


Figura 4.3.9. Estados de operación de los relevadores de tiempo inverso.

#### 4.3.1.3 Evaluación de los relevadores en condiciones de falla bifásica ab.

En la simulación para una falla bifásica **ab** las corrientes debidas a ésta son mayores que en una falla **a-T**, por lo cual la condición de falla es liberada en menor tiempo (véase figura 4.3.10). Después de que ocurre la falla, los discos de los relevadores de las fases **a** y **b**, respectivamente, requieren aproximadamente 4.5 ciclos para completar su recorrido (véase figura 4.3.11) y finalmente emitir la señal de disparo para el interruptor (véase figura 4.3.12), el cual desconectará la condición de falla.

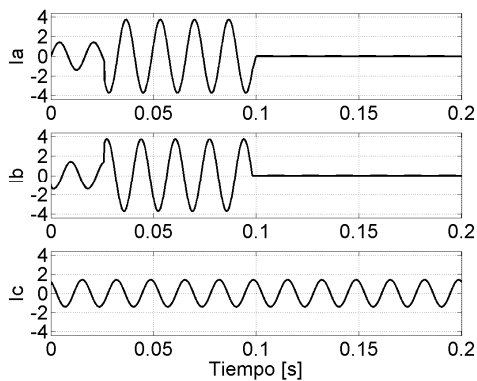


Figura 4.3.10. Forma de onda de las corrientes,  $I_{ab_{max}}^* = 3.74$  A-pico.

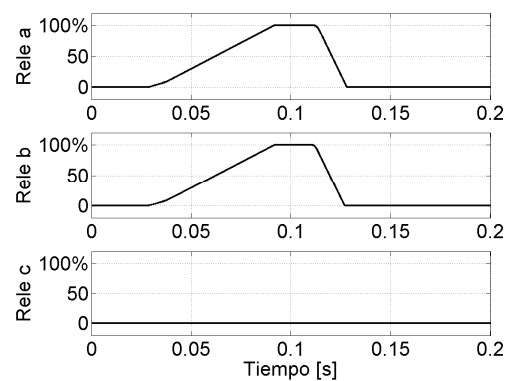


Figura 4.3.11. Recorrido de los discos en los relevadores de tiempo inverso.

\* Se emplea  $I_{ab_{max}}^*$ , para abreviar que  $I_a$  e  $I_c$  tiene la misma magnitud máxima.

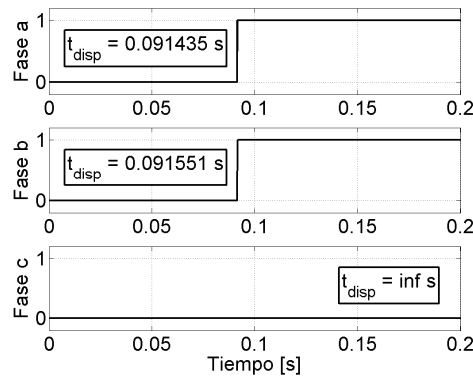


Figura 4.3.12. Estados de operación de los relevadores de tiempo inverso.

#### 4.3.1.4 Evaluación de los relevadores en condiciones de falla trifásica abc.

Debido al incremento de las magnitudes de las corrientes en una falla trifásica, se superan los ajustes de los relevadores instantáneos (**R-50**<sup>\*</sup>), siendo éstos los que emiten las señales de disparo para los respectivos interruptores (véase figura 4.3.15). La condición de falla sólo persiste aproximadamente medio ciclo, como se observa en la figura 4.3.13. Puesto que la condición de falla fue liberada casi de manera instantánea por **R-50**, los discos de los relevadores de tiempo inverso no completaron su recorrido (véase la figura 4.3.14).

Después de evaluar la operación de los relevadores para carga nominal lineal y en los diferentes tipos de falla lineal, se concluye que éstos operan de manera correcta según los ajustes realizados.

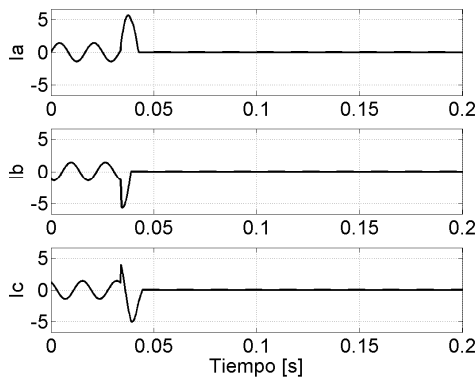


Figura 4.3.13. Forma de onda de las corrientes,  $I_{abc_{max}}=5.657$  A-pico.

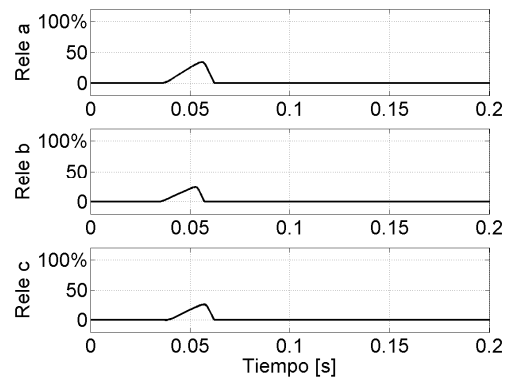


Figura 4.3.14. Recorrido de los discos en los relevadores de tiempo inverso.

\* Se emplea **R-50** para abreviar: relevador de sobrecorriente instantáneo.

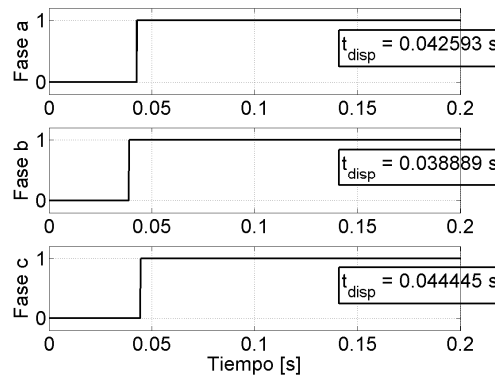


Figura 4.3.15. Estados de operación de los relevadores de tiempo inverso.

### 4.3.2 Evaluación de los relevadores en condiciones de corrientes distorsionadas.

Una vez que se han validado los ajustes en el módulo **Rele 50/51** según las condiciones de carga nominal lineal y fallas lineales, se procede a evaluar la operación de los relevadores (conservando los ajustes realizados) en condiciones de carga nominal no-lineal, y para fallas no-lineales.

#### 4.3.2.1 Evaluación de los relevadores considerando condiciones de carga nominal no-lineal.

Para este caso, se considera una fuente trifásica in-interrumpible de voltaje [13], el valor rms de sus componentes armónicas se observan en la figura 4.3.16. Las formas de onda de las corrientes debidas a esta carga se observa en la figura 4.3.17.

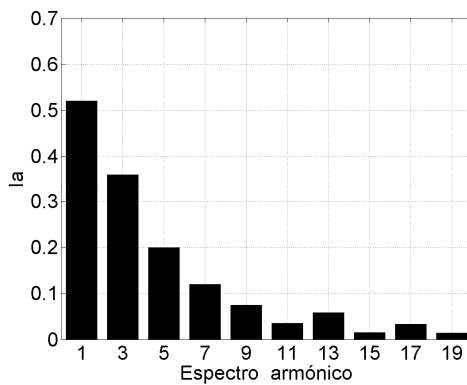


Figura 4.3.16. Espectro armónico de las señales de corriente.

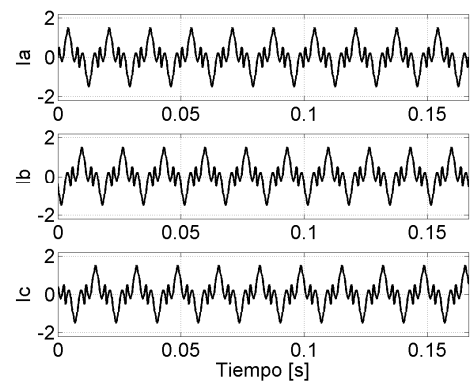


Figura 4.3.17. Formas de onda de las corrientes,  $I_{abc_{max}}=1.506$  A-pico.

Los relevadores no operan, puesto que el valor rms de las señales de corriente (véase la figura 4.3.18) no supera el valor de ajuste. La operación de los relevadores en este caso es correcta, pues no operan para condiciones de carga nominal (véase la figura 4.3.19).

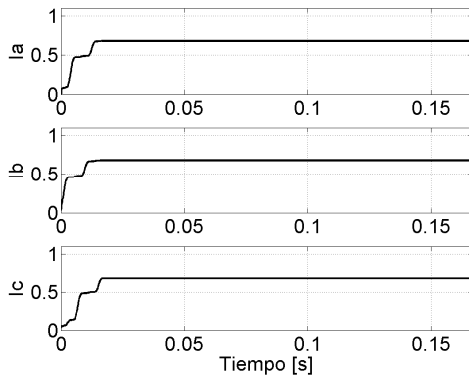


Figura 4.3.18. Valor **rms** de las corrientes,  $I_{abc}=0.683$  A.

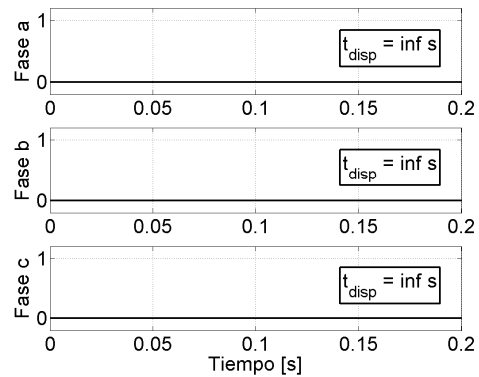


Figura 4.3.19. Estados de operación de los relevadores.

#### 4.3.2.2 Evaluación considerando condiciones no lineales para una falla monofásica a-T.

En el módulo de **CONTROL DE FALLAS** de la figura 4.3.1, se selecciona una carga lineal y una falla a-T no lineal [14]. En la figura 4.3.20, se observa el espectro armónico de la corriente en la condición de falla. Obsérvese que la barra correspondiente al armónico 1 de la figura 4.3.20, es igual en magnitud a la magnitud debida a una falla lineal a-T (véase la figura 4.3.3), sin embargo, el resto del espectro armónico distorsiona la señal de corriente (véase la figura 4.3.21) e incrementa el valor **rms** de la señal de corriente en una falla a-T, como se observa en la figura 4.3.22. Debido al incremento del valor **rms** en la corriente de falla, el relevador opera en un menor tiempo (véase la figura 4.3.23), liberando la condición de falla en 5.5 ciclos, esto es un ciclo menos que cuando la condición de falla es lineal. Este decremento de tiempo en la operación del relevador causaría la pérdida de coordinación en un esquema de protección, ya que no permitiría que otros dispositivos de protección instalados aguas abajo liberen la condición de falla en su zona de protección, de tal manera, que se desconectarían elementos del sistema sin que estos hubiesen experimentado alguna condición de falla.

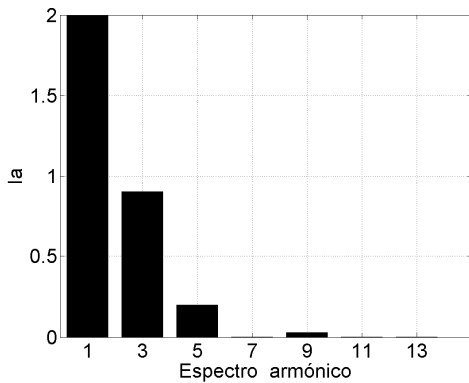


Figura 4.3.20. Espectro armónico de las señales de corriente.

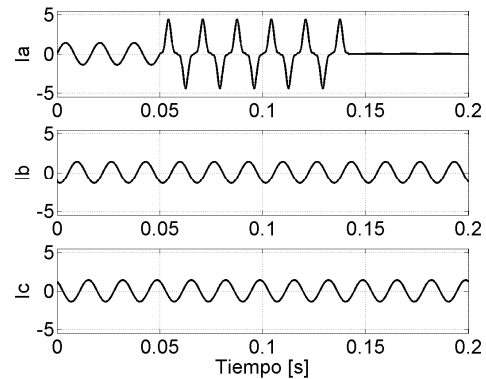


Figura 4.3.21. Formas de ondas de las corrientes,  $I_{a_{\max}}=4.425$  A-pico

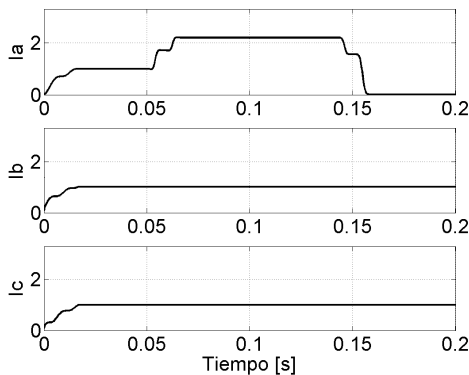


Figura 4.3.22. Valor **rms** de las corrientes,  $I_{a_{\max}}=2.202$  A.

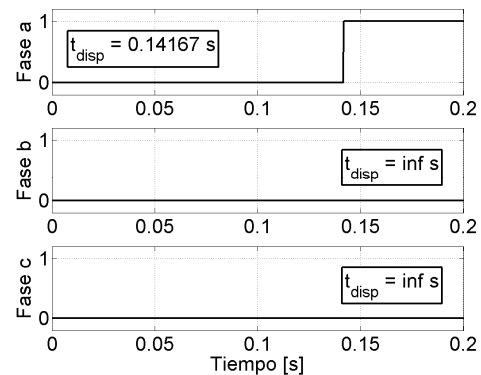


Figura 4.3.23. Estados de operación de los relevadores.

### 4.3.2.3 Evaluación considerando condiciones no lineales para una falla bifásica ab.

En el módulo de **CONTROL DE FALLAS** de la figura 4.3.1, se selecciona una carga lineal y una falla **ab** no lineal [14]. En la figura 4.3.24, se observa el espectro armónico de las señales de corriente para la condición de falla bifásica **ab**. Aunque la magnitud de la barra 1 correspondiente al armónico fundamental en la figura 4.3.24, es igual al de la barra correspondiente en la figura 4.3.2, el valor pico de la señal de corriente en la condición de falla se incrementa por arriba de los 5 A-pico, como se observa en la figura 4.3.25. El incremento del valor pico en la señal de corriente se debe a la presencia del tercer armónico, el cual está desfasado 180 grados con respecto a la componente fundamental (véase la figura 4.3.24).



Como se observa en la figura 4.3.26, el valor **rms** de las señales de corriente correspondientes a las fases falladas no se incrementó considerablemente, sin embargo, el valor pico de las señales de corriente superó el valor de ajuste en los **R-50's**<sup>\*</sup>, permitiendo que éstos operen (véase la figura 4.3.27) liberando así, la condición de falla.

Esta es una operación incorrecta, pues se esperaba, según la magnitud **rms** de las señales de corriente, que los respectivos **R-51's** liberarán la condición de falla, y no los **R-50's**. Con esta operación incorrecta, es de esperarse una pérdida de coordinación en los esquemas de protección. Por ejemplo, para un esquema de protección que emplease un restaurador aguas abajo, esta mala operación del relevador, no permitiría que el restaurador realizara su secuencia de operación, por lo que se desconectarían más elementos del sistema o red eléctrica.

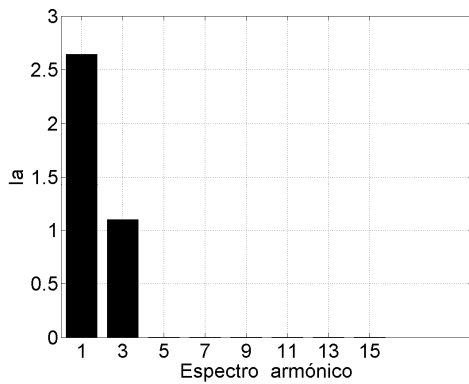


Figura 4.3.24. Espectro armónico de las señales de corriente.

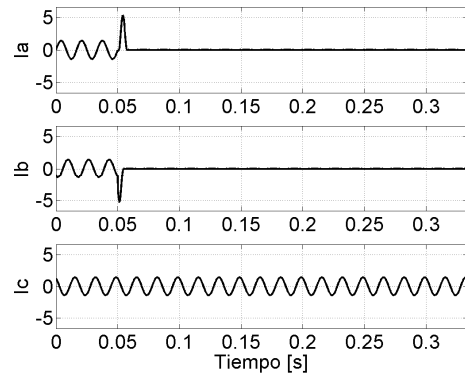


Figura 4.3.25. Formas de ondas de las corrientes,  $I_{abc_{max}} = 5.296$  A-pico.

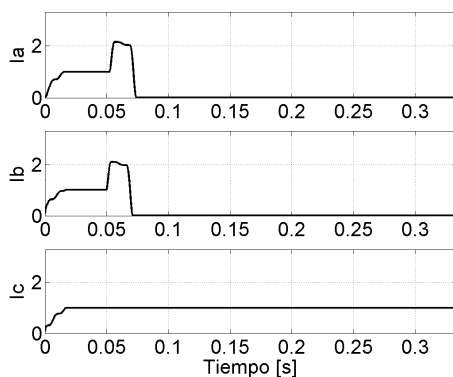


Figura 4.3.26. Valor **rms** de las corrientes,  $I_{ab_{max}} = 2.865$  A.

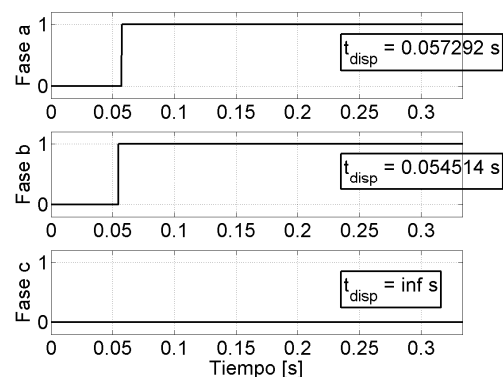


Figura 4.3.27. Estados de operación de los relevadores.

\* Se emplea para abreviar el plural de: relevador instantáneo.

#### 4.3.2.4 Evaluación considerando condiciones no lineales para una falla trifásica abc.

En el módulo de **CONTROL DE FALLAS** de la figura 4.3.1, se selecciona una carga lineal y una falla trifásica no lineal [14]. En la figura 4.3.28, se observa el espectro armónico de las señales de corriente para la condición de falla trifásica, **abc**. Aunque la magnitud de la barra uno correspondiente al armónico fundamental en la figura 4.3.29, es igual al de la barra correspondiente en la figura 4.3.3, el valor pico de la señal de corriente en la condición de falla se decremento, como se observa en la figura 4.3.29. Sin embargo el valor **rms** (véase la figura 4.3.30) está por arriba del valor permisible, por lo tanto, podría dañar los elementos del sistema o red eléctrica. El decremento del valor **pico** en la señal de corriente se debe a la presencia del tercer armónico (véase la figura 4.3.28).

Como se observa en la figura 4.3.30, el valor **rms** es mayor a 4 A, esto supera el valor de corriente que se debe permitir circular en el sistema o red eléctrica, es decir, esta condición de falla debería ser liberada de manera instantánea por los **R-50's**, según los ajustes realizados en el apartado 4.3.1, sin embargo, debido a que el valor pico no supera el valor de ajuste en los **R-50's**, éstos no emiten la señal de disparo correspondiente.

Como se observa en la figura 4.3.28, la condición de falla persiste durante aproximadamente tres ciclos, hasta que finalmente son los relevadores de tiempo inverso los que liberan la condición de falla (véase la figura 4.3.31).

Esta es una operación incorrecta, y dañaría los elementos del sistema o red eléctrica, y en ciertos casos pondría en riesgo la estabilidad de los sistemas eléctricos, ya que esta condición de falla demanda una gran cantidad de energía durante un intervalo de tiempo mayor al esperado.

Para evitar estas malas operaciones en los relevadores, es necesario tomar en cuenta la forma de onda de las señales de corriente para condiciones de carga nominal y en los diferentes tipos de fallas.

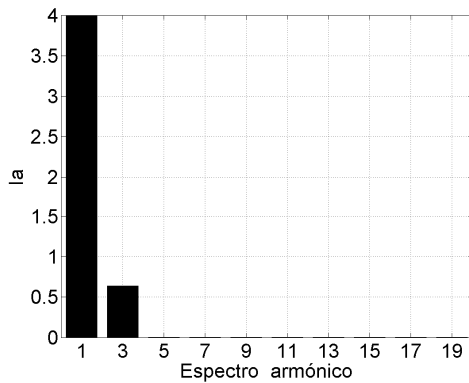


Figura 4.3.28. Espectro armónico de las señales de corriente.

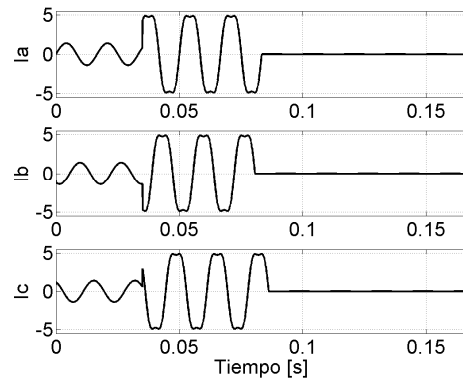


Figura 4.3.29. Formas de ondas de las corrientes,  $I_{abc_{max}}=4.8$  A-pico.

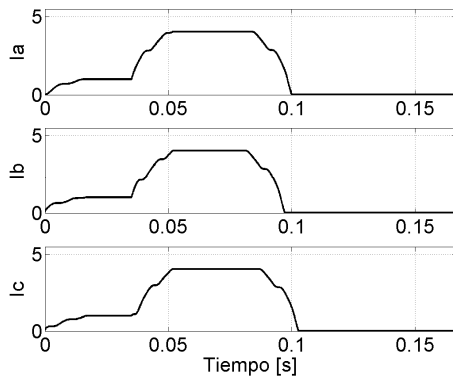


Figura 4.3.30. Valor **rms** de las corrientes,  $I_{abc_{max}}=4.05$  A.

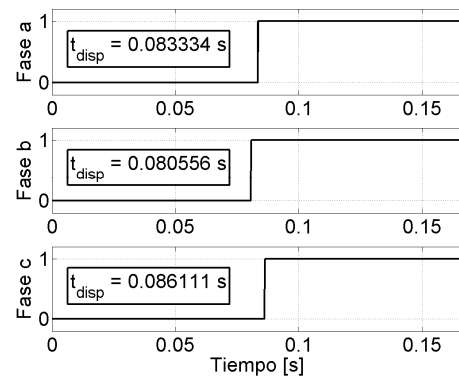


Figura 4.3.31. Estados de operación de los relevadores.

#### 4.4 Evaluación del restaurador en condiciones de corrientes distorsionadas por carga no lineal considerando variación del régimen de carga nominal.

Los ajustes en el restaurador se realizan considerando sólo la componente fundamental para las diferentes condiciones de carga nominal y de falla. Se proponen los ajustes para que se permita un margen máximo del 30% sobre el valor de la corriente de carga nominal.

El diagrama de la figura 4.4.1, permite simular un sistema de prueba para evaluar la operación del restaurador en condiciones de carga nominal lineal o no-lineal, y para diferentes tipos de falla lineal. En el módulo **CONTROL DE FALLAS** de la figura 4.4.1, se selecciona el tipo, tiempo de inicio y tiempo de duración de la falla, además, se puede seleccionar entre una carga lineal y

un módulo que simula una carga no lineal. Para este caso, se agregó un control al módulo **CONTROL DE FALLAS**, el cual permite variar la magnitud de la corriente demandada por la carga en el sistema de prueba. El módulo **FFT** obtiene la Transformada Rápida de Fourier de las señales de corriente medidas en cada una de las líneas que alimentan a la carga. El módulo **FFT** permite obtener la magnitud **rms** de cada uno de los componentes armónicos de la señal respectiva de corriente.

Se emplea el mismo sistema eléctrico de prueba del capítulo tres, el cual evalúa la operación del restaurador.

#### 4.4.1 Ajuste y evaluación del restaurador en condiciones de carga lineal.

Para proponer los ajustes del restaurador, se realizaron las siguientes simulaciones:

- Condición de carga nominal.
- Falla monofásica de la fase **a** a tierra, **a-T**.

La condición de falla se aplica en los dos ciclos, y permanece hasta el final de la simulación.

Después de realizar las simulaciones, se obtiene las gráficas de barras de las figuras 4.4.2, 4.4.3, las cuales muestran el espectro armónico de la señal de corriente nominal o falla, correspondiente a la fase **a**, donde la magnitud en las barras está dada en valor **rms**. Como las condiciones de carga y falla son lineales, únicamente se observa la armónica correspondiente a la componente fundamental.

Los ajustes en el restaurador deberán permitir un incremento de 30% en la corriente de carga. Se programa al restaurador para que realice dos operaciones rápidas y una última operación lenta antes de que abra de manera permanente los contactos de su interruptor. Para una falla mínima, es decir una falla monofásica **a-T**, el restaurador deberá realizar las operaciones rápidas en tres ciclos, y la operación lenta en 7 ciclos.

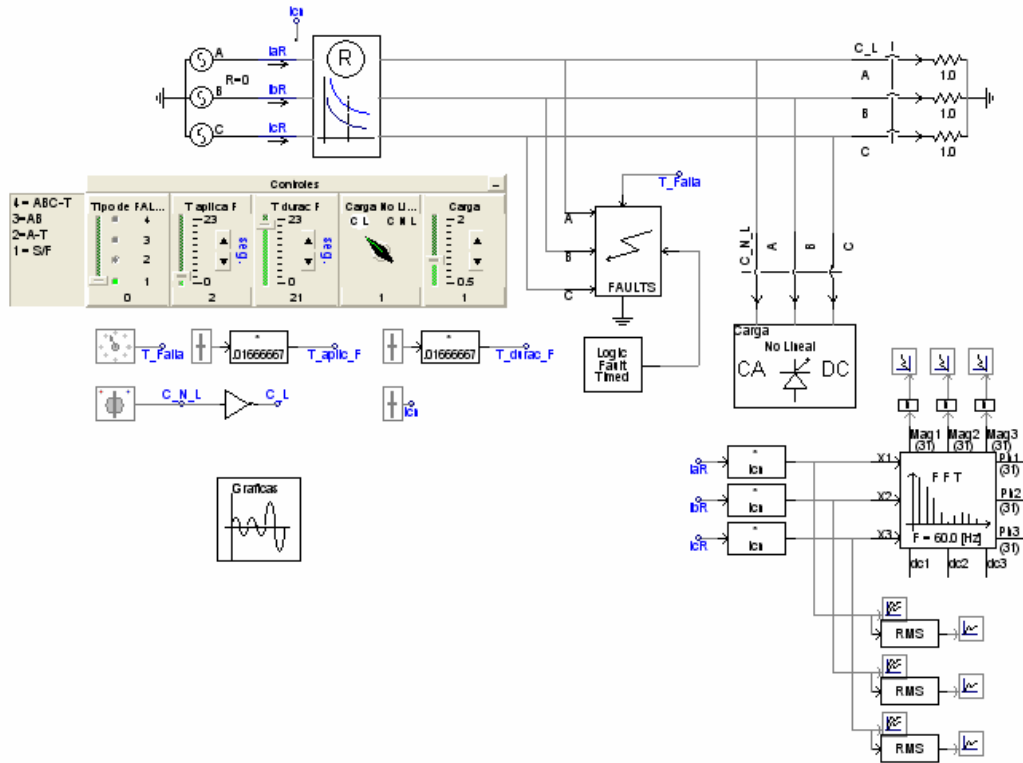


Figura 4.4.1. Diagrama en PSCAD para la simulación y evaluación del restaurador con señales de corriente distorsionadas.

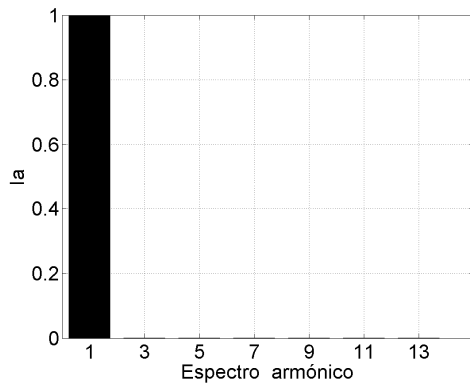


Figura 4.4.2. Espectro armónico de las señales de corriente para carga nominal lineal.

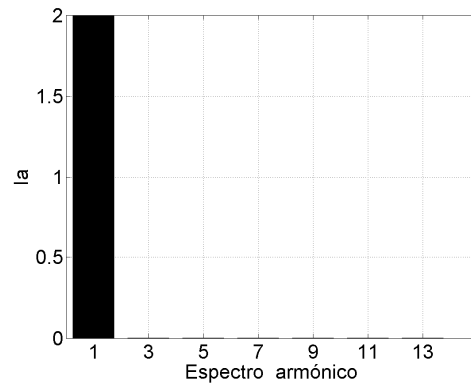


Figura 4.4.3. Espectro armónico de las señales de corriente para falla lineal monofásica a tierra, a-T.

Los parámetros de ajuste se encuentran en el apéndice C-3.

#### 4.4.1.1 Evaluación del restaurador en condiciones de carga nominal lineal.

En la figura 4.4.4, se observa la forma de onda de las corrientes primarias en las fases **a**, **b** y **c**. La magnitud de las corrientes corresponde al 100% de la carga nominal. La forma de onda es senoidal debido a que la carga es lineal. Puesto que el valor **rms** (véase la figura 4.4.5.) no supera el valor de ajuste en los relevadores, éstos no emiten ninguna señal de disparo, como se observa en la figura 4.4.6.

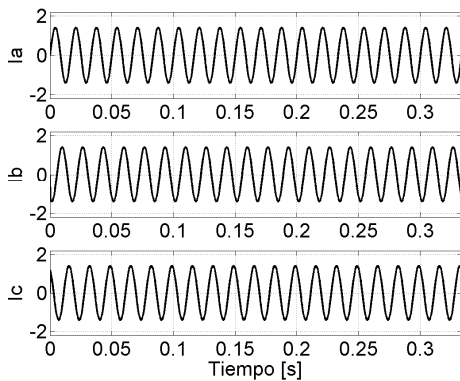


Figura 4.4.4. Formas de onda de las corrientes, **I<sub>abc</sub> = 1.414 A- pico.**

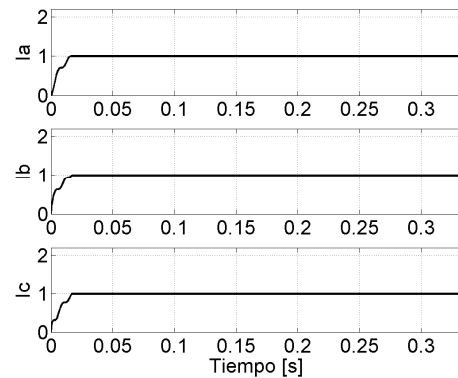


Figura 4.4.5. Valor **rms** de las corrientes, **I<sub>abc</sub> = 1.0 A.**

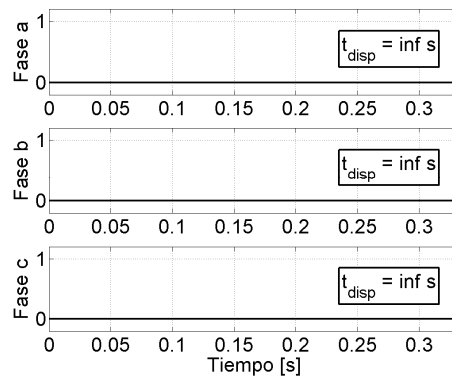


Figura 4.4.6. Estados de operación del restaurador.

#### 4.4.1.2 Evaluación del restaurador en condiciones de falla monofásica a-T.

Para la simulación de una falla monofásica **a-T** permanente, el restaurador realiza en la fase **a** dos operaciones rápidas de aproximadamente tres ciclos (véase la figura 4.4.7 y 4.4.8), debido a que

la condición de falla no se ha liberado, el restaurador realiza una última operación lenta de aproximadamente siete ciclos, finalmente, el interruptor de la fase **a** del restaurador abre de manera permanente, liberando de esta manera la condición de falla.

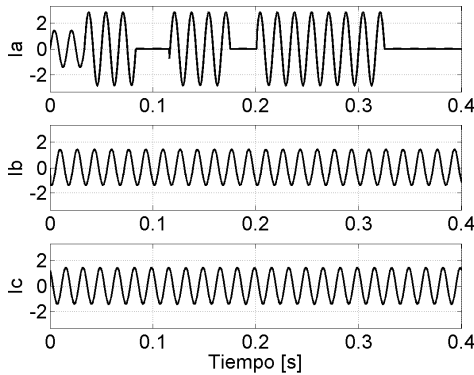


Figura 4.4.7. Formas de onda de las corrientes,  $I_{a_{\max}} = 2.828$  A-pico.

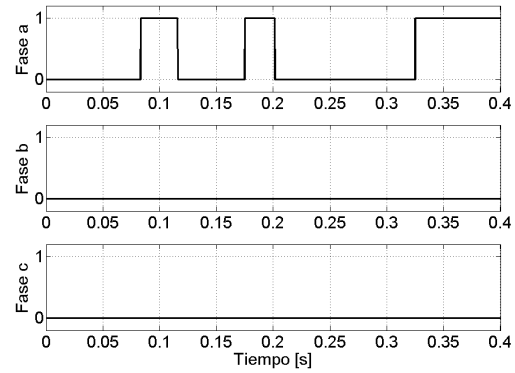


Figura 4.4.8. Estados de operación del restaurador.

Para un incremento del 15% en la carga nominal, se obtiene el espectro armónico de la figura 4.4.9. Sólo se observa la barra correspondiente al armónico fundamental, pues la carga es lineal, por lo tanto, la corriente demandada es de forma senoidal, como se observa en la figura 4.4.10.

El valor **rms** de las señales de corriente debido al incremento de la carga (véase la figura 4.4.11), no supera el valor de ajuste en el restaurador, por lo tanto, éste no opera como se observa en la figura 4.4.12.

La operación del restaurador en esta simulación es correcta, pues los ajustes del restaurador fueron realizados para permitir un incremento máximo en la carga de 30%.

Según los ajustes realizados, la operación del restaurador en las simulaciones realizadas es correcta cuando la carga es lineal.

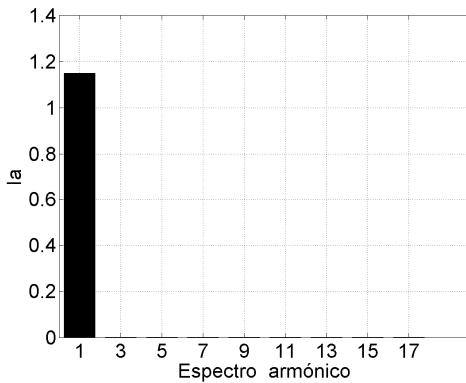


Figura 4.4.9. Espectro armónico de las señales de corriente para carga nominal lineal.

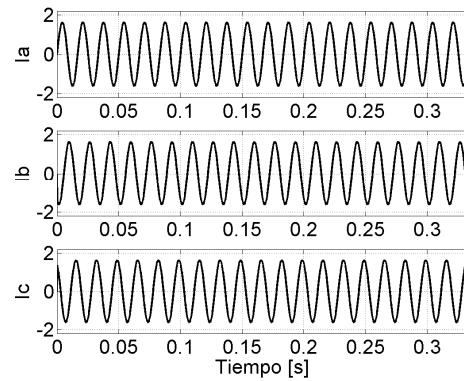


Figura 4.4.10. Formas de onda de las señales de corrientes,  $I_{abc}=1.626$  A-pico.

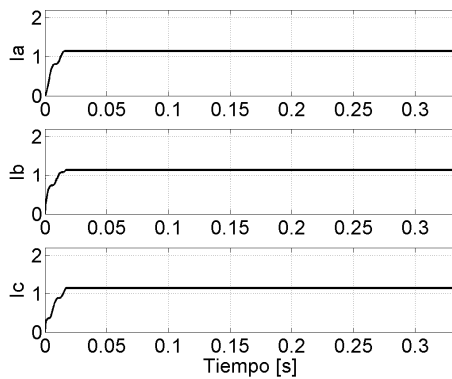


Figura 4.4.11. Valor **rms** de las corrientes,  $I_{abc}=1.15$  A.

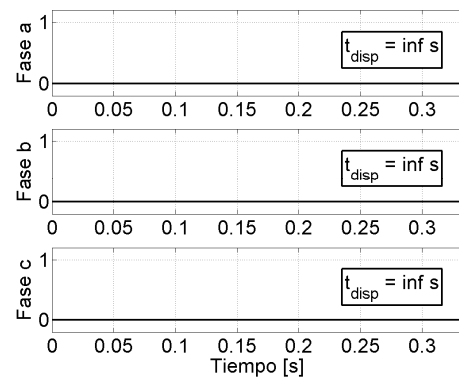


Figura 4.4.12. Estados de operación del restaurador.

#### 4.4.2 Evaluación del restaurador en condiciones de corrientes distorsionadas.

Una vez que se han validado los ajustes del restaurador según las condiciones de carga nominal lineal, incremento de carga y falla lineal, se procede a evaluar la operación del restaurador (conservando los ajustes realizados) en condiciones de carga nominal no-lineal e incremento de carga.



#### 4.4.2.1 Evaluación del restaurador en condiciones de carga nominal no-lineal.

La forma de onda de las señales de corriente para carga nominal no-lineal debidas a una fuente conmutada de voltaje [22], se observa en la figura 4.4.14, y su respectivo espectro armónico se observa en la figura 4.4.13.

Se simuló una carga nominal del 100%, debido a que el valor **rms** de las señales de corriente (véase la figura 4.4.15) no supera el valor de ajuste en el restaurador, éste no opera como se observa en la figura 4.4.16. Obsérvese que el restaurador está ajustado para permitir un incremento de 30% de la carga nominal lineal.

Esta operación es correcta, pues realmente no existe ninguna condición de falla que amerite operación del restaurador.

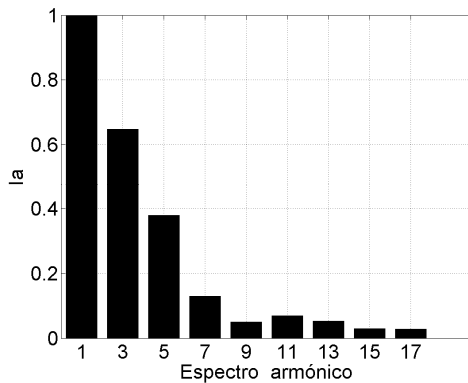


Figura 4.4.13. Espectro armónico de las señales de corriente para carga nominal no-lineal.

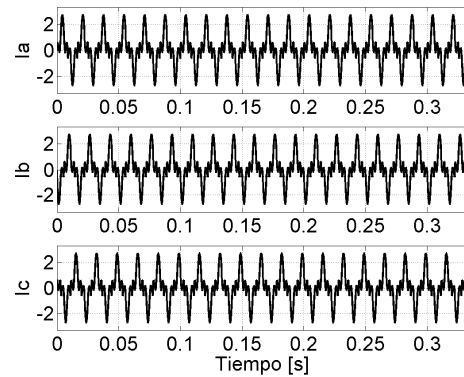


Figura 4.4.14. Formas de onda de las señales de corrientes, **Iabc=2.736 A-pico**.

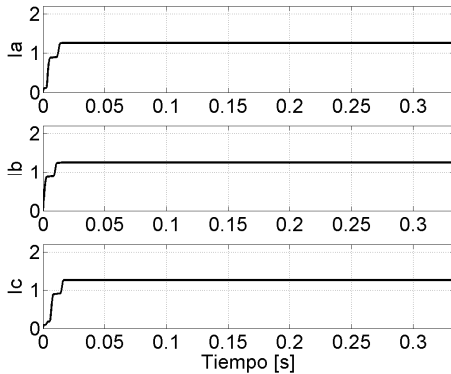


Figura 4.4.15. Valor **rms** de las corrientes,  $I_{abc}=1.263$  A.

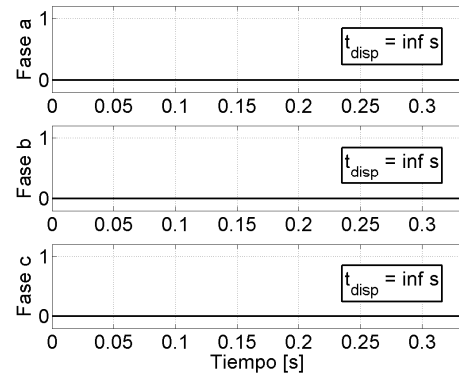


Figura 4.4.16. Estados de operación del restaurador.

#### 4.4.2.2 Evaluación del restaurador en condición de incremento de la carga nominal no-lineal.

Se simularon 0.916667 segundos (55 ciclos), esto con la finalidad de observar y analizar la operación del restaurador cuando se incrementa la carga no-lineal en 15%.

En la figura 4.4.17, se observa el espectro armónico para un incremento del 15% de la carga no-lineal, las formas de ondas respectivas debidas al incremento de la carga no-lineal se observan en la figura 4.4.18.

Debido a que el valor **rms** de las señales de corriente superó los valores de ajuste en el restaurador (véase la figura 4.4.19), éste opera, realizando dos operaciones rápidas y una última lenta, después abre de manera permanente sus contactos (véase la figura 4.4.20), desconectando permanentemente la carga no-lineal.

No se esperaba esta operación del restaurador, porque supuestamente no se ha superado el valor de carga máxima, sin embargo, los valores **rms** de las señales de corriente, debidas a la carga no-lineal, si superan el valor de ajuste en el restaurador, consecuentemente éste opera.

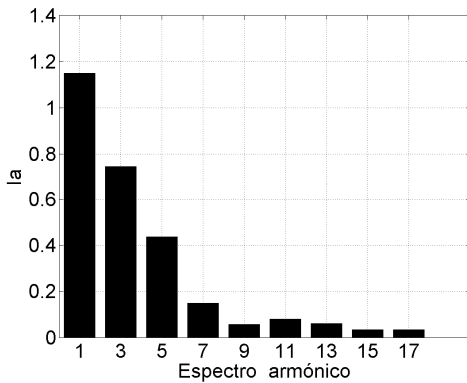


Figura 4.4.17. Espectro armónico de las señales de corriente para carga no-lineal.

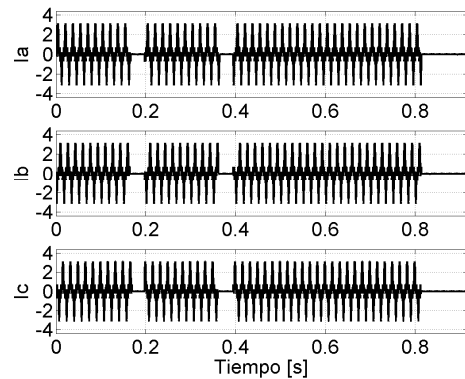


Figura 4.4.18. Formas de onda de las señales de corrientes,  $I_{abc}=3.147$  A-pico.

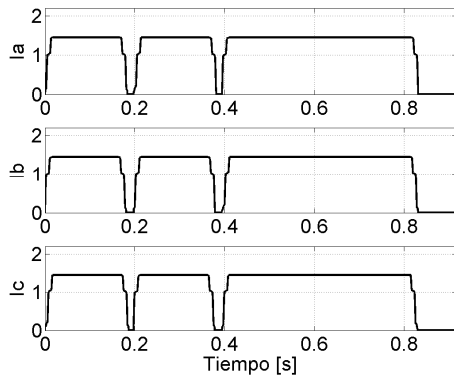


Figura 4.4.19. Valor **rms** de las corrientes,  $I_{abc} = 1.453$  A.

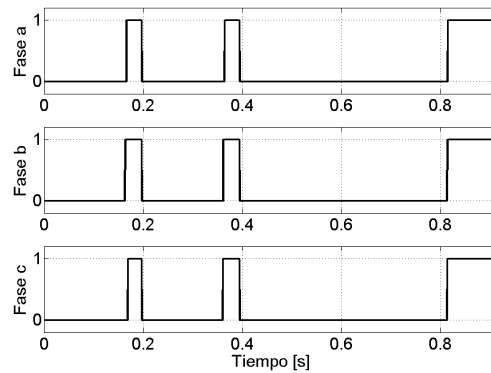


Figura 4.4.20. Estados de operación del restaurador.

#### 4.5 Evaluación del seccionizador en condiciones de corrientes distorsionadas por carga nominal no lineal, y considerando fluctuación del régimen de carga nominal.

Los ajustes en el seccionizador se realizan considerando sólo la componente fundamental para las condiciones de carga nominal y de falla. Se proponen los ajustes para que opere el seccionizador (abriendo sus contactos de manera permanente) después de dos desenergizaciones. El seccionizador operará, sólo si el valor **rms** de la corriente en la línea protegida excede el 40% del valor de carga nominal.

El diagrama de la figura 4.5.1, permite simular un sistema de prueba para evaluar la operación del seccionizador en condiciones de carga nominal lineal o no-lineal, el valor de la carga se puede

programar para que fluctúe entre un porcentaje mínimo y un máximo de la carga nominal. En el módulo **CONTROL DE FALLAS** de la figura 4.5.1, se selecciona el porcentaje del valor de la carga mínima y el porcentaje del valor de la carga máxima, también se puede seleccionar entre una carga lineal y un módulo **UPS** que simula una carga no lineal. Para este caso, se agregaron dos controles, el primero activa y desactiva la operación del interruptor monofásico **INT**, y el segundo permite simular la ocurrencia de una des-energización monofásica o una trifásica. El módulo **FFT** obtiene la transformada rápida de Fourier de las señales de corriente medidas en cada una de las líneas que alimentan a la carga. El módulo **FFT** permite obtener la magnitud **rms** de cada un de los componentes armónicos de la señal respectiva de corriente.

Se emplea el mismo sistema eléctrico de prueba del capítulo tres, el cual evalúa la operación del seccionador.

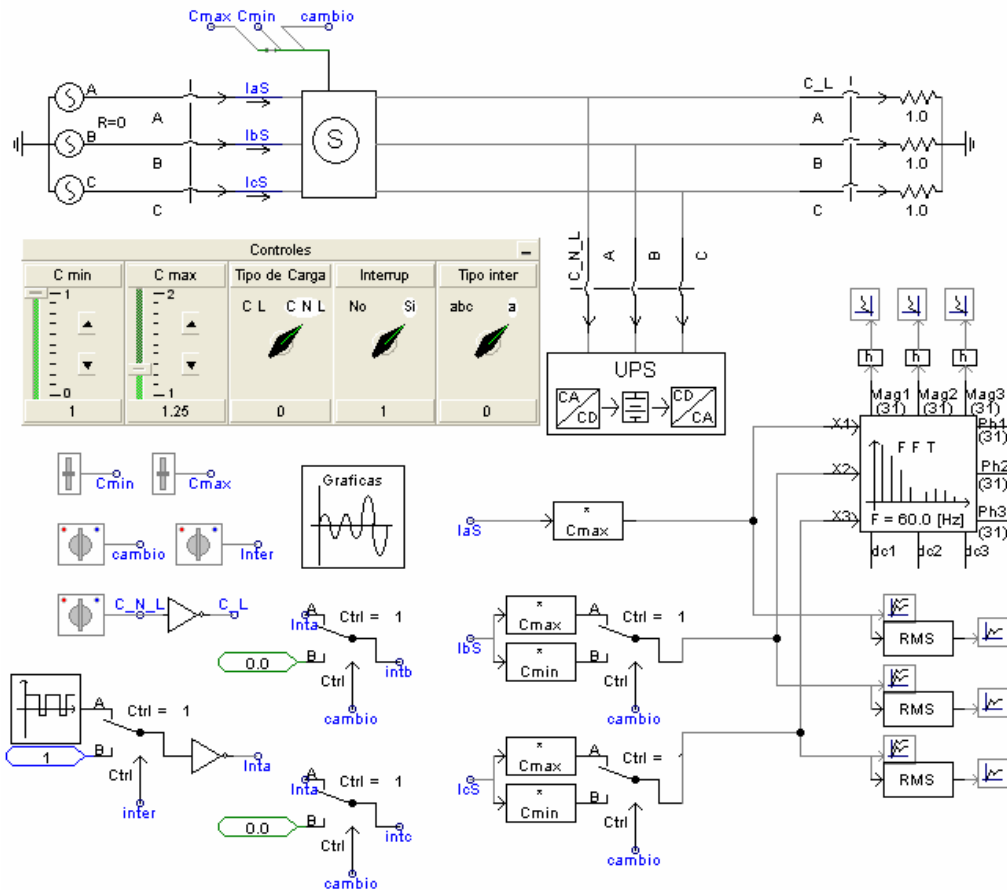


Figura 4.5.1. Diagrama en PSCAD para la simulación y evaluación del seccionador con señales de corriente distorsionadas.

#### **4.5.1 Ajuste y evaluación del seccionalizador en condiciones de carga lineal.**

Para proponer los ajustes del seccionalizador, se realizaron las siguientes simulaciones:

- Condición de carga nominal.
- Condición con incremento de 25% de la carga nominal.

Los valores de los ajustes se encuentran en el apéndice C-4.

##### **4.5.1.1 Evaluación del seccionalizador en condiciones de carga nominal lineal.**

En la gráfica 4.5.2, se observa el espectro armónico para las señales de corrientes debidas a la condición de carga nominal. Puesto que la carga es de naturaleza lineal, la forma de onda de las señales de corriente es senoidal, como se observa en la gráfica 4.5.3.

Durante la simulación no hubo ninguna interrupción de la energía eléctrica, y el valor **rms** de las señales de corriente mantuvo un valor unitario (véase la figura 4.5.4), por lo tanto el seccionalizador no opera, como se observa en la figura 4.5.5.

##### **4.5.1.2 Evaluación del seccionalizador en condiciones de incremento de la carga nominal lineal.**

Para un incremento de 25% en la carga lineal, se obtienen las corrientes de la figura 4.5.7. En la figura 4.5.6, se observa el espectro armónico de las señales de corriente para la condición de incremento de carga. Además de incrementar la carga, se simulan tres des-energizaciones trifásicas.

Aunque el seccionalizador está programado para abrir sus contactos después de dos des-energizaciones, éste no opera como se observa en la figura 4.5.9, pues el valor **rms** de las señales de corriente no supera el 40% del valor de carga (véase la figura 4.5.8). Por lo tanto, después de las des-energizaciones el seccionalizador continúa con sus contactos cerrados, suministrando así energía a la carga.

Con la finalidad de verificar que el seccionalizador opera según los ajustes realizados, se simula una condición de falla que incrementa el valor de la corriente en la fase **a**, ésta condición de falla se crea incrementando al doble el valor de la carga máxima. Además, el interruptor **INT** realiza

tres des-energizaciones en la fase **a**, mientras que las fases restantes continúan suministrando energía a la carga.

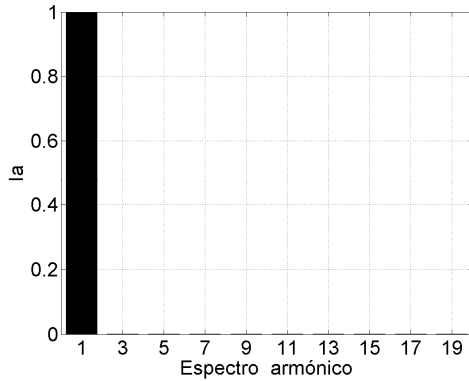


Figura 4.5.2. Espectro armónico de las señales de corriente para carga nominal lineal.

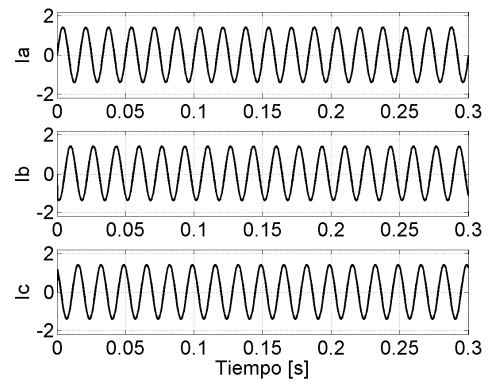


Figura 4.5.3. Formas de onda de las señales de corrientes,  $I_{abc}=1.414$  A-pico

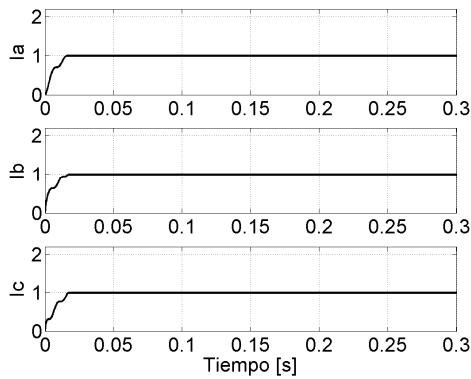


Figura 4.5.4. Valor **rms** de las corrientes,  $I_{abc}=1.0$  A.

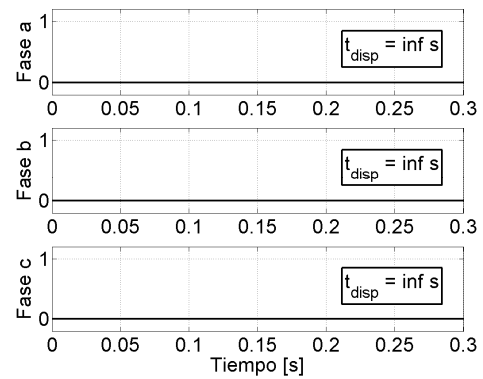


Figura 4.5.5. Estados de operación del seccionizador.

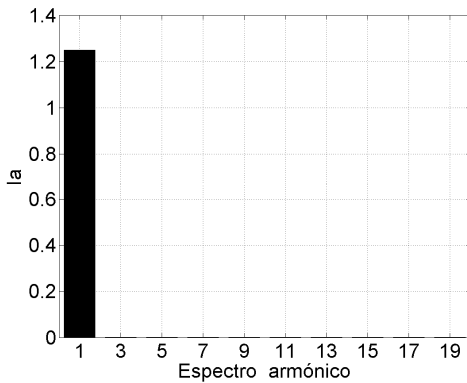


Figura 4.5.6. Espectro armónico de las señales de corriente.

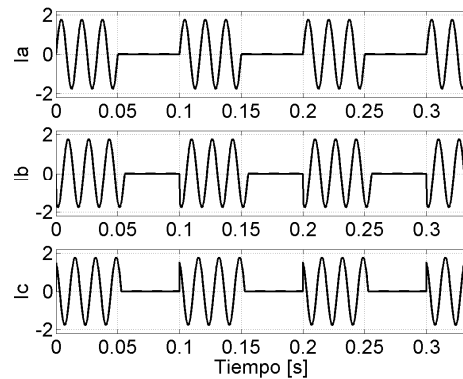


Figura 4.5.7. Formas de onda de las corrientes,  $I_{abc} = 1.767$  A-pico

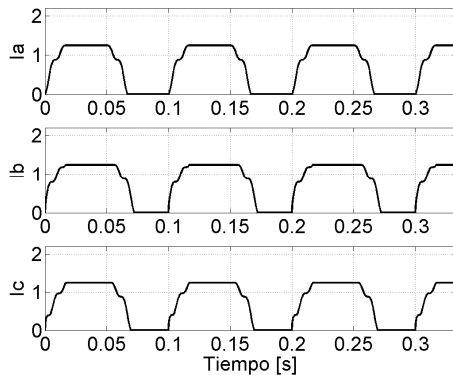


Figura 4.5.8. Valor **rms** de las señales de corriente,  $I_{abc}=1.25$  A.

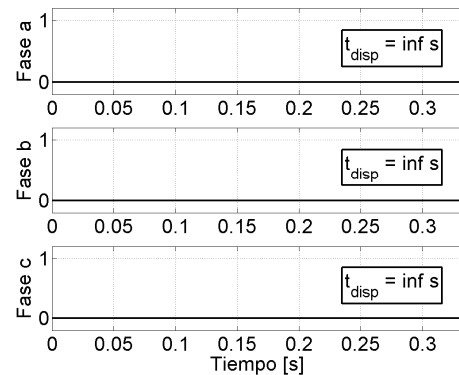


Figura 4.5.9. Estados de operación del restaurador.

En la figura 4.5.10, se observa que después de dos des-energizaciones de la fase **a** opera el seccionador, desconectando de manera permanente la carga conectada a la fase **a**. El seccionador operó pues el valor **rms** de la corriente en la fase **a** superó el 40% del valor de la carga nominal, como se observa en la figura 4.5.11. La operación del contacto de la fase **a** del seccionador se observa en la figura 4.5.12.

#### 4.5.2 Evaluación del seccionador en condiciones de corrientes distorsionadas.

Una vez que se han validado los ajustes del seccionador según las condiciones de carga nominal lineal, incremento de carga y condición de falla, se procede a evaluar la operación del seccionador (conservando los ajustes realizados) en condiciones de carga nominal no-lineal, incremento de carga no-lineal y condición de falla.

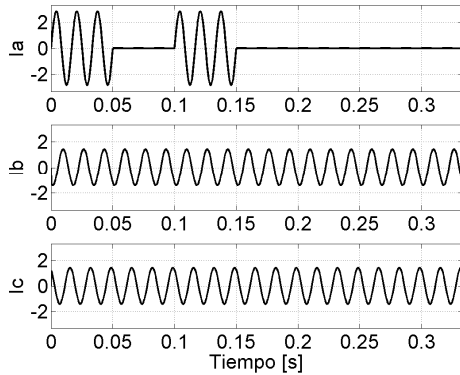


Figura 4.5.10. Formas de onda de las señales de corrientes,  $I_{a_{\max}} = 2.828$  A-pico.

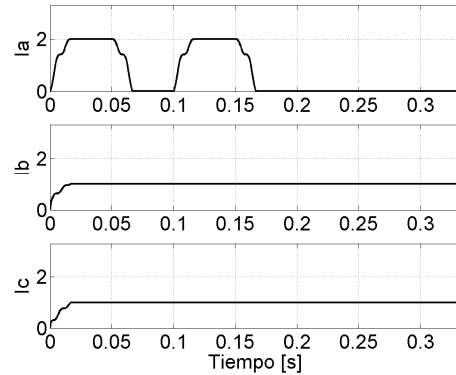


Figura 4.5.11. Valor **rms** de las corrientes,  $I_{a_{\max}} = 2$  A.

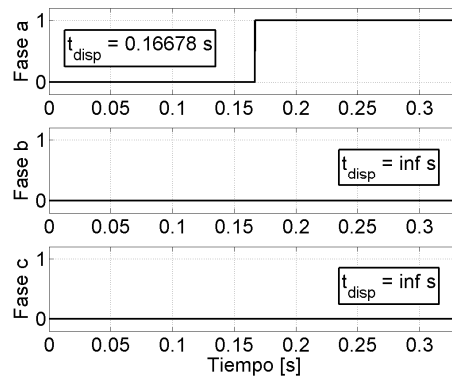


Figura 4.5.12. Estados de operación del seccionador.

#### 4.5.2.1 Evaluación del seccionador en condiciones de carga nominal no-lineal.

La forma de onda de las señales de corriente para carga nominal no-lineal debidas a una fuente ininterrumpible de voltaje (UPS) [13], se observa en la figura 4.5.14, y su respectivo espectro armónico se observa en la figura 4.5.13.

Como se observa en la figura 4.5.15, el valor **rms** de las señales de corriente para una carga nominal no-lineal se incremento ligeramente con respecto a la carga nominal lineal (véase la figura 4.5.4).



Debido a que no ocurre ninguna des-energización, el seccionalizador no opera, como se observa en la figura 4.5.16. El seccionalizador se comporta de manera correcta para carga nominal no-lineal.

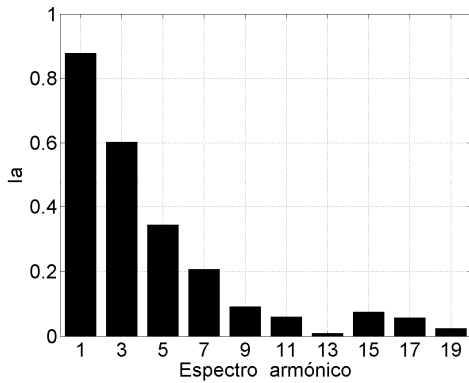


Figura 4.5.13. Espectro armónico de las señales de corriente para carga nominal no-lineal.

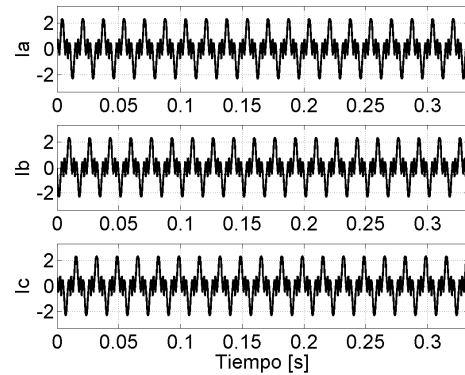


Figura 4.5.14. Formas de onda de las señales de corrientes,  $I_{abc}=2.3$  A-pico.

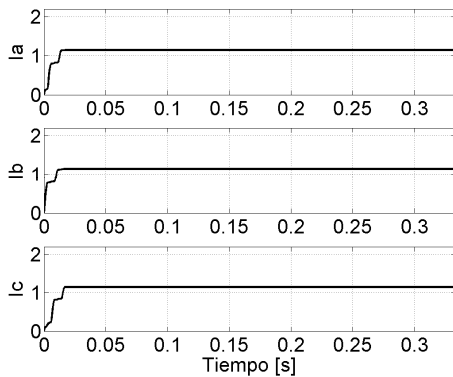


Figura 4.5.15. Valor **rms** de las señales de corriente,  $I_{abc}=1.15$  A.

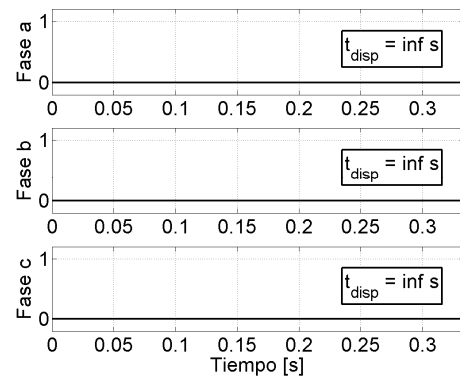


Figura 4.5.16. Estados de operación del seccionalizador.

#### 4.5.2.2 Evaluación del seccionalizador en condiciones de incremento de carga no-lineal.

Para el siguiente caso, se simula un incremento del 25% del valor de carga nominal no-lineal, y se programa al interruptor INT para que realice tres des-energizaciones tripolares.

En la figura 4.5.17, se observa el espectro armónico de las señales de corriente correspondiente a las formas de onda de las corrientes de la figura 4.5.18.

Obsérvese que para un incremento del 25% de la carga no-lineal, el valor **rms** se incrementa (véase la figura 4.5.19) superando el valor de ajuste en el seccionalizador de 1.4 A. Puesto que el interruptor **INT** realiza tres des-energizaciones, y las corrientes en las fases superaron el valor de ajuste en el seccionalizador, éste opera, como se observa en la figura 4.5.20.

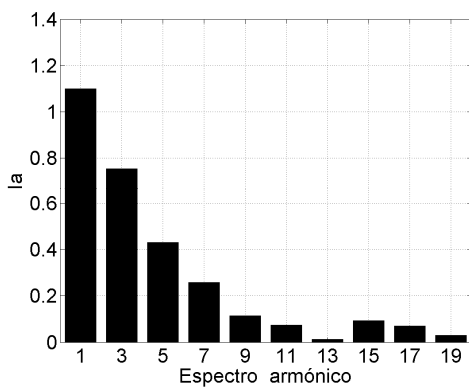


Figura 4.5.17. Espectro armónico de las señales de corriente para un incremento de carga no-lineal.

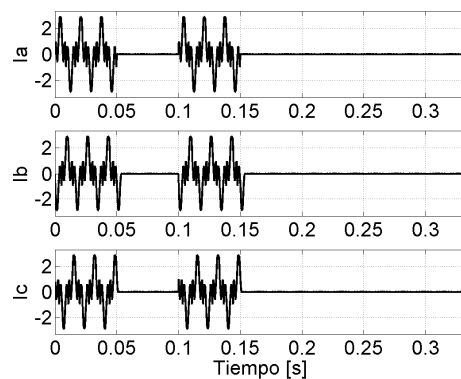


Figura 4.5.18. Formas de onda de las señales de corrientes, **Iabc=2.87 A-pico**.

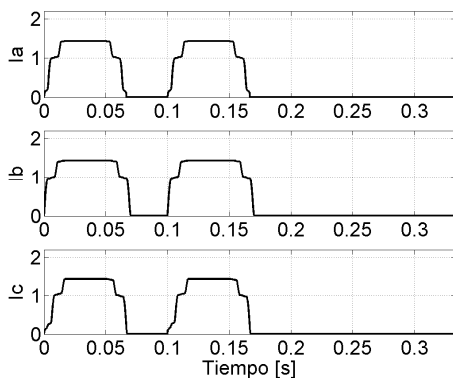


Figura 4.5.19. Valor **rms** de las señales de corriente, **Iabc=1.437 A**.

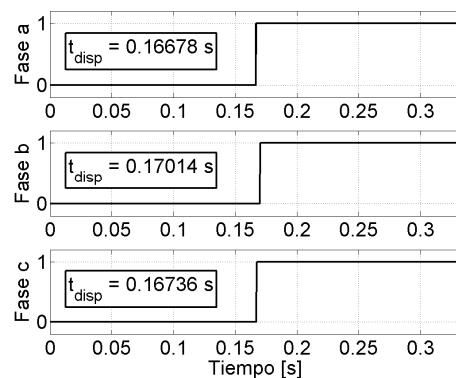


Figura 4.5.20. Estados de operación del seccionalizador.

En realidad no se esperaba la operación del seccionalizador, pues considerando el mismo incremento de carga para condiciones lineales éste no operó (véase la figura 4.5.9), sin embargo,

cuando la carga es no-lineal el seccionizador opera, esta operación ocasionaría la pérdida de coordinación en un esquema de protección que empleara más de un seccionizador.

Se simula una condición de falla que incrementa el valor de la corriente en la fase **a**, esta condición de falla se crea incrementando al doble el valor de la carga máxima no-lineal. Además, el interruptor **INT** realiza tres des-energizaciones en la fase **a**, mientras que las fases restantes continúan suministrando energía a la carga.

En la figura 4.5.22, se observa que después de dos des-energizaciones de la fase **a** opera el seccionizador, desconectando de manera permanente la carga conectada a la fase **a**. El seccionizador operó pues el valor **rms** de la corriente en la fase **a** superó el 40% del valor de la carga nominal (valor de ajuste), como se observa en la figura 4.5.23. La operación del contacto de la fase **a** del seccionizador se observa en la figura 4.5.24.

Esta simulación verifica que el seccionizador opera de manera correcta para carga nominal no-lineal, pues sólo libera la condición de falla en la fase fallada, y permite el suministro de energía en el resto de las fases.

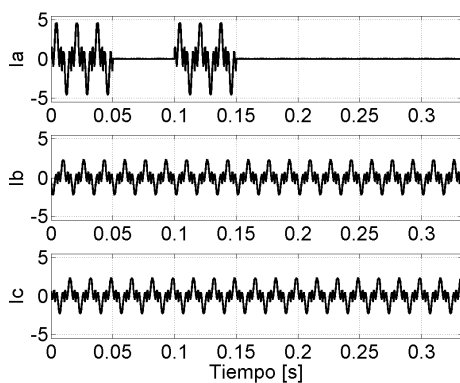


Figura 4.5.21. Formas de onda de las señales de corrientes,  $I_{a_{\max}} = 4.6$  A-pico.

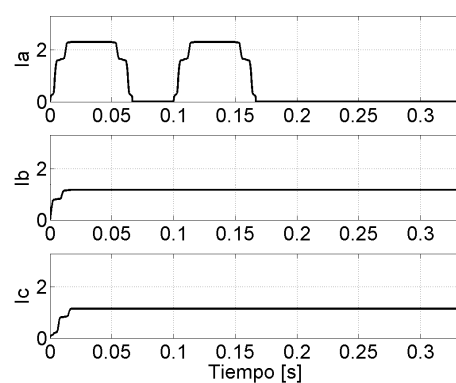


Figura 4.5.22. Valor **rms** de las corrientes,  $I_{a_{\max}} = 2.29$  A.

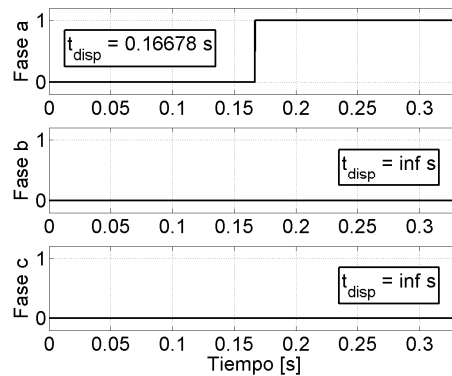


Figura 4.5.23. Estados de operación del seccionalizador.

#### 4.6 Coordinación de un esquema de protección de sobrecorriente en condiciones de carga lineal, y su reajuste para carga no-lineal.

En la figura 4.6.1, se observa un esquema típico de protección de sobrecorriente para sistemas de distribución [50, 51]. El sistema de prueba para este caso comprende la sección enmarcada (línea no continua) de la figura 4.6.1.

El sistema de prueba final se presenta en la figura 4.6.2, el diagrama en PSCAD que simula el sistema eléctrico de prueba se observa en la figura 4.6.3. La carga **C1** es una carga lineal, la carga **C2** se puede conmutar para simular una carga lineal o una carga no-lineal. Además, se simulan las fallas **F1** y **F2**.

Los dispositivos empleados para proveer protección al sistema eléctrico de la figura 4.6.3, son: un relevador trifásico de disparo monopolar 50/51 -el relevador **R-50** mide valores absolutos instantáneos, el relevador **R-51** mide valores **rms-** (módulo **Rele 50/51**) y un restaurador trifásico de disparo monopolar -éste mide valores **rms-** (módulo **R**) [52], los interruptores en ambos módulos abren sólo cuando la corriente pasa por cero; las carga lineales **C1** y **C2** son resistivas conectadas en estrella, la carga no-lineal **C2** corresponde a una fuente ininterrumpible de voltaje (UPS) [13].

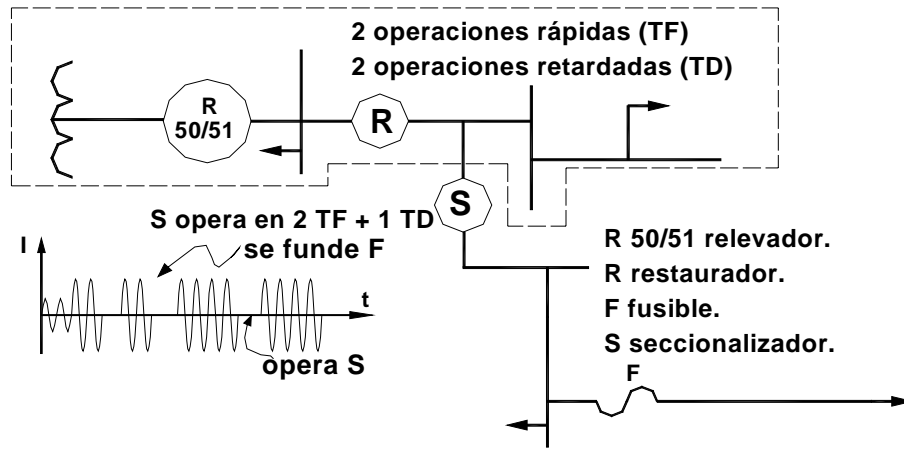


Figura 4.6.1. Esquema típico para protección de sobrecorriente.

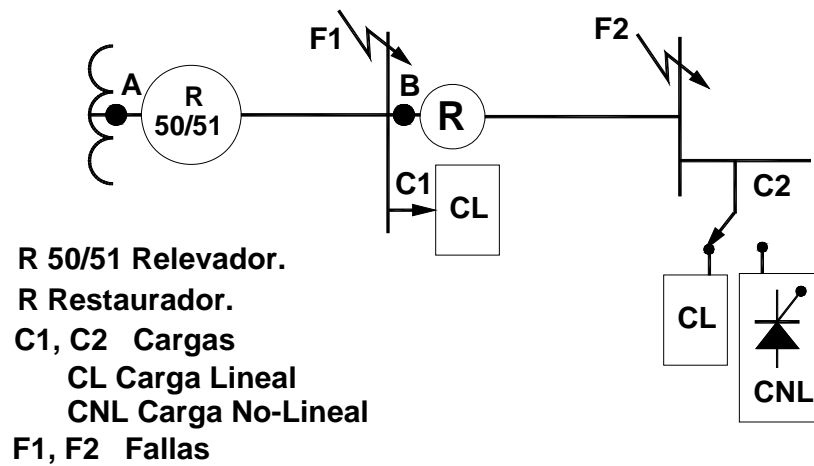


Figura 4.6.2. Sistema unifilar de prueba.

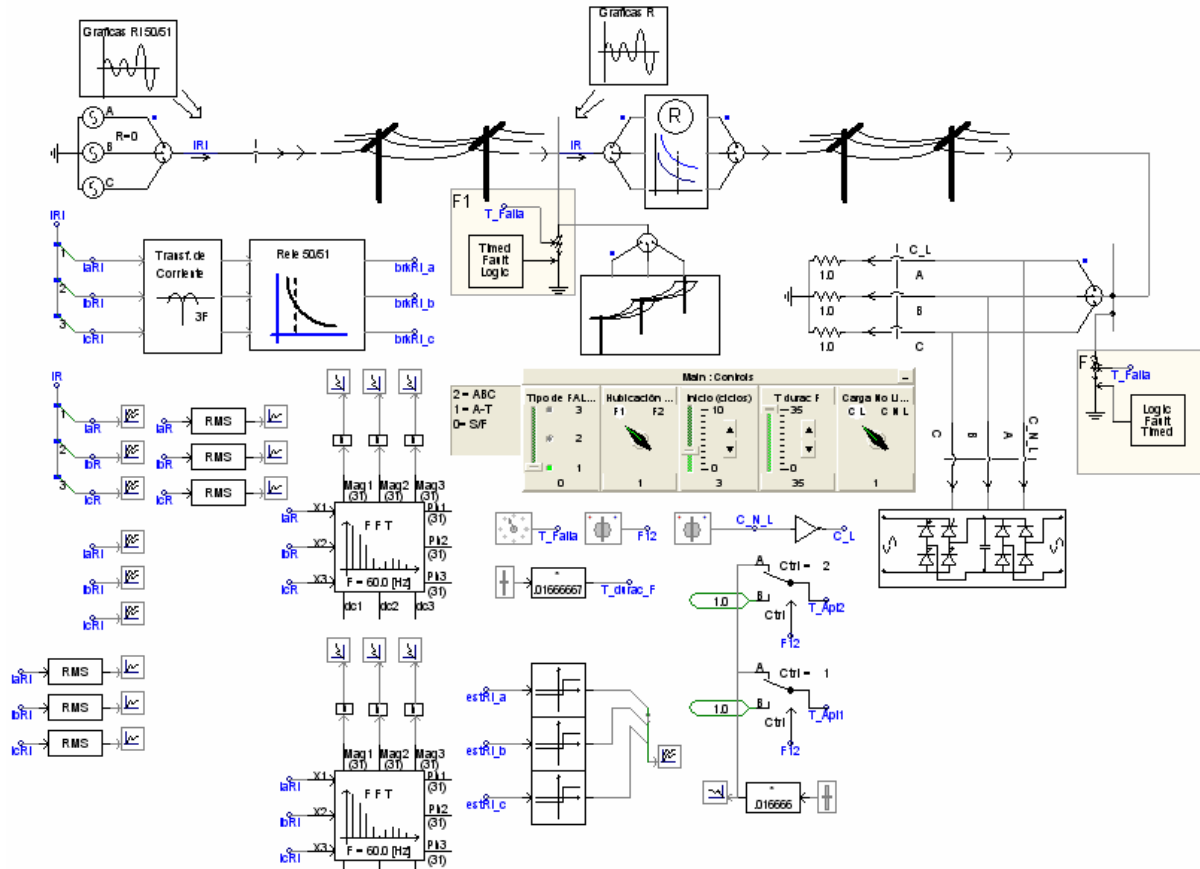


Figura 4.6.3. Diagrama -EMTDC/PSCAD-, módulos de protección (**Relé 50/51** y **R**), módulos de carga, Módulo de controles, medidores y registradores.

Las curvas características de operación de los **R-51's** y para el restaurador, están basadas en el Estándar de IEEE de ecuaciones características de tiempo inverso para relevadores de sobrecorriente. Las constantes para la ecuación del estándar corresponden a la característica -moderadamente inversa- [46].

Los valores de los parámetros de ajuste para el sistema eléctrico de prueba de la figura 4.6.3 se encuentran en el apéndice C-5.

#### 4.6.1 Ajustes y operación de los módulos de protección de sobrecorriente considerando carga lineal.

Los ajustes para los módulos de protección se realizan considerando las corrientes debidas a las cargas lineales **C1** y **C2** en los puntos **A** y **B**, respectivamente (véase figura 4.6.3).

Se simularon 35 ciclos de la frecuencia fundamental ( $f_0=60$  Hz), con una frecuencia en el muestreo de 8640 Hz (144 muestras por ciclo). Todas las fallas se aplican a los 3 ciclos y persisten por el resto de la simulación (fallas permanentes).

Para determinar las magnitudes de las corrientes en los puntos **A** y **B**, y en base a éstas proponer los ajustes de los dispositivos de protección, se simula el sistema de la figura 4.6.3 en las siguientes condiciones:

- Carga nominal lineal.
- Falla F2 **a-T** y **abc**.
- Falla F1 **a-T** y **abc**.

El módulo **Rele 50/51**, está ajustado para permitir 4 ciclos de la magnitud **rms** en una falla **F1** monofásica de la fase **a** a tierra (**a-T**), y además, deberá ofrecer protección de respaldo al restaurador, también deberá disparar de forma instantánea para una falla **F1** trifásica (**abc**). El restaurador está programado para realizar dos operaciones rápidas y dos operaciones lentas, los ajustes de este módulo permiten 3 ciclos en las operaciones rápidas y 6 ciclos en las operaciones lentas para una falla **F2**, **a-T**.

Los valores de los parámetros de ajuste para los dispositivos de protección del sistema eléctrico de prueba de la figura 4.6.3 se encuentran en el apéndice C-5.

#### 4.6.1.1 Evaluación de las protecciones en condiciones de carga nominal lineal.

En la figura 4.6.4 y 4.6.5, se observan los estados de operación del módulo **Rele 50/51** y el restaurador, respectivamente. Debido a que los valores **rms** de las corrientes no superan los valores de ajuste en las protecciones, éstas no operan.

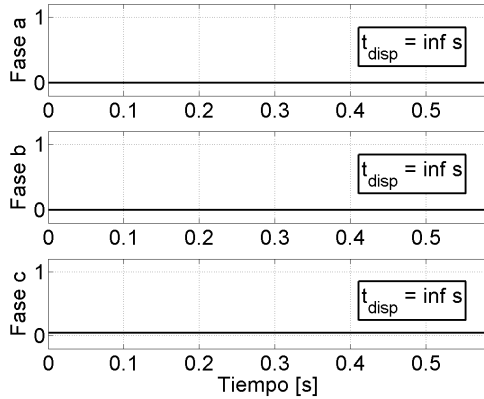


Figura 4.6.4. Estados de operación del módulo **Relé 50/51**.

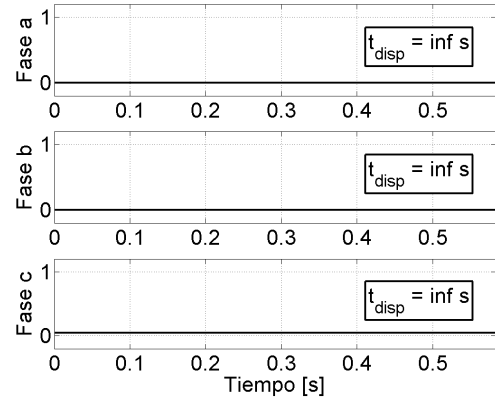


Figura 4.6.5. Estados de operación del **R**.

#### 4.6.1.2 Evaluación de las protecciones para una falla monofásica F1 a-T con carga lineal.

En la figura 4.6.6, se observan las formas de onda de las corrientes medidas en el punto **A** (véase la figura 4.6.2). La falla monofásica **F1 a-T** se aplica a los 3 ciclos y es liberada por el **R-51** después de 5 ciclos (véase la figura 4.6.7). El recorrido y reposicionamiento del disco de inducción del **R-51** (correspondiente a la fase **a**) se observa en la figura 4.6.8.

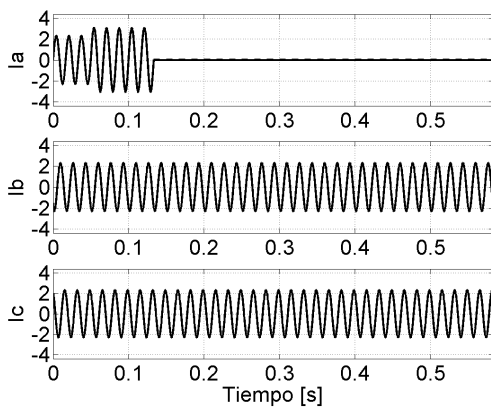


Figura 4.6.6. Formas de onda de las corrientes medidas en el punto **A**,

$$I_{a_{max}} = 3.085 \text{ A-pico}$$

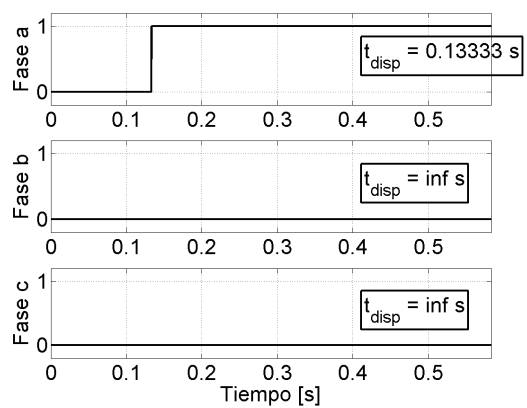


Figura 4.6.7. Estados de operación del **Relé 50/51**.



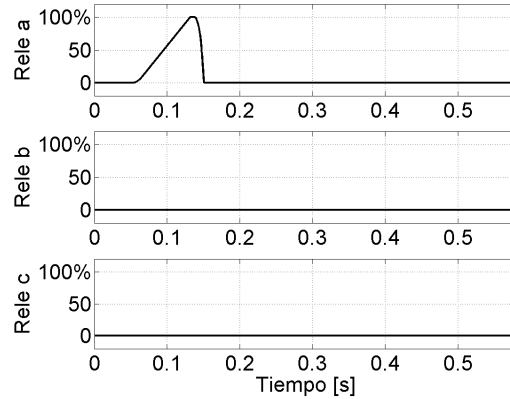


Figura 4.6.8. Posición de los discos de inducción de los **R-51's**.

#### 4.6.1.3 Evaluación de las protecciones para una falla trifásica F1 con carga lineal.

Para evaluar la operación de los **R-50's**, se simula una falla trifásica **F1** (véase figura 4.6.3). Debido a que el valor pico de las corrientes (véase figura 4.6.9) superó el valor de ajuste de los relevadores instantáneos (véase los ajustes en el apéndice C-5), estos operan y liberan la condición de falla. La condición de falla es liberada por los **R-50's**, puesto que los discos de los **R-51's** no completaron su recorrido, como se observa en la figura 4.6.10.

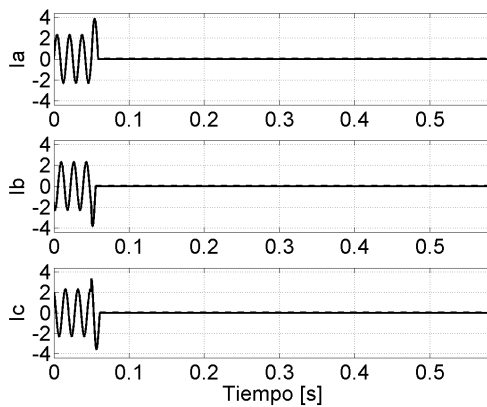


Figura 4.6.9. Formas de onda de las corrientes medidas en el punto **A**, falla trifásica **F1**,  $I_{abc_{max}}=3.888$  A-pico.

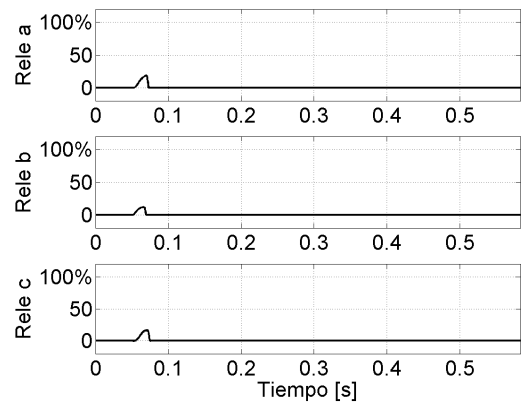


Figura 4.6.10. Posición de los discos de inducción de los **R-51's**.

#### 4.6.1.4 Evaluación de las protecciones para una falla F2 a-T con carga lineal.

Para evaluar la operación del restaurador ante una falla monofásica, se simula una falla **F2, a-T**. En la figura 4.6.11, se observan las corrientes medidas en el punto **B** (véase figura 4.6.3). Debido a que la falla es permanente, el restaurador realiza primero dos operaciones rápidas y dos operaciones lentas, al final de la segunda operación lenta, el restaurador abre sus contactos de manera permanente (véase figura 4.6.12), liberando así la condición de falla únicamente en la fase involucrada.

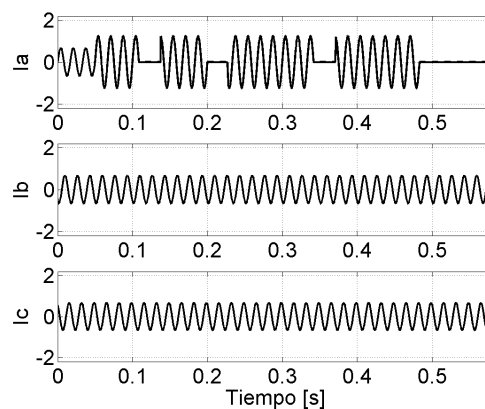


Figura 4.6.11. Formas de onda de las corrientes medidas en el punto B, falla F2 a-T.  $I_{a_{max}}=1.257$  A-pico.

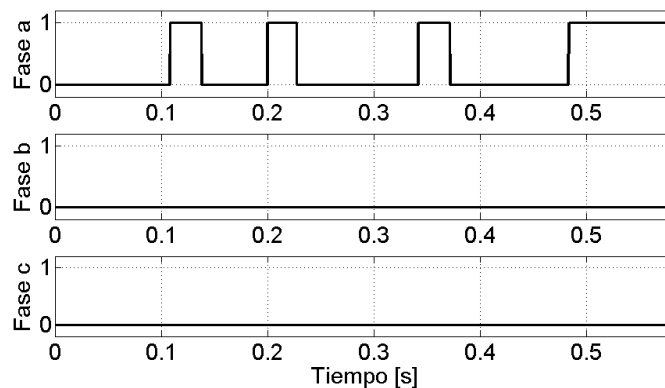


Figura 4.6.12. Estados de operación del **R**.

#### 4.6.1.5 Evaluación del módulo Rele 50/51 como protección de respaldo del restaurador.

Se simula una falla **F2 a-T**, y se deshabilita la operación del restaurador [52] con la finalidad de evaluar la operación del módulo **Rele 50/51** como protección de respaldo.

En la figura 4.6.13, se observan las formas de onda de las corrientes medidas en el punto **A** para una falla **F2 a-T**. Debido a que el restaurador no opera (véase figura 4.6.14), la condición de falla es liberada después de 11 ciclos por el **R-51** correspondiente a la fase **a**.

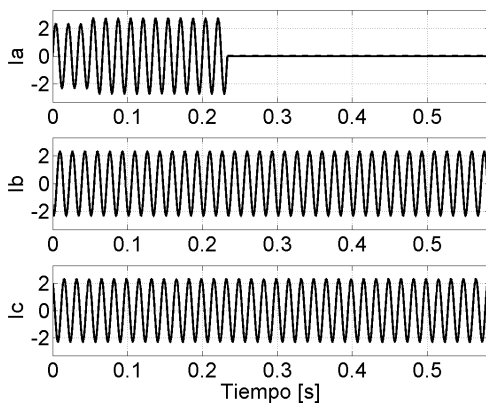


Figura 4.6.13. Formas de onda de las corrientes medidas en el punto **A**, falla **F2 a-T**.  $I_{a_{max}}=2.724$  A-pico.

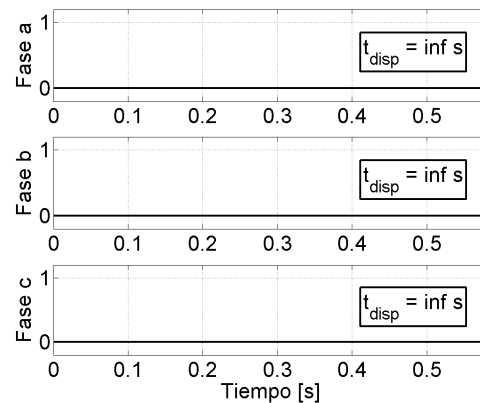


Figura 4.6.14. Estados de operación del **R**.

#### 4.6.2 Evaluación del esquema de protección con carga no lineal.

Para evaluar la operación del esquema de protección en condiciones de corrientes distorsionadas, se conmuta la carga **C2** por una carga no lineal [13] en el módulo de controles (véase figura 4.6.3).

##### 4.6.2.1 Evaluación de las protecciones en condiciones de carga nominal no-lineal C2.

En las figuras 4.6.16 y 4.6.18, se observan las formas de onda de las corrientes medidas en los puntos **A** y **B** (véase figura 4.6.2), y su respectivo espectro armónico en las figuras 4.6.15 y 4.6.17.

En la figura 4.6.18 y 4.6.19, se observan los estados de operación del **Rele 50/51** y el **R**, respectivamente. Debido a que los valores **rms** de las corrientes no superan los valores de ajuste en las protecciones, éstas no operan.

En estas condiciones los dispositivos del esquema de protección operan de manera correcta.

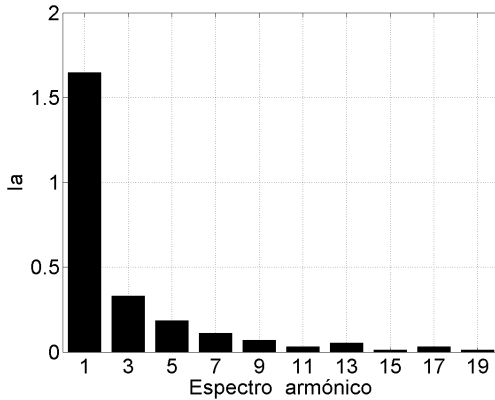


Figura 4.6.15. Espectro armónico de las señales de corriente medidas en el punto **A**.  $I_T^* = 1.7$  A.

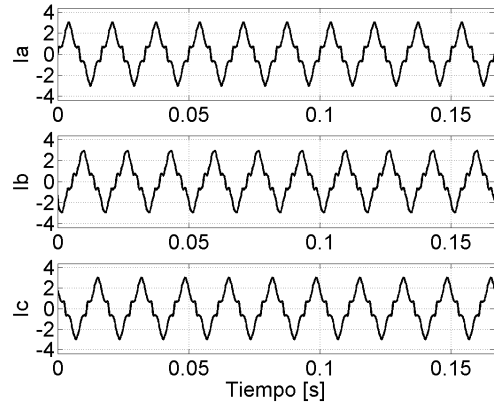


Figura 4.6.16. Formas de onda de las corrientes medidas en el punto **A**,  $I_{abc} = 3.038$  A-pico.

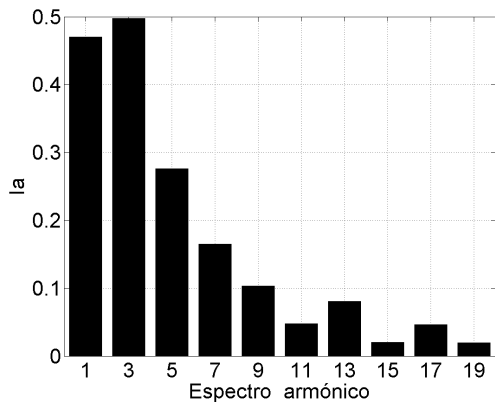


Figura 4.6.17. Espectro armónico de las señales de corriente medidas en el punto **B**.  $I_T = 0.773$  A.

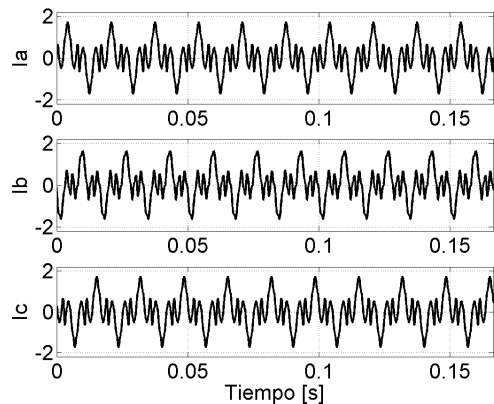
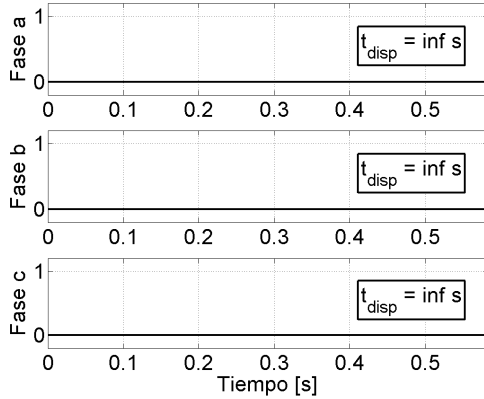
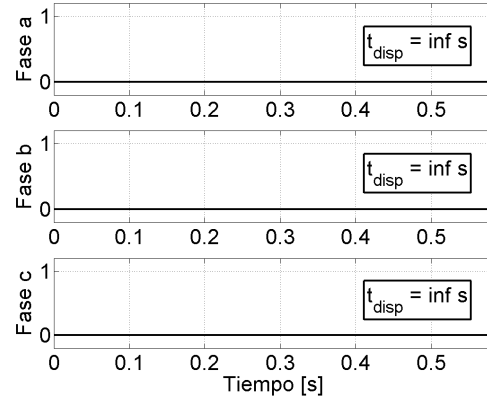


Figura 4.6.18. Formas de onda de las corrientes medidas en el punto **B**,  $I_{abc} = 1.73$  A-pico.

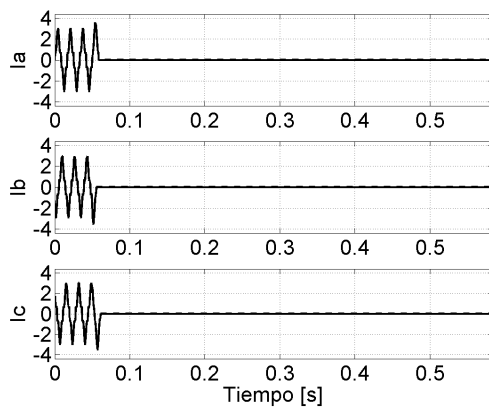
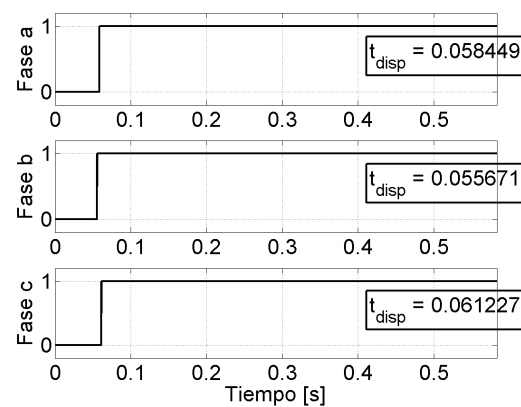
\* Valor **rms** de la señal de corriente considerando todo el espectro armónico.

Figura 4.6.19. Estados de operación del **Relé 50/51**.Figura 4.6.20. Estados de operación del **R**.

#### 4.6.2.2 Evaluación del esquema de protección para una falla trifásica F2 con carga C2 no-lineal.

En la figura 4.6.21, se observan las corrientes medidas en el punto **A**, debido a que el valor pico de las corrientes supera el valor de ajuste en los **R-50's** (véanse los ajustes en el apéndice C-5), éstos operan (véase la figura 4.6.22).

Esta operación es incorrecta, debido a que el restaurador debería liberar la condición de falla trifásica **F2** y no los relevadores instantáneos del módulo **Relé 50/51**, esta secuencia de operación hace que se pierda la coordinación del esquema de protección, por lo tanto, es necesario reajustar los dispositivos considerando la forma de onda de las señales de corriente.

Figura 4.6.21. Formas de onda medidas en el punto **A**,  $I_{abc_{max}}=3.616$  A-pico.Figura 4.6.22. Estados de operación del **Relé 50/51**.

### **4.6.3 Reajustes y evaluación de la operación de los módulos de protección de sobrecorriente tomando en cuenta la forma de onda de la corriente.**

Para conservar la coordinación entre los dispositivos de protección, es necesario tomar en cuenta la forma de onda de la corriente de carga y de fallas para redefinir los ajustes, es decir, se debe considerar el valor **rms** y el valor **pico** de la forma de onda de las señales de corriente debidas a la condición de carga no lineal **C2**.

Los nuevos ajustes propuestos se encuentran en el apéndice C-5.

#### **4.6.3.1 Evaluación del esquema de protección para una falla trifásica **F2**, cuando se han reajustado los relevadores instantáneos (**R-50**) considerando la carga no-lineal.**

Para conservar la coordinación de operación entre el módulo **Rele 50/51** y el **R**, es necesario considerar el valor pico de la forma de onda de la corriente en el punto **A** para la falla trifásica **F2**. El nuevo ajuste en los **R-50's**, se incrementa tomando en cuenta que el valor pico de la corriente es mayor que cuando la carga es lineal.

Una vez que se han reajustado los **R-50's** (del módulo **Rele 50/51**), se realiza nuevamente la simulación, y se observa que el restaurador libera la condición de falla trifásica **F2** (véase la figura 4.6.23), sin embargo, lo hace en un intervalo de tiempo mucho más corto (véase la figura 4.6.24), de tal manera que se afectaría la coordinación con otros dispositivos de protección instalados aguas abajo, esto como consecuencia de la operación rápida del restaurador, lo cual no permitiría que el dispositivo correspondiente liberará la condición de falla. Esta operación ocasiona que al ocurrir esta falla se dejase sin suministro de energía eléctrica a más cargas de las involucradas en la condición de falla.

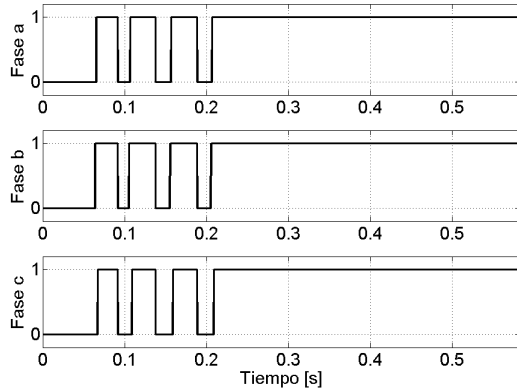


Figura 4.6.23. Estados de operación del restorador.

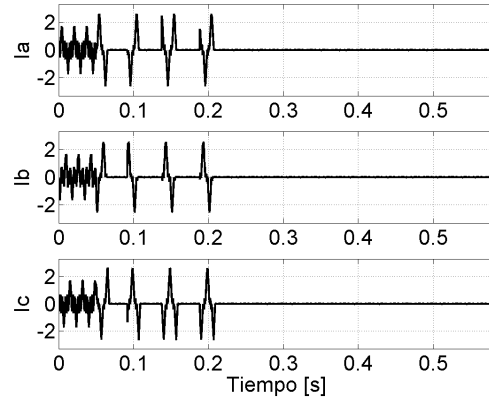


Figura 4.6.24. Formas de onda medidas en el punto B,  $I_{abc_{max}}=2.6$  A-pico

### 4.6.3.2 Evaluación del esquema de protección para una falla F1, a-T.

En las figuras 4.6.25 y 4.6.26, se observa la forma de onda de las corrientes medidas en el punto A para una falla F1 a-T y su espectro armónico durante la condición de falla, respectivamente.

La condición de falla fue liberada por el R-51 de la fase a después de 5 ciclos (véase la figura 4.6.27).

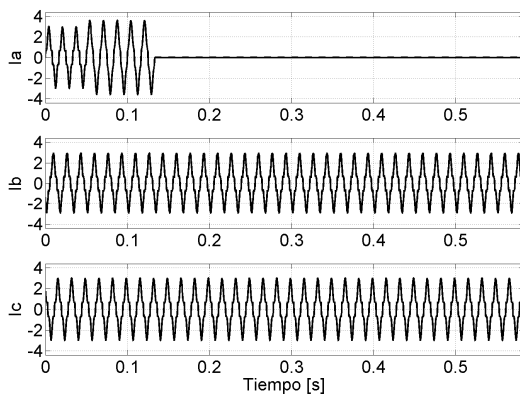


Figura 4.6.25. Formas de onda de las corrientes medidas en el punto A,  $I_{a_{max}}=3.64$  A-pico.

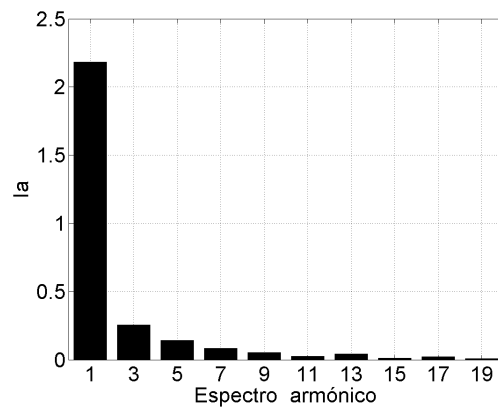


Figura 4.6.26. Espectro armónico para condición de falla de la fase a,  $I_1=2.2$  A.

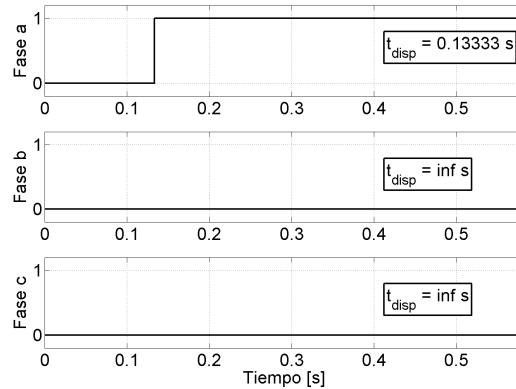


Figura 4.6.27. Estados de operación del **Rele 50/51**.

#### 4.6.3.3 Evaluación del esquema de protección para una falla **F2**, a-T.

Para evitar la pérdida de coordinación con los dispositivos instalados aguas abajo del restaurador, se requiere además reajustar el valor de la corriente de arranque (**ITap**) y/o la palanca de tiempo (**Td**) de la curva de operación rápida y de la curva de operación lenta, estas curvas de tiempo inverso del restaurador se deben reajustar considerando el valor **rms** de la forma de onda de las corrientes de carga y fallas debidas a condiciones no-lineales, de tal manera que se conserve el tiempo de operación para cada una de las fallas, como cuando la forma de onda es puramente senoidal (véase casos de la sección 4.6.1). Para este caso en particular, sólo fue necesario incrementar el **ITap** (véanse los ajustes en el apéndice C-5), esto es debido a que el valor **rms** de las señales de corriente se incremento por consecuencia de la carga no-lineal.

En la figura 4.6.28 y 4.6.29, se observan las formas de onda de las corrientes medidas en el punto **B** para una falla **F2** a-T permanente y su espectro armónico durante la condición de falla, respectivamente. El restaurador realizó primero dos operaciones rápidas y después dos operaciones lentas, antes de abrir de manera permanente sus contactos (véase la figura 4.6.30). La coordinación con el **R-51** se mantiene, pues el recorrido de su disco no se completa, y por lo tanto éste no opera (véase la figura 4.6.31).



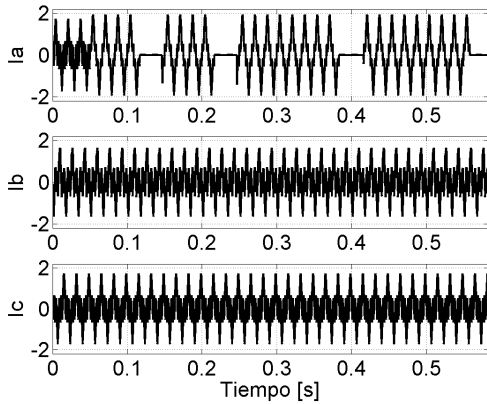


Figura 4.6.28. Formas de onda de las corrientes medidas en el punto **B**,  $I_{a_{max}}=1.929$  A-pico.

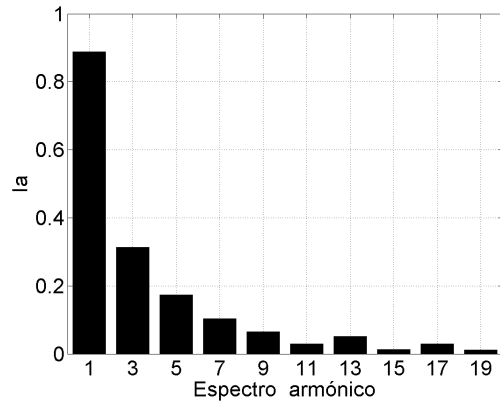


Figura 4.6.29. Espectro armónico para condición de falla de la fase **a**,  $I_T=0.97$  A.

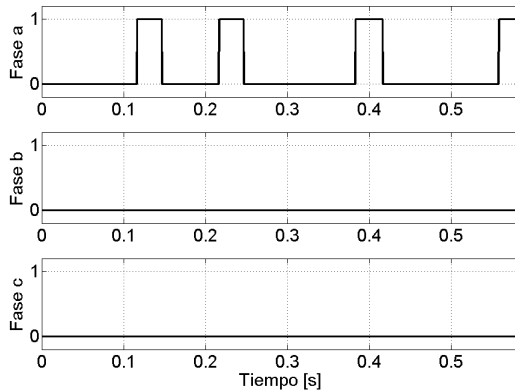


Figura 4.6.30. Estados de operación del **R**.

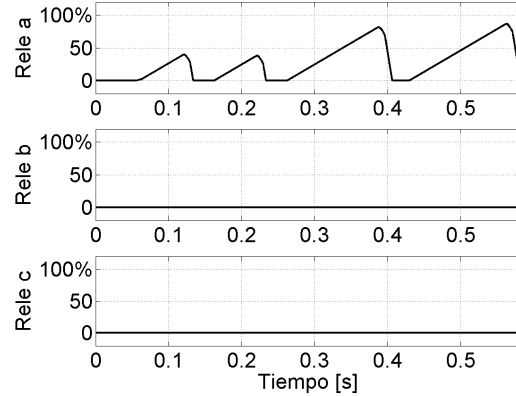


Figura 4.6.31. Posición de los discos de los **R-51's**

#### 4.6.3.4 Evaluación del módulo Rele 50/51 como protección de respaldo del restaurador.

Se simula una falla **F2 a-T**. Con la finalidad de evaluar la operación del **Rele 50/51** como protección de respaldo se deshabilita la operación del restaurador [52].

En la figura 4.6.32, se observan las formas de onda de las corrientes medidas en el punto **A** para una falla **F2, a-T**. Debido a que el restaurador no opera (véase la figura 4.6.33), la condición de falla es liberada después de 10 ciclos por el **R-51** correspondiente a la fase **a** (véase la figura 4.6.34).

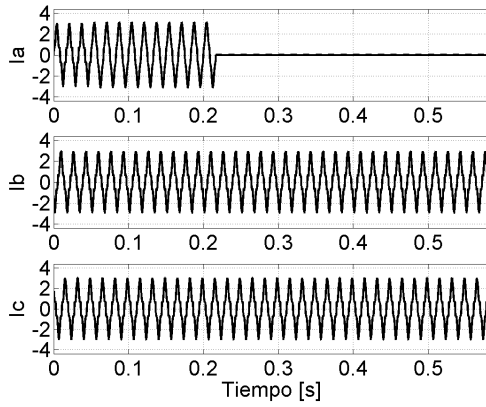


Figura 4.6.32. Formas de onda de las corrientes medidas en el punto **A**, falla F2 a-T.

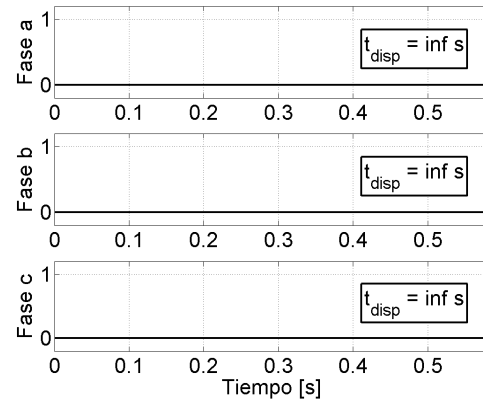


Figura 4.6.33. Estados de operación del **R**.

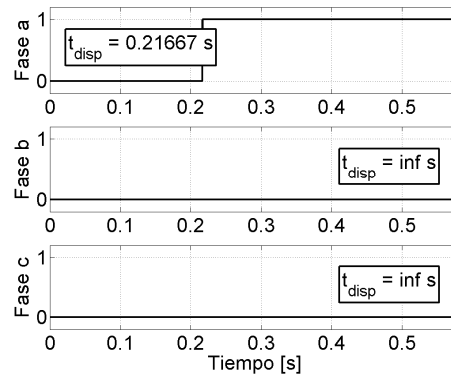


Figura 4.6.34. Estados de operación del **Relé 50/51**.



## CAPÍTULO 5

### CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES PARA TRABAJOS FUTUROS.

#### 5.1 Conclusiones.

En el desarrollo de este trabajo de tesis se obtuvieron las siguientes conclusiones para cada uno de los dispositivos que se simularon:

##### **Fusibles.**

- Cuando se seleccionan los fusibles para una red eléctrica que alimenta a cargas no-lineales, y esta selección se basa en estudios que consideran que la forma de onda de la corriente es puramente senoidal, se corre el riesgo de que los fusibles se fundan en condiciones nominales de carga, esto sucede sin alguna causa aparente de falla. Para seleccionar de manera adecuada los fusibles se debe considerar la forma de onda de la señal de corriente en condiciones nominales de carga y de falla, esto se consigue cuando se obtiene el valor **rms** de la corriente.

##### **Relevador de sobre corriente de tiempo inverso.**

- Cuando se realiza el ajuste de los relevadores de sobrecorriente de tiempo inverso en redes eléctricas que alimentan a cargas no-lineales, es necesario considerar el valor **rms** de las señales nominales de corriente, esto para determinar el ajuste de la corriente de arranque en el relevador de tiempo inverso, de esta manera se asegura que éste no operará

en condiciones nominales de carga. Esta misma consideración se debe hacer para condiciones de falla, donde la forma de onda de las corrientes esta distorsionada, y el valor **rms** de la corriente es menor o superior al esperado (según los ajustes realizados considerando una señal senoidal), por lo tanto se afectará la coordinación con otros dispositivos del esquema de protección de sobrecorriente.

### **Relevador de sobrecorriente instantáneo.**

- Para ciertas condiciones de falla, las cuales originan distorsión de la forma de onda de la corriente, el ajuste para los relevadores instantáneos que se basan en la determinación del valor **pico** de la señal de corriente, se debe realizar considerando la forma de onda de ésta, ya que el valor **pico** de estas corrientes se incrementa o decrementa, y como consecuencia, se produce sobreprotección o subprotección, respectivamente. Este fenómeno, hace que se pierda la coordinación en los esquemas de protección.

### **Restaurador.**

- Los ajustes en los restauradores que brindan protección a redes eléctricas que alimentan a cargas no-lineales, se deben realizar considerando el valor **rms** de la señal de corriente para condiciones de carga nominal, ya que debido al contenido armónico el valor **rms** se incrementa. Cuando se ajusta el restaurador considerando el valor **rms** de la corriente de carga nominal, se evita que el restaurador realice su secuencia de operaciones, y consecuentemente desconecte de la red eléctrica las cargas, esto sucedería sin alguna causa aparente de falla o régimen anormal de operación. Además, se debe considerar en la fluctuación del valor nominal de carga, el incremento del valor **rms** de la señal de corriente, esto con la finalidad de seleccionar los ajustes más adecuados, tales que permitan al restaurador realizar con seguridad su función incluso en condiciones de carga máxima.

### **Seccionalizador.**

- Para determinar los ajustes de los seccionalizadores, los cuales protegen a redes eléctricas que alimentan a cargas no-lineales, es necesario considerar el valor **rms** de la señal de corriente para condiciones de carga máxima, esto con la finalidad de evitar la operación del seccionalizador, cuando otro dispositivo de maniobra o protección instalado aguas arriba des-energice la red eléctrica, y esto se deba a alguna condición de falla ocurrida en otra rama de la red eléctrica, y no en la rama a la cual protege el seccionalizador en cuestión.

## **5.2 Aportaciones de la Tesis.**

Las aportaciones más sobresalientes en el desarrollo de este trabajo de tesis son:

- Se crearon cuatro módulos en PSCAD/EMTDC que simulan la operación de los dispositivos de protección de sobrecorriente empleados en las redes de distribución. Los módulos son: módulo Fusible, módulo Relevadores 50/51, módulo Restaurador y módulo Seccionalizador.
- La creación de los módulos de protección permitirá su aplicación didáctica y/o de investigación en esquemas de protección de sobrecorriente.
- Se crearon módulos que distorsionan las señales de las corrientes en los sistemas eléctricos de prueba, estos tiene la finalidad de simular la conexión de cargas no-lineales en las redes eléctricas.
- Se analizó y evaluó la operación de los módulos de protección en diferentes condiciones de carga y falla, de características lineales y no-lineales.
- Se desarrolló un programa en MatLab, el cual facilita el análisis grafico de los datos obtenidos de las simulaciones en PSCAD/EMTDC.

Los artículos publicados basados en la información obtenida del desarrollo del tema de tesis son:

- Águila M. Manuel, Sebastián B. David, **“Análisis de los tiempos de operación de relevadores de sobrecorriente electromecánicos en presencia de distorsión armónica”**, VII Simposio Iberoamericano sobre protecciones de sistemas eléctricos de potencia, Monterrey, Nuevo León, Noviembre 2004.
- Águila M. Manuel, Sebastián B. David, **“Algoritmo para la simulación de un relevador de sobrecorriente de tiempo inverso”**, 8<sup>vo</sup> congreso nacional de ingeniería electromecánica y de sistemas, IPN-SEPI-ESIME, D.F. 2004.
- Águila M. Manuel, Sebastián B. David, **“Coordinación de protecciones de sobrecorriente en sistemas de distribución utilizando EMTDC/PSCAD”**, IEEE RVP-AI/2005, Acapulco, Guerrero, Junio 2005.
- García A. Leticia, Sebastián B. David, **”Simulación de un restaurador trifásico de recierre monopolar para protección de sobrecorriente en redes de distribución, con EMTDC/PSCAD”**, IEEE RVP-AI/2005 Acapulco, Guerrero, Junio 2005.
- Águila M. Manuel, Sebastián B. David, **“Esquema de protección de sobrecorriente en sistemas de distribución empleando tres seccionadores”**, 4<sup>to</sup> congreso internacional de ingeniería electromecánica y de sistemas, IPN-SEPI-ESIME, D.F, Noviembre 2005.
- García A. Leticia, Águila M. Manuel, Sebastián B. David, **“Coordinación de dispositivos de sobrecorriente considerando carga lineal, y su evaluación con carga no-lineal”**, a exponer en la próxima IEEE RVP-AI/2006, Acapulco, Guerrero, Julio 2006.

### 5.3 Sugerencias y recomendaciones para trabajos futuros.

- Desarrollar metodologías para estudios de corto circuito y flujo de potencia que consideren la forma de onda de las señales de corriente y voltaje en las redes eléctricas que alimentan cargas no-lineales.
- Implementar los módulos de protección creados en PSCAD/EMTDC en alguna red de distribución más amplia.
- Crear módulos en PSCAD/EMTDC que simulen cargas no-lineales a partir de modelos matemáticos que las representen.



- 
- Emplear el equipo RTP (reproductor de señales en tiempo real) para generar señales trifásicas de corrientes distorsionadas, esto a partir del módulo creado en PSCAD/EMTDC, el cual simula cargas no-lineales.
  - Implementar la lógica de operación de los dispositivos de protección de sobrecorriente en un microcontrolador, para analizar su operación con las señales de corriente generadas con el RTP.
  - Reproducir en las simulaciones PSCAD/EMTDC los datos guardados por los registradores instalados en los sistemas de distribución.
  - Tomar en cuenta los tiempos reales de operación de los interruptores internos de los dispositivos de protección.
  - Considerar otros métodos de estimación de las señales de corriente en los dispositivos de protección de sobrecorriente.
  - Realizar una investigación análoga en los niveles de voltaje de transmisión.





## REFERENCIAS.

- [1] Helmut U., Wilibald W. and Andrej W. **“Protection techniques in electrical energy systems”**, Marcel Dkker, inc. 1995, pp. 3-7.
- [2] Harjeet S. Gill, **“An algorithm for protecting power transformers”**, Thesis of Master of Science in the Department of Electrical Engineering University of Saskatchewan, Canada, July 1997, pp 185.
- [3] Johns, A. T., and Walker, E. P., **“Genesis and evolution of advanced protection”**, Power Eng. J. 1991, 5 (4), pp. 177-187.
- [4] Belín D. J. Arturo, **“Desarrollo de un algoritmo de protección digital de distancia considerando distorsión armónica”**, Tesis para obtener el grado de maestro en ciencias, presentada en el departamento de ingeniería eléctrica y electrónica del Instituto Tecnológico de Morelia, Morelia Michoacán México septiembre 2000.
- [5] Horowitz S. H., Arun G. P., **“Power System Relaying”**, Research Studies Press LTD, Somerset, England, 1992, pp. 281.
- [6] Enríquez H. Gilberto, **“Fundamentos de Protección de Sistemas Eléctricos por Relevadores”**, México, Ed. Limusa, 1984.
- [7] Sebastián B. David, apuntes de clase, Materia: **“Protección de sistemas eléctricos de potencia”**, Sección de Estudios de Posgrado e Investigación de la ESIME Zacatenco, México D. F.
- [8] David E. Rice, **“Adjustable speed drive and power rectifier harmonics – their effects on power system components”**, IEEE Trans. on Industry Applications, vol. IA 22, No. 1, January/February 1986, pp. 161-177.
- [9] F. V. Topalis, **“Efficiency of energy saving lamps and harmonic distortion in distribution systems”**, IEEE Trans. Power Delivery, vol. 8, Oct. 1993, pp. 2038-2042.
- [10] N. Mohan, T. M. Undeland, and W. P. Robbins, **“Power Electronics Converters Applications and Design”**, John Wiley & Sons, 1989.
- [11] R. Dwyer et. al, **“Evaluation of harmonic impact from compact fluorescent lights on distribution systems”**, IEEE Trans. Power Systems, vol. 10, Nov. 1995, pp. 1772-1779.

- [12] Duane R. **”Harmonic management in MV distribution systems”**, Thesis submitted in fulfilment of the requirements for award of the degree Doctor Philosophy in the University of Wollongong, 2003.
- [13] Leon M. Tolbert, Harold D. Hollis and Peyton S. Hale, Jr., **”Survey of harmonics measurements in electrical distribution systems”**, IEEE IAS Annual Meeting, Oct. 6-10, 1996, San Diego, CA, pp. 2333-2339.
- [14] J. F. Fuller, E. F. Fuchs, **”Influence of harmonics on power distribution systems protection”**, IEEE transaction on power delivery, vol. 3, NO. 2, April 1988.
- [15] Kansas Electric Utilities Research Program, **”Harmonic testing of protective relays”**, Wichita State University Power Quality Lab, May 1994.
- [16] IEEE Task Force, **”Effects of harmonics on equipment”**, IEEE Trans. Power Delivery, Vol. 8, Apr, 1993, pp. 672-680.
- [17] IEEE Task Force, **”The effects of power systems harmonics on power systems equipment and loads”**, IEEE Trans. Power Apparatus and Systems, vol. PAS-104, Sept. 1985, pp. 2555-2563.
- [18] W. F. Horton and S. Goldberg, **”The effect of harmonics on operating points of electromechanical relays”**, IEEE Transaction on Power Apparatus and Systems, Vol. PAS 104, No. 5, May 1985, pp. 1178-1188.
- [19] F. A. Jost, D. F. Menzies, **”Effect of systems harmonics on power systems relays”**, paper presented at the Canadian Association Spring Meeting, 1974, March 1974.
- [20] IEEE Power Systems Relaying Committee, **”The impact of sine-wave distortion on protective relays”**, IEEE Transaction on Industry Applications, Vol. IA-20, No. 2, March/April 1984.
- [21] Stanley E. Zocholl and Gabriel Benmouyal, **”How microprocessor relay respond to harmonics, saturation, and other wave distortion”**, Schweitzer Engineering Laboratories, Inc. Pullman, WA USA.
- [22] R. Wilkins, J. F. de Palma, **”Effect of harmonic currents on semiconductor fuse ratings”**, Heswall, Wirral, CH60 OBZ, UK, Newburyport, MA 01950, USA.
- [23] W. A. Elmore, S. E. Zocholl, **”Effect of wave distortion on protective relays”**, ABB Power T&D Co., Inc.

- [24] **“Applied Protective Relaying”**, Westinghouse Electric Corp. Sections 22-1, 22-2.
- [25] W. B. Leuschner and L. Ray, **“Harmonic distortion contributes to accelerated fuse aging and premature failure”**, Presented at Power Quality 2000 conference, Boston, 3-5 Oct. 2000.
- [26] P. Silvester, **“Modal theory of skin effect in flat conductors”**, Proc IEEE, vol. 54, No. 9, Sept. 1996, pp. 1147-1151.
- [27] Ahmad M. Dakkak, **“Harmonic distortion in distribution fault current”**, Direct Study Report for M.S. Degree in Electrical Engineering, Wichita State University, May 1991.
- [28] A. Mansoor et. al, **“Predicting the net harmonic currents produced by large numbers of distributed single phase computer loads”**, IEEE Trans. Power Delivery, vol. 10, Oct. 1995, pp. 2001-2006.
- [29] J. Lai, D. Hurst, and T. Key, **“Switch mode power supply power factor improvement via harmonic elimination methods”**, Conf. Rec. Applied Power Electron. Conf. (Dallas, TX), Mar. 1991, pp. 415-422.
- [30] R. Dwyer et. al, **“Evaluation of harmonic impact from compact fluorescent lights on distribution systems”**, IEEE Trans. Power Systems, vol. 10, Nov. 1995, pp. 1772-1779.
- [31] Anderson Paul M., **“Power System Protection”**, IEEE Press series on Power Engineering, 1999, pp. 1307.
- [32] Lewis Blackburn, **“Protective Relaying Principles and Applications”**, 2<sup>a</sup> edition, editorial Marcel Dekker, New York, EE. UU. 1998, pp. 538.
- [33] Altuve Ferrer H. Jorge, **“Protección de sistemas eléctricos de potencia”**. Facultad de ingeniería eléctrica, Universidad Central de Las Villas Santa Clara, Cuba, 1991, pp. 47-69.
- [34] Edmund O. Schweitzer and Mark W. Feltis, **“Advances in microprocessor-based distribution relays”**, Schweitzer Engineering Laboratories, Inc. Pullman, WA USA.
- [35] Data Sheet, SEL-151 Distribution Relay, Schweitzer Engineering Laboratories, Inc. (1991).
- [36] Data Sheet, SEL-151C Distribution Bus Relay, Schweitzer Engineering Laboratories, Inc. (1991).
- [37] Data Sheet, SEL-251 Distribution Relay, Schweitzer Engineering Laboratories, Inc. (1992).

- [38] Ahmed F. Elneweih, “**Improved sensitivity and security for distribution bus and feeder relays**”, British Columbia Hydro and Power Authority, Edmund O. Schweitzer, III and Mark W. Feltis, Schweitzer Engineering Laboratories, Inc. Proceedings of the 18<sup>th</sup> Annual Western Protective Relay Conference, Spokane, Washington, Oct. 22-24, 1991. Washington State University, Conference and Institutes, Pullman, Washington.
- [39] Jeff Roberts and Edmund O. Schweitzer III, “**Analysis of event reports**”, Schweitzer Engineering Laboratories, Inc. Proceedings of the 16<sup>th</sup> Annual Western Protective Relay Conference, Spokane, Washington, Oct. 24-26, 1989. Washington State University, Conference and Institutes, Pullman, Washington.
- [40] Gers Juan M. “**Protection of electricity distribution networks**”. The institution of Electrical Engineers, London, United Kingdom, England, 1998, pp. 65-68.
- [41] Conde Enríquez Arturo. “**Fundamentación teórica y desarrollo de algoritmos para un relevador adaptativo de sobrecorriente**”. Tesis doctoral, Universidad Autónoma de Nuevo León, subdirección de posgrado, septiembre 2002.
- [42] C. Russell Mason, “**The Art and Science of Protective Relaying**”, 1956, John Wiley & Sons, Inc. New York, NY, ISBN 0 471 57552 6.
- [43] E. O. Schweitzer and S.E. Zocholl, “**The Universal Overcurrent Relay**”, IEEE Industry Applications Magazine, May/June 1996.
- [44] RED BOOK, IEEE, “**Electrical Power distribution for Industrial Plants**”, The Institute of Electrical and Electronics Engineers, USA, 1994 ,pp. 109-124.
- [45] SIEMENS, “**Catalogo de relevadores**”, Relevadores de distancia y sobrecorriente, relevador 7SJ511, Siemens March 1995.
- [46] G. Benmouyal, Chairman M. Meisinger, “**IEEE Standard inverse-time characteristic equations for overcurrent relays**”, IEEE Transaction on power delivery, Vol. 14, No. 3, July 1999.
- [47] Edmund O. Schweitzer, “**Introduction to symmetrical components**”, Schweitzer Engineering Laboratories, Inc. Pullman, WA USA.
- [48] Matthew St. John, Borgnino, “**Coordinating overcurrent protective devices**”, IEEE computer applications in power, 1996.

- [49] J. F. Witte, S. R. Mendis, **“Computer-aided recloser applications for distribution systems”**, IEEE computer applications in power, 1992.
- [50] Águila M. Manuel, Sebastián B. David, **“Coordinación de protecciones de sobrecorriente en sistemas de distribución utilizando EMTDC/PSCAD”**, IEEE RVP-AI/2005, Acapulco, Guerrero, Junio 2005.
- [51] Águila M. Manuel, Gonzáles F. Enrique, Sebastián B. David, **“Esquema de protección de sobrecorriente en sistemas de distribución empleando tres seccionalizadores”**, 4<sup>to</sup> congreso internacional de ingeniería electromecánica y de sistemas, IPN-SEPI-ESIME, D.F, Noviembre 2005.
- [52] García A. Leticia, Sebastián B. David, **”Simulación de un restaurador trifásico de recierre monopolar para protección de sobrecorriente en redes de distribución, con EMTDC/PSCAD”**, IEEE RVP-AI/2005 Acapulco, Guerrero, Junio 2005.
- [53] Patrick Heavey, Clint Whitney, **“RMS measuring principles in the application of protective relaying and metering”**, ABB inc, Vancouver, WA USA, 30<sup>th</sup> annual western protective relay conference, October 21<sup>st</sup> trough 23<sup>rd</sup>, 2003, Spokane, WA USA.
- [54] Indrajit Purkayastha, J. Savoie Paul, **“Rms digital trips increased accuracy & reliability advances in low voltage circuit breaker trip technology”**, General Electric, IEEE Paper No. PCIC 88-53.
- [55] E. O. Schweitzer, III, Daqing Hou, **“Filtering for protective relays”**, Schweitzer Engineering Laboratories, Inc, Pullman Washington, 47<sup>th</sup> annual Georgia Tech Protective Relaying Conference Atlanta, Georgia April 28-30, 1993.

Referencias de Internet.

- [1a] **”Fundamentals of protective relaying”**.

<http://www.ece.uidaho.edu/ee/classes/ECE526S05/text/>



## APÉNDICE A: Métodos de estimación de la magnitud de la corriente en los dispositivos de protección.

Existe una gran variedad de relevadores de sobrecorriente, los cuales emplean distintos métodos de medición para proveer protección a los equipos y líneas de los sistemas eléctricos. Esto incluye relevadores electromecánicos, de estado sólido y microprocesados [53].

Las tres principales variantes se listan a continuación:

- Método de estimación del valor pico de una señal de corriente.
- Método de estimación de la magnitud de la componente fundamental de una señal de corriente.
- Método de estimación del valor eficaz o **rms** de una señal de corriente.

### A-1. Método de estimación del valor pico de una señal de corriente.

Históricamente, en los relevadores analógicos o microprocesados la estimación del valor pico de una señal de corriente se estima considerando el valor **rms** para una señal puramente senoidal, donde la relación entre el valor pico estimado y el valor **rms** de la señal de corriente es 1.41417 [14, 54]. Para sistemas eléctricos donde las señales de corriente son puramente senoidales éste método de estimación es adecuado (véase la figura A.1), sin embargo, cuando las señales de corriente están distorsionadas el valor pico estimado es diferente al valor pico real de la señal de corriente, provocando sub-protección (véase la figura A.2) o sobre-protección (véase la figura A.3) en los sistemas eléctricos.

En la figura A.1, se observa una señal de corriente senoidal correspondiente a la siguiente expresión:

$$I_1 = 1 * \text{seno}(w_0 * t) | w_0 = 2 * \text{pi} * 60 \text{ Hz}$$

Ejemplo:

1. Para una señal de corriente  $I_2$ , donde el valor pico de la señal de corriente decrece debido al armónico de tercer orden, la estimación del valor pico es inadecuada, de tal manera que



si el relevador esta ajustado considerando el valor pico, éste sobre-protegerá. En la figura A.2, se observa que el valor pico estimado es mayor que el valor pico de la señal de corriente [14, 54].

$$I_2 = 1 * \text{seno}(w_0 * t) + .3 * \text{seno}(3 * w_0 * t) | w_0 = 2 * \text{pi} * 60 \text{ Hz.}$$

2. Para una señal de corriente  $I_2$ , donde el valor pico de la señal de corriente aumenta debido al armónico de tercer orden desfasado  $180^\circ$ , la estimación del valor pico es inadecuada, ya que si el relevador esta ajustado considerando el valor pico, éste sub-protegerá. En la figura A.3, se observa que el valor pico estimado es menor que el valor pico de la señal de corriente [14, 54].

$$I_3 = 1 * \text{seno}(w_0 * t) - 0.3 * \text{seno}(3 * w_0 * t) | w_0 = 2 * \text{pi} * 60 \text{ Hz.}$$

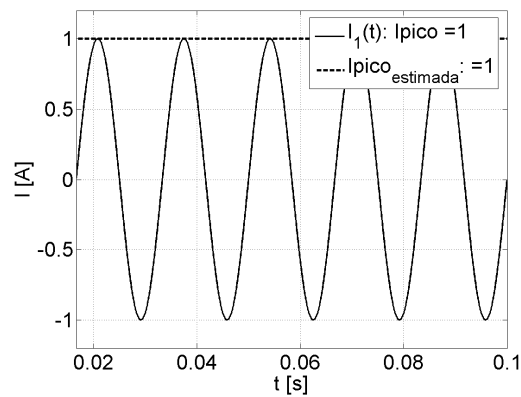


Figura A.1. Estimación del valor pico de una señal de corriente  $I_1(t)$  senoidal.

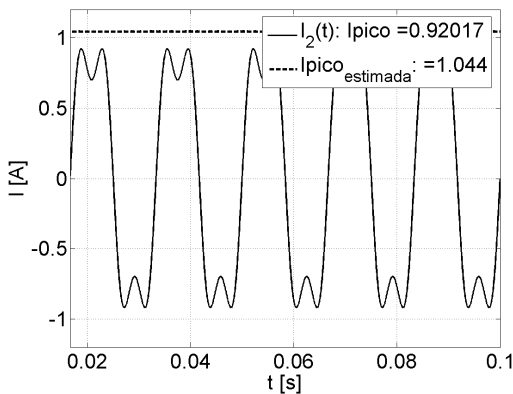


Figura A.2. Estimación del valor pico de una señal de corriente  $I_2(t)$  con:  $h_1=1$ ,  $h_3=0.3$ .

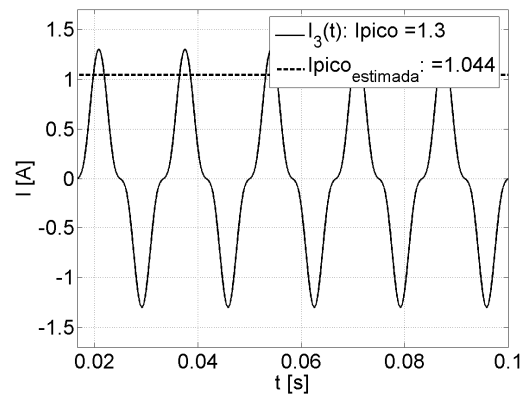


Figura A.3. Estimación del valor pico de una señal de corriente  $I_3(t)$  con:  $h_1=1$ ,  $h_3=-0.3$ .

## A-2. Método de estimación de la magnitud de la componente fundamental de una señal de corriente.

Algunos dispositivos de protección están diseñados para estimar solamente la magnitud de la componente fundamental ( $h_1$ ), y discriminar el resto de componentes armónicas que compongan a una señal de corriente distorsionada. Para discriminar el resto de las componentes armónicas se emplea un filtro pasivo, analógico o digital [55]. El filtro se diseña considerando la frecuencia de la señal fundamental de corriente del sistema eléctrico, es decir 60 Hz [21].

En la figura A.4, se observa el valor de la magnitud estimada de la componente fundamental  $h_1$  para una señal de corriente puramente senoidal  $I_1(t)$ .

En la figuras A.5, se observa el valor de la magnitud estimada de la componente fundamental  $h_1$  para una señal  $I_4$  distorsionada, obsérvese que el valor estimado es unitario (igual que cuando la señal es puramente senoidal) aunque la señal de corriente este distorsionada.

$$I_4 = 1 * \text{seno}(w_0 * t) + 0.75 * \text{seno}(3 * w_0 * t) + 0.63 * \text{seno}(5 * w_0 * t) + 0.35 * \text{seno}(9 * w_0 * t) | w_0 = 2 * \pi * 60 \text{ Hz.}$$

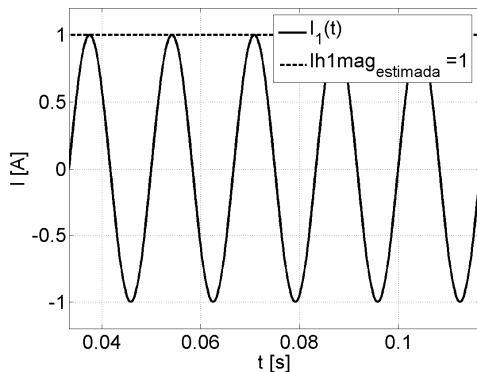


Figura A.4. Estimación de la magnitud de la componente fundamental  $h_1$  de una señal de corriente  $I_1(t)$  senoidal.

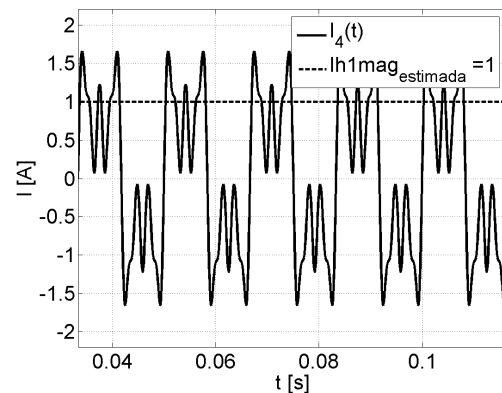


Figura A.5. Estimación de la magnitud de la componente fundamental  $h_1$  de una señal de corriente  $I_4(t)$  con:  $h_1=1$ ,  $h_3=0.75$ ,  $h_5=0.63$ ,  $h_9=0.35$ .

### A-3. Método de estimación del valor eficaz o rms de una señal de corriente.

El método de estimación considerando el valor **rms** es el más adecuado pues considera el valor eficaz de la corriente. La manera adecuada de proveer protección a los sistemas eléctricos debe considerar el valor **rms**, puesto que éste parámetro considera el verdadero valor de la corriente que circula por los elementos y dispositivos del sistema eléctrico, sin embargo en general éste criterio no se aplica [15, 53].

El valor **rms** o eficaz de una señal de alterna de corriente se determina empleando la siguiente expresión:

$$I_{\text{rms}} = \sqrt{\frac{1}{T} \int_0^T i(t)^2 dt} , \text{ donde } i(t) \text{ es la función que define la señal de corriente en un periodo } T.$$

En la figura A.6, se observa el valor **rms** estimado para una señal de corriente puramente senoidal  $I_1(t)$ . Obsérvese que para una señal puramente senoidal el valor **rms** se obtiene dividiendo el valor pico de la señal por  $\sqrt{2}$ .

En las figuras A.7 y A.8, se puede observar que para dos señales de corriente  $I_2(t)$  e  $I_3(t)$ , ambas distorsionadas por un armónico h3 de la misma magnitud (pero desfasado  $180^\circ$  para  $I_3(t)$ ), el valor **rms** estimado es igual para ambas señales de corriente ( $I_2(t)$  e  $I_3(t)$ ), sin embargo, el valor pico en la figura A.7 se decrementa, y en la figura A.8 se incrementa. Esto permite observar que la protección de sobrecorriente basada en el valor **rms** es más adecuada que cuando solo se considera el valor pico (véase las figuras A.2, A.3) o la magnitud de la componente fundamental h1 (véase la figura A.5).

Finalmente, en la figura A.8, se observa la estimación del valor **rms** para una señal de corriente  $I_4(t)$ . Obsérvese, que el valor pico y el valor **rms** de la señal de corriente se incrementaron, esto se debe a la magnitud y orden de las componentes armónicas.

Para mayor información acerca de los métodos de estimación de magnitudes (de corriente y voltaje) en dispositivos de protección, consulte la referencia [55].

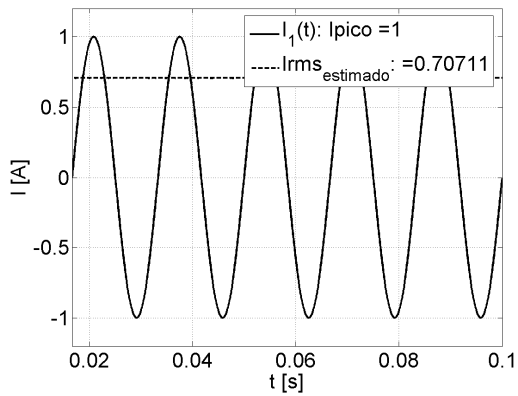


Figura A.6. Estimación del valor **rms** de una señal de corriente  $I_1(t)$  con:  $h_1=1$ .

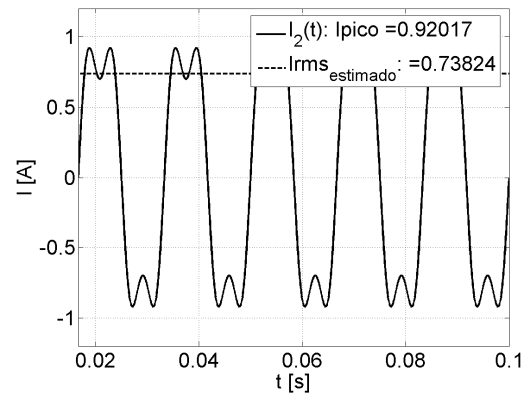


Figura A.7. Estimación del valor **rms** de una señal de corriente  $I_2(t)$  con:  $h_1=1$ ,  $h_3=0.3$ .

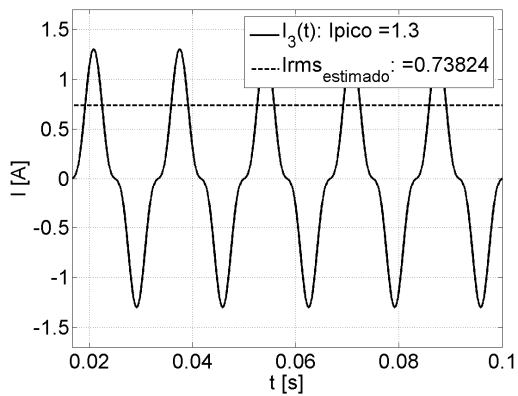


Figura A.8. Estimación del valor **rms** de una señal de corriente  $I_3(t)$  con:  $h_1=1$ ,  $h_3=-0.3$ .

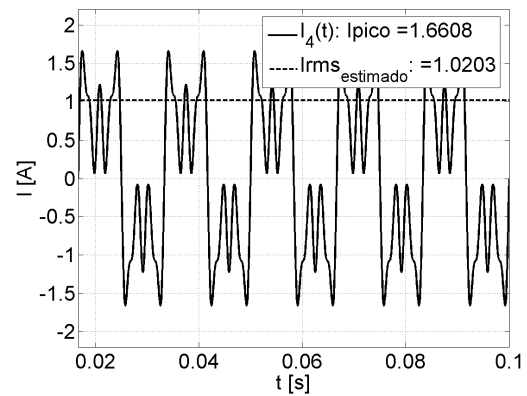


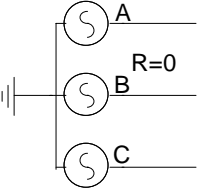
Figura A.9. Estimación del valor **rms** de una señal de corriente  $I_4(t)$  con:  $h_1=1$ ,  $h_3=0.75$ ,  $h_5=0.63$ ,  $h_9=0.35$ .

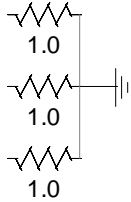


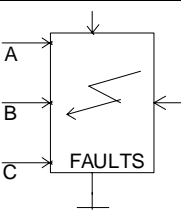
## APÉNDICE B: Ajustes para los modelos y bloques en el PSCAD/EMTDC.


### B-1. Ajuste para los modelos y bloques del sistema de prueba de la figura 3.2.4.

Ajustes del proyecto en PSCAD	
Tiempo de simulación:	0.166667 s
Incremento de tiempo (en todas las simulaciones del capítulo tres):	347.222 $\mu$ s (48 mpc).
Frecuencia de muestreo (en todas las simulaciones del capítulo tres):	2880 Hz.

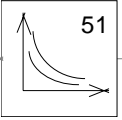
Fuente trifásica de voltaje		
	Impedancia:	Ideal ( $R = 0 \Omega$ )
	Desfasamiento:	$0^\circ$
	Control de voltaje y frecuencia:	interno
	Voltaje (CA, L-L, rms):	1.7320508 V
	Rampa de arranque:	0 s
	Frecuencia:	60 Hz

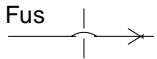
Carga trifásica conectada en estrella		
	Resistencia:	$1 \Omega$

Módulo trifásico de fallas.		
	Control:	Externo
	Neutro a tierra:	Si
	Resistencia de falla:	$1\Omega$
	Resistencia en modo abierto:	$1 M\Omega$

Medidor rms		
	Tipo de medidor:	digital
	Frecuencia fundamental:	60 Hz
	Muestras por ciclo (mpc):	48
	Valor rms inicial:	0

**B-2. Ajustes de los parámetros para los fusibles del sistema de prueba de la figura 3.2.13.**

Modelo de relevador 51.		
 $t_{trip} = TD \left( \frac{A}{M^p - 1} + B \right) + K$ $t_{reset} = TD \left( \frac{t_r}{1 - M^q} \right)$ ** Ref: [48].	ITap:	1.0
	Palanca de tiempo:	0.025
	**Constante A:	0.0521
	Constante B:	0.113
	Constante k:	0.0
	Constante p:	0.02
	Constante $t_r$ :	1 s
	Constante q:	2

Interruptor monofásico.		
	Nombre de la señal que activa al interruptor:	Fus
	Se permite la apertura si fluye corriente?:	No
	Resistencia en estado abierto:	1 MΩ
	Resistencia en estado cerrado:	0.0 Ω

### B-3. Ajustes de los parámetros para los transformadores de corriente y los relevadores de la figura 3.3.1

Transformadores de corriente.		
	Relación de transformación:	2:1

Modelo de relevador 51.		
	ITap:	0.5
	Palanca de tiempo:	0.025
	Constante A:	0.0521
	Constante B:	0.113
	Constante k:	0.0
	Constante p:	0.02
	Constante $t_r$ :	1 s
	Constante q:	2

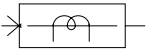
Modelo de relevador instantáneo 50.		
	Limite de corriente:	2.45 A

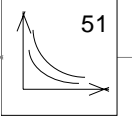
Interruptor trifásico monopolar.		
	Nombre de la señal que activa al interruptor:	brkRl_a, brkRl_b y brkRl_c
	Se permite la apertura si fluye corriente?:	No
	Resistencia en estado abierto:	1 M $\Omega$
	Resistencia en estado cerrado:	0.0 $\Omega$

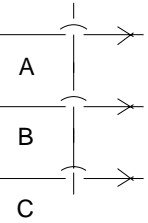


**B-4. Ajustes de los parámetros para el restaurador de la figura 3.4.1.**

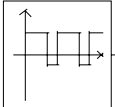
Ajustes del proyecto en PSCAD	
Tiempo de simulación:	0.4 s
Incremento de tiempo:	347.222 $\mu$ s (48 mpc)


Transformadores de corriente.		
	Relación de transformación:	2:1

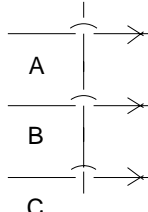
Modelo de relevador 51.		
	ITap:	0.5
	Palanca de tiempo (operaciones rápidas):	.0065
	Palanca de tiempo (operaciones lentas):	0.0173375
	Constante A:	0.0521
	Constante B:	0.113
	Constante k:	0.0
	Constante p:	0.02
	Constante $t_r$ :	1 s
Constante q:	2	

Interruptor trifásico.		
	Nombre de la señal que activa al interruptor:	brkR_a, brkR_b y brkR_c
	Se permite la apertura si fluye corriente?:	No
	Resistencia en estado abierto:	1 M $\Omega$
	Resistencia en estado cerrado:	0.0 $\Omega$

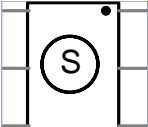
**B-5. Ajustes de los parámetros del sistema para evaluar el seccionizador 3.5.1.**


Generador de señales.		
	Frecuencia de la señal:	10 Hz
	Desfasamiento:	180°
	Tipo de señal:	Pulso
	Ancho del pulso:	50%
	Nivel máximo:	500
	Nivel mínimo:	1

Resistencia variable.		
	Resistencia:	R1

Interruptor trifásico.		
	Nombre de la señal que activa al interruptor:	brkR_a, brkR_b y brkR_c
	Se permite la apertura si fluye corriente?:	No
	Resistencia en estado abierto:	1 MΩ
	Resistencia en estado cerrado:	0.0 Ω

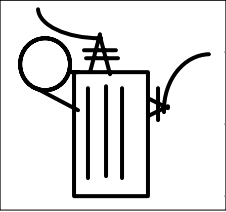
**B-6. Ajustes de los parámetros para el Seccionizador de la figura 3.5.1.**

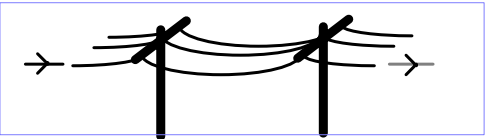
	Módulo Seccionizador.	
	# acciones:	2
	I nominal (rms):	0.5 A
	Imín:	5%

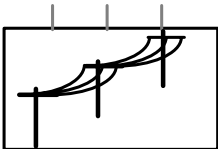
	Iacción:	140%
	Relación de transformación:	2:1

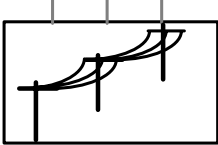
**B-7. Ajustes de los parámetros del sistema de prueba de la figura 3.5.1.**

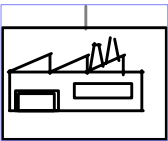
Ajustes del proyecto en PSCAD	
Tiempo de simulación:	0.4 s
Incremento de tiempo:	347.222 $\mu$ s (48 mpc)


Subestación (fuente trifásica de voltaje)		
	Impedancia:	Ideal ( $R=0 \Omega$ )
	Desfasamiento:	$0^\circ$
	Control de voltaje y frecuencia:	interno
	Voltaje (CA, L-L, rms):	148.05 V
	Rampa de arranque:	0 s
	Frecuencia:	60 Hz

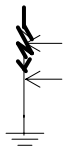
Línea (L1, L2, L3 y L4)		
	Resistencia:	1 $\Omega$

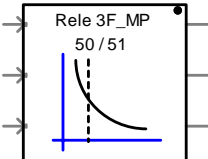
Carga C1		
	Resistencia:	3.5 $\Omega$

Carga C2		
	Resistencia:	11.25 $\Omega$

Carga C3		
	Resistencia:	6.55 $\Omega$

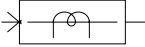
Carga C4-1, 2 y 3.		
	Resistencia:	4.35 $\Omega$

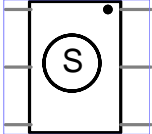
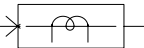
Módulo unifilar trifásico de fallas (F1, F2, F3 y F4)		
	Control:	Externo
	Neutro a tierra:	Si
	Resistencia de falla:	0.1 $\Omega$
	Resistencia en modo abierto:	1*10e6 $\Omega$


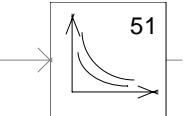
	Módulo Relevador 50/51.	
	ITap:	3.25

	Palanca de tiempo:	0.0217456
	Constante A:	0.0521
	Constante B:	0.113
	Constante k:	0.0
	Constante p:	0.02
	Constante $t_r$ :	1 s
	Constante q:	2
	Limite de corriente:	11.3137
	Relación de transformación:	10:1

	Módulo Restaurador.	
	ITap:	1.5
	Palanca de tiempo (operaciones rápidas):	0.0024268
	Palanca de tiempo (operaciones lentas):	0.0048536
	Constante A:	0.0521
	Constante B:	0.113
	Constante k:	0.0
	Constante p:	0.02
	Constante $t_r$ :	1 s
	Constante q:	2

	Relación de transformación:	10:1
---	-----------------------------	------

	Módulo Seccionalizador.	
	# acciones:	3
	I nominal ( <b>rms</b> ):	1.0476 A
	Imín:	10%
	Iacción:	140%
	Relación de transformación:	2:1


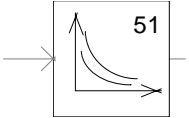
		Módulos Fusibles <b>a, b y c.</b>
	ITap:	6.0
	Palanca de tiempo:	0.026305
	Constante A:	0.0521
	Constante B:	0.113
	Constante k:	0.0
	Constante p:	0.02
	Constante $t_r$ :	1 s
	Constante q:	2

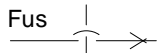


## APÉNDICE C: Ajustes para los modelos y bloques en el PSCAD/EMTDC.

### C-1. Ajustes de los parámetros para los fusibles de la figura 4.2.1.


Ajustes del proyecto en PSCAD	
Incremento de tiempo (en todas las simulaciones del capítulo cuatro):	115.741 $\mu$ s (144 mpc).
Frecuencia de muestreo (en todas las simulaciones del capítulo cuatro):	8640 Hz.

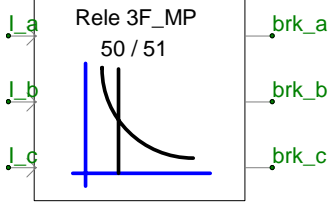
Ajustes para los fusibles de la figura 4.2.1.		
	Módulos Fusibles a, b y c.	
	ITap:	1.25
	Palanca de tiempo:	0.0177
	Constante A:	0.0521
	Constante B:	0.113
	Constante k:	0.0
	Constante p:	0.02
	Constante $t_r$ :	1 s
	Constante q:	2

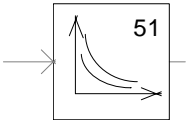
Interruptor monofásico.		
	Nombre de la señal que activa al interruptor:	Fus
	Se permite la apertura si fluye corriente?:	No
	Resistencia en estado abierto:	1 M $\Omega$
	Resistencia en estado cerrado:	0.0 $\Omega$

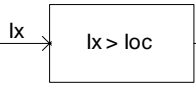


## C-2. Ajustes de los parámetros para los transformadores de corriente y los relevadores de la figura 4.3.1

Transformadores de corriente.		
	Relación de transformación:	2:1

	Módulo relevador R-50/51.
---	---------------------------

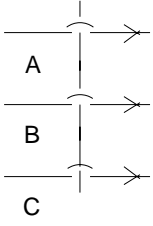
	ITap:	0.675
	Palanca de tiempo:	0.0149
	Constante A:	0.0521
	Constante B:	0.113
	Constante k:	0.0
	Constante p:	0.02
	Constante t <sub>r</sub> :	1 s
	Constante q:	2

Modelo de relevador instantáneo 50.		
	Limite de corriente:	2.5

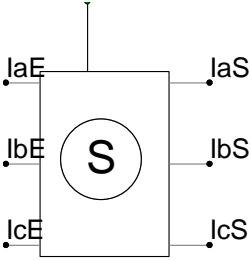
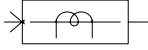
Interruptor trifásico.		
	Nombre de la señal que activa al interruptor:	brkRl_a, brkRl_b y brkRl_c
	Se permite la apertura si fluye corriente?:	No
	Resistencia en estado abierto:	1 MΩ
	Resistencia en estado cerrado:	0.0 Ω

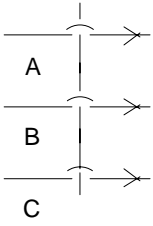
### C-3. Ajustes de los parámetros para el módulo Restaurador de la figura 4.4.1

	Módulo Restaurador.	
	Secuencia de operaciones:	
	Operaciones rápidas	Operaciones lentas
	2	1
	ITap:	0.65
	Palanca de tiempo (operaciones rápidas):	0.0065
	Palanca de tiempo (operaciones lentas):	0.017337
	Constante A:	0.0521
	Constante B:	0.113
	Constante k:	0.0
	Constante p:	0.02
	Constante $t_r$ :	1 s
Constante q:	2	
	Relación de transformación:	10:5

Interruptor trifásico.		
	Nombre de la señal que activa al interruptor:	brkR_a, brkR_b y brkR_c
	Se permite la apertura si fluye corriente?:	No
	Resistencia en estado abierto:	1 MΩ
	Resistencia en estado cerrado:	0.0 Ω

#### C-4. Ajustes de los parámetros para el módulo Seccionalizador de la figura 4.5.1

Módulo Seccionalizador.		
	# acciones:	2
	I nominal (rms):	0.5
	Imín:	10 %
	Ioperación	140 %
	Relación de transformación:	2:1

Interruptor trifásico.		
	Nombre de la señal que activa al interruptor:	brkS_a, brkS_b y brkS_c
	Se permite la apertura si fluye corriente?:	No
	Resistencia en estado abierto:	1 MΩ
	Resistencia en estado cerrado:	0.0 Ω

**C-5. Ajustes de los parámetros para el sistema eléctrico de la figura 4.6.3.**

Ajustes del proyecto en PSCAD	
Tiempo de simulación:	0.7 s

Fuente trifásica de voltaje		
	Impedancia:	Ideal ( $R=0 \Omega$ )
	Desfasamiento:	$0^\circ$
	Control de voltaje y frecuencia:	interno
	Voltaje (CA, L-L, rms):	1.7320508 V
	Rampa de arranque:	0 s
	Frecuencia:	60 Hz
Líneas: L1 y L2.		
	Resistencia:	$0.25 \Omega$

Carga lineal C1.		
	Resistencia:	$0.5 \Omega$

Carga lineal C2.		
	Resistencia:	1 $\Omega$

Módulo trifásico de fallas, F1 y F2.		
	Control:	Externo
	Neutro a tierra:	Si
	Resistencia de falla:	0.5 $\Omega$
	Resistencia en modo abierto:	1 M $\Omega$

**C-6 Ajustes de los parámetros para los transformadores de corriente y el módulo de relevadores de la figura 4.6.3 (considerando condiciones de carga lineal).**

Transformadores de corriente.		
	Relación de transformación:	2:1

	Módulo relevador 50/51.	
	Condiciones lineales	Condiciones no-lineales
ITap:	0.875	Se conserva ---
Palanca de tiempo:	0.00618	---
Constante A:	0.0521	---

	Constante B:	0.113	---
	Constante k:	0.0	---
	Constante p:	0.02	---
	Constante $t_r$ :	1 s	---
	Constante q:	2	---

Modelo de relevador instantáneo 50.			
	Limite de corriente:	Condiciones lineales	Condiciones no-lineales
		1.75	2.05

Interruptor trifásico.		
	Nombre de la señal que activa al interruptor:	brkRl_a, brkRl_b y brkRl_c
	Se permite la apertura si fluye corriente?:	No
	Resistencia en estado abierto:	1 M $\Omega$
	Resistencia en estado cerrado:	0.0 $\Omega$

**C-7 Ajustes de los parámetros para el restaurador de la figura 4.6.3 (considerando condiciones de carga lineal).**

Ajustes de las curvas de tiempo inverso en el restaurador.			
	Secuencia de operaciones:		
	Operaciones rápidas:	Operaciones lentas:	
	2	1	
	ITap:	Condiciones lineales	Condiciones no-lineales
		0.43	0.472

	Palanca de tiempo (operaciones rápidas):	0.0005	---
	Palanca de tiempo (operaciones lentas):	0.0012	---
	Constante A:	0.0521	---
	Constante B:	0.113	---
	Constante k:	0.0	---
	Constante p:	0.02	---
	Constante $t_r$ :	1 s	---
	Constante q:	2	---
Transformadores de corriente.			
	Relación de transformación:	2:1	

Interruptor trifásico.		
	Nombre de la señal que activa al interruptor:	brkR_a, brkR_b y brkR_c
	Se permite la apertura si fluye corriente?:	No
	Resistencia en estado abierto:	1 MΩ
	Resistencia en estado cerrado:	0.0 Ω



## APÉNDICE D.

### D-1. Algoritmo del programa GTS.m (matlab v 7.0).

```

status = fclose('all'); clear; clc; clf;
% Espesor de la línea
Tl=2.25;
% Tamaño de la letra
TL=22;
%%%%%%%%% VARIABLES QUE SE REQUIEREN GRAFICAR EN COLUMNAS DEL PSCAD
%%%%%%%%%
% La variable que se quiere graficar de la lista de
vari=input('Que variable ( o variables [4 5 6] -también para armónicas- ) requiere graficar?: ');
%%%%%%%%%
%%%%%%%%% INTRODUCZA LA DIRECCIÓN Y EL NOMBRE DE
%%%%%%%%% LA CARPETA QUE CONTIENE LOS ARCHIVOS,
%%%%%%%%% ASÍ COMO EL TOTAL DE VARIABLES EN EL MISMO
%%%%%%%%% dirección de los archivos de datos, ej: D:\ArtAcap_CNL.emt\ArtAcap_CNL_01.out
dir1=strcat('E:\Cap_III\SecTriF_mP_n.emt,'); % No olvide poner \ al final
%% Nombre de los archivos de datos
NomArch='SecTriF'; % no ponga _01, _10, etc.
%% extensión del archivo de datos
dir3='.out';
%% Cuantas variables en total tiene la simulación?:
CV=12;
%% Cuantas muestras por ciclo son?
nmpc=48;
%% Cuantos datos hay en el archivo que se desea abrir?... = # Muestras por ciclo X f0 X tiempo de
simulación X # variables.
NdatosArch=8000000; % nmpc*f0*tSim*CV;
%%%%%%%%%
CUA=round(10*(CV/10-floor(CV/10))+1); % Columnas Ultimo Archivo
%% calcula los limites, para determinar cual de los archivos es de menos de
%% 11 columnas.
Lim=[10*floor(CV/10), 10*floor(CV/10)+10]; %variables de PSCAD
[f NVG]=size(vari); %% NVG Numero de Variables que se requieren Graficar
disp('Corrientes: c');
disp('Estados de operación: e');
disp('Recorrido de discos: d');
disp('Espectro armónico: a')
disp('Graficado especial: l'); % L de Lizeth (Elizabeth)
disp('Desea comparar los estados de dos dispositivos: v');
TG=abs(input('Que tipo de variables son: ', 's')); % Tipo de Grafica

if TG==99

```





```

TGaux=abs(input('desea graficar el valor RMS?, Si (1), No (0); ')); %Opción para graficar rms axis[ 0
Xmax, 0 Ymax ]
elseif TG==118 %% Arreglo para que llame al programa Compara;
    Compara;
    break
end
TGl=zeros(NVG,1);
% a 97 valores equivalentes de cada carácter
% c 99
% e 101
% d 100
% l 108
%% Etiquetas del o los ejes Y en las graficas:
if TG==99
    IS=cellstr(['Ia';'Ib';'Ic']);
elseif TG==97
    Fh=input('Que fase deseas graficar a:1 b:2 c:3 : '); % fase que se quiere graficar
    ord=input('Cuales son las armónicas [1 5 8 11] ? : '); % orden de las armónicas que se graficarán
    % Localización de la primer variable armónica, para generar la posición de las siguientes
    %phAr=input('Localización de la primer armónica?: ');
    [c1 hs]=size(ord); % para hallar la ultima armónica HarmonicaS (hs)
    [f NVG]=size(vari);
    TGl=zeros(NVG,1);
    IS=cellstr(['Ia';'Ib';'Ic']); % etiquetas en Y para cada plot de barras
elseif TG==101
    IS=cellstr(['Fase a';'Fase b';'Fase c']);
elseif TG==100
    IS=cellstr(['Rele a';'Rele b';'Rele c']);
elseif TG==108
    %%%%%%%%%%% TGl se inicia con ceros, de lo contrario no corre el programa
    %%%%%%%%%%% con una sola variable que se requiera graficar.
    for i=1:NVG
        EV=strcat('Etiqueta para la variable_',num2str(i),' ? : '); %Etiqueta Variable
        IS(i,1)=cellstr(input(EV,'s'));
        ETG=strcat('Que tipo de variable es ',num2str(i),' ? : '); %Etiqueta Tipo Grafica
        TGl(i,1)=abs(input(ETG,'s')); %Tipo de Grafica lizeth
    end
else
    break
end
%% etiqueta del eje X para las graficas:
st=('Tiempo [s]');
%%%%%%%%%%
for i=1:NVG % repite el procedimiento para hallar el archivo y la(s) columna(s) de la(s)
    % variable(s) que se graficara(n)
    var=vari(i)/10; % Divide por 10 para hallar el entero del numero
    Arch=floor(var)+1; % Archivo donde se halla la variable
    if var<1 % para hallar la columna del archivo Arch que se requiere graficar
        col=round(var*10+1);
    else
        col=round(10*(var-(Arch-1))+1);
    end
end

```







```

% poss=[ x1; y1; y2; y3]
poss=[ ejeX/7.5 .55 .55 .2 ];
else
    poss=[ ejeX/7.5+2*ejeX .55 .55 .2 ];
end
text(poss(1),poss(2), ['t_d_i_s_p = ',tiempodisp,' s'],...
'EdgeColor','black','BackgroundColor',[1 1
1],'FontName','Helvetica','LineWidth',1,'Margin',3,'FontSize',TL);
elseif DGI==1 % Imprime la etiqueta cuando se quiere graficar solo un intervalo de tiempo
    [vec,F]=max(datosG((Ctini:Ctfin),i+1));
    if F ~= 1
        tiempodisp=num2str(datosG((F-1)+(Ctini-1),1)); %% Desplaza la casilla respectiva en
el tiempo (columna 1)
    elseif vec==1 && F==1
        tiempodisp='---';
    else
        tiempodisp='inf';
    end
    [filis,C]=size(datosG(Ctini:Ctfin,i+1));
    ejeX=(Cfin/60-Cini/60)/3;
    if Cini ~= 0
        tmin_disp=datosG((F-1)+(Ctini-1),1); % Falta checar la posición 1/3 en el eje X
    else
        tmin_disp=datosG((F-1)+(Ctini-1),1);
    end
    if tmin_disp >= (ejeX+Cini/60)
% poss=[ x1; y1; y2; y3]
    poss=[ ejeX/7.5+Cini/60 .55 .55 .2 ];
    else
        poss=[ ejeX/7.5+2*ejeX+Cini/60 .55 .55 .2 ];
    end
    text(poss(1),poss(2), ['t_d_i_s_p = ', tiempodisp,' s'],...
'EdgeColor','black','BackgroundColor',[1 1
1],'FontName','Helvetica','LineWidth',1,'Margin',3,'FontSize',TL);
end
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
if DGI==1
    axis([Cini/60 Cfin/60 -0.2 1.2]);
elseif DGI==0
    axis([0 tf -.2 1.2]);
end
set(gca,'YTick',[0 1], 'FontSize',TL);
elseif (TG==100) || (TG1(i,1)==100)
% Axis para TG: Disco
if DGI==1
    axis([Cini/60 Cfin/60 -0.2 1.2]);
elseif DGI==0
    axis([0 tf -.2 1.2]);
end
set(gca,'YTick',[0 .5 1], 'FontSize',TL);
set(gca,'YTicklabel',{'0' '50' '100%'}, 'FontSize',TL);
end
end

```



```

%% Etiqueta para el eje y
    ylabel(IS(i,1),'FontSize',TL);
%% Etiqueta para el eje x
    %%%%%%%%%%%%%%%
    if NVG==1
        xlabel(st,'FontSize',TL);
    else
        if i==NVG
            xlabel(st,'FontSize',TL);
        end
    end
    end
    %%%%%%%%%%%%%%%
    grid on
    hold on
end
DG=input(' Desea Guardar la figura? (NO = 0, Si = 1): ');
%%% Extensión del archivo para guardar la grafica
dg='.png';
CG=mat2str(vari); % Columnas Graficadas
if DG==1
    if TG==99
        ETG='Cor';
    elseif TG==101
        ETG='Est';
    elseif TG==100
        ETG='Disc';
    elseif TG==108
        ETG='GEsp';
    end
    saveas(gcf,strcat(dir1,NomArch,'_',ETG,'_',CG,dg)); %% Etiqueta Tipo Grafica
end
else
    cG=input('En que ciclo desea obtener la FFT?: '); % Ciclo para obtener la FFT Graficar
    mArc=cG*nmpc; % Muestras en el Archivo = Ciclo para obtener la FFT Graficar * Muestras Totales
en el Archivo
    bar(ord,datosG(mArc,(2:hs+1)),0.75,'k')
    set(gca, 'FontSize',TL);
    ylabel(IS(Fh,1),'FontSize',TL);
    xlabel('Espectro armónico','FontSize',TL);
    grid
    DG=input(' Desea Guardar la figura? (NO = 0, Si = 1): ');
    %%% Extensión del archivo para guardar la grafica
    dg='.png';
    CG=mat2str(vari); % Columnas Graficadas
    if DG==1
        ETG='arm';
        saveas(gcf,strcat(dir1,NomArch,'_',ETG,'_',CG,dg));
    end
end
end

```