UNIVERSIDAD AUTONOMA DE NUEVO LEON
FACULTAD DE INGENIERIA MECANICA
Y ELECTRICA
SUBDIRECCION DE POSTGRADO

FUNDAMENTACION TEORICA Y DESARROLLO DE ALGORITMOS PARA UN RELEVADOR ADAPTIVO DE SOBRECORRIENTE

TESIS

QUE PARA OBTENER EL GRADO DE
DOCTOR EN INGENIERIA ELECTRICA

PRESENTA

ARTURO CONDE ENRIQUEZ

SAN NICOLAS DE LOS GARZA, N. L. SEPTIEMBRE 2002

ACE

FUNDAMENTACION TEORICA Y DESARROLLO DE ALGORITMOS PARA UN RELEVADOR ADAPTIVO DE SOBRECORRIENTE

TD
Z5853
.M2
FIME
2002
.C66
2002

1020150646

UNIVERSIDAD AUTONOMA DE NUEVO LEON
FACULTAD DE INGENIERIA MECANICA
Y ELECTRICA
SUBDIRECCION DE POSTGRADO

FUNDAMENTACION TEORICA Y DESARROLLO DE ALGORITMOS PARA UN RELEVADOR ADAPTIVO DE SOBRECORRIENTE

TESIS

QUE PARA OBTENER EL GRADO DE
DOCTOR EN INGENIERIA ELECTRICA

PRESENTA

ARTURO CONDE ENRIQUEZ

SAN NICOLAS DE LOS GARZA, N. L. SEPTIEMBRE 2002

989301

TD
Z5853
.M2
FIME
2002
.C66

FONDO
TESIS

UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE NUEV

FACULTAD DE INGENIERÍA MECÁNICA Y ELÉCT

SUBDIRECCIÓN DE POSTGRADO

FUNDAMENTACIÓN TEÓRICA Y DESARROLLO DE A PARA UN RELEVADOR ADAPTIVO DE SOBRECOI

TESIS

QUE PARA OBTENER EL GRADO DE
DOCTOR EN INGENIERÍA ELÉCTRICA

PRESENTA

ARTURO CONDE ENRÍQUEZ

SAN NICOLÁS DE LOS GARZA, N. L. SEP

UNIVERSIDAD AUTONOMA DE NUEVO LEON
FACULTAD DE INGENIERIA MECANICA Y ELECTRICA
SUBDIRECCIÓN DE POSTGRADO

Los miembros del comité de tesis recomendamos que la tesis FUNDAMENTACIÓN TEÓRICA Y DESARROLLO DE ALGORITMOS PARA UN RELEVADOR ADAPTIVO DE SOBRECORRIENTE realizada por el M.C. Arturo Conde Enríquez sea aceptada para su defensa como opción al grado de Doctor en Ingeniería Eléctrica.

El Comité de Tesis

Asesor
Dr. Héctor Jorge Altuve Ferrer

Secretario
Dr. Florencio Aboytes García

Vocal
Dr. Ernesto Vázquez Martínez

Vocal
Dr. José Antonio de la O Serna

Vocal
Dr. David Sebastián Baltazar

Vo. Bo.
Dr. Guadalupe Alan Castillo Rodríguez
Subdirector de postgrado

San Nicolás de los Garza, N.L., Septiembre del 2002

A mi hija Roxana

El cariño y amor de todo

mi ser son tuyos

A mi esposa Hermelinda

Tu cariño es mi razón

A mi hijo kevin

Esperando tu presencia

A mis padres concepción y carlos

Juntos son mi fuente de fuerza y respeto

A mis hermanos carlos, rebeca y javier

Mis mejores amigos

AGRADECIMIENTOS

Al Dr. Héctor Jorge Altuve Ferrer, gracias por su asesoría y excelente calidad en su trato conmigo. Fue un placer haber trabajado con usted.

Al Dr. Ernesto Vázquez Martínez, gracias por su incondicional amistad. La gran ayuda y motivación recibida por usted es de mi más alto aprecio.

Al Dr. Oscar Leonel Chacón Mondragón, gracias por su amistad y orientación. Es bueno tenerlo cerca.

Al Dr. Florencio Aboytes García, Dr. José A. De la O Serna, Dr. David Sebastián Baltazar, por sus valiosos comentarios y aportaciones.

Al Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología (CONACyT), por el préstamo otorgado para el financiamiento de mis estudios.

RESUMEN

FUNDAMENTACIÓN TEÓRICA Y DESARROLLO DE ALGORITMOS PARA UN RELEVADOR ADAPTIVO DE SOBRECORRIENTE

Publicación No._____
Arturo Conde Enríquez, Doctor en Ingeniería Eléctrica
Universidad Autónoma de Nuevo León, 2002

Profesor Asesor: Dr. Héctor Jorge Altuve Ferrer

Las condiciones de operación de los sistemas eléctricos de potencia exigen esquemas de protección que cumplan adecuadamente con los requerimientos de sensibilidad, confiabilidad, velocidad de operación, y selectividad. El carácter variable del régimen de operación hace difícil cumplir con todos esos aspectos en las protecciones convencionales, cuyos parámetros de ajuste son fijos. Esto ha dado gran impulso al desarrollo de protecciones adaptivas que tienen la capacidad de modificar sus parámetros de ajuste o sus características de operación en respuesta a cambios en el sistema de potencia.

La introducción de criterios adaptivos en protecciones de sobrecorriente puede disminuir de manera considerable la falta de sensibilidad y velocidad de operación de la protección en redes de subtransmisión y distribución. La degradación de estos índices de calidad del relevador de sobrecorriente es atribuida a la dificultad de discriminar entre corrientes de falla y altos niveles de corriente de carga, y a la necesidad de coordinar dispositivos con características de operación muy diversas, tales como relevadores de sobrecorriente, fusibles y restauradores.

En este trabajo de tesis se propone la estructura funcional de un relevador adaptivo de sobrecorriente. Se obtiene la representación matemática del relevador adaptivo. Se establecen las consideraciones funcionales necesarias para generar el valor adaptivo de la corriente de arranque y la adaptabilidad del tiempo de operación del relevador. También se presentan los criterios necesarios de diseño y aplicación para obtener un relevador de sobrecorriente adaptivo que no requiera de ningún ajuste por parte del usuario, la adaptabilidad de la corriente de arranque y el tiempo de operación se obtienen de forma automática.

Se propone introducir dos criterios adaptivos en el relevador de sobrecorriente como solución a problemas de sensibilidad y tiempos elevados de operación. Los criterios adaptivos considerados son: variación adaptiva de la corriente de arranque y variación adaptiva del tiempo de operación del relevador.

Variación adaptiva de la corriente de arranque. Una relevador de sobrecorriente con corriente de arranque ajustable a la magnitud de la corriente de carga, tiene mayor sensibilidad y tiempos de operación más reducidos. Para el elemento de tiempo inverso del relevador de sobrecorriente se propone convertir en variable la corriente de arranque en función de la corriente de carga, incrementando la sensibilidad del relevador durante regímenes de carga mínima. Para el elemento instantáneo del relevador de sobrecorriente se propone variar la corriente de arranque de acuerdo con la variación del nivel de generación, conservando así un alcance constante con independencia del nivel de cortocircuito en la red.

Variación adaptiva del tiempo de operación. La adaptación del tiempo de operación requiere consideraciones especiales debido a la gran diversidad de dispositivos de protección con los que tiene que coordinar el relevador adaptivo en redes de distribución. La adaptación pretende garantizar un intervalo de coordinación constante entre el relevador adaptivo y el dispositivo de protección respaldado para cualquier magnitud de corriente de falla, ya sea constante o variable.

Se desarrolla la versión virtual de un relevador adaptivo de sobrecorriente en una computadora personal equipada con una tarjeta de adquisición de datos. Esta versión del relevador es de utilidad en el proceso de diseño, pues permite hacer pruebas de laboratorio antes de contar con un prototipo físico del relevador. El relevador virtual puede operar con señales de tiempo real y emitir señales de disparo a interruptores; puede también adquirir señales grabadas en un archivo de datos, o generar internamente sus propias señales de prueba. La combinación de estas alternativas da gran flexibilidad para la prueba de algoritmos de protección.

ÍNDICE

Agradecimientos.....iv
Resumen.....v
Índice de figuras.....xii
Índice de tablas.....xviii

Capítulo I. INTRODUCCIÓN

1.1 Protección adaptiva de sobrecorriente 1
1.2 Antecedentes 2
1.3 Objetivos del trabajo 5
1.4 Estructura de la tesis 7

Capítulo II. PROTECCIÓN DE SOBRECORRIENTE

2.1 Introducción 9
2.2 Principios de operación de la protección de sobrecorriente 10
2.3 Coordinación de dispositivos de sobrecorriente 13
2.3.1 Coordinación relevador - relevador 14
2.3.2 Coordinación relevador - fusible 15
2.3.3 Coordinación relevador - restaurador 18
2.3.4 Coordinación relevador - seccionalizador 20
2.4 Conclusiones 22

Capítulo III. REPRESENTACIÓN MATEMÁTICA DE RELEVADORES DE SOBRECORRIENTE

3.1 Introducción 24
3.2 Diagrama funcional de un relevador digital de sobrecorriente 25
3.3 Elemento instantáneo 25
3.4 Elemento de tiempo inverso 26
3.4.1 Relevador analógico de sobrecorriente de tiempo inverso generalizado 27
3.4.2 Relevador digital de sobrecorriente de tiempo inverso generalizado 35
3.4.3 Función integrador 37

3.5 Limitaciones de la protección convencional de sobrecorriente 38
3.6 Criterios adaptivos para el elemento de tiempo inverso 41
3.7 Conclusiones 42

Capítulo IV. ADAPTACIÓN DE LA CORRIENTE DE ARRANQUE

4.1 Introducción 43
4.2 Principio básico de adaptación de la corriente de arranque 44
4.3 Valor eficaz fundamental de la corriente de fase 46
4.3.1 Detección de fallas 47
4.3.2 Diferencia periódica de corriente 47
4.3.3 Detector transitorio 49
4.3.4 Funciones de la lógica de control 55
4.3.5 Evaluación 57
4.4 Concepto de Demanda 61
4.4.1 Funciones de la lógica de control 62
4.4.2 Evaluación 64
4.5 Comparación entre los dos valores de corriente utilizados en la lógica adaptiva 72
4.6 Característica adaptiva del relevador de sobrecorriente 73
4.7 Relevador adaptivo instantáneo 76
4.8 Conclusiones 79

Capítulo V. ADAPTACIÓN DEL TIEMPO DE OPERACIÓN

5.1 Introducción 81
5.2 Adaptación de la curva de tiempo 82
5.3 Resultados de adaptación del tiempo de operación 86
5.3.1 Corriente de falla constante 87
5.3.2 Corriente de falla variable 88
5.4 Ajuste de curvas 89
5.4.1 Ecuaciones de las características tiempo-corriente 92
5.4.2 Ecuaciones de los relevadores digitales de sobrecorriente 94
5.4.3 Programa de ajuste de curvas 95
5.4.4 Ajuste de curvas de relevadores 99

5.4.5 Ajuste de curvas de fusibles 105
5.4.6 Ajuste de curvas de restauradores 108
5.4.7 Ajuste de curvas con la función $H(I)$ 110
5.4.8 Comparación de ajustes de curvas utilizando las funciones $H(I)$ y $T(I)$ 115
5.5 Resultados de coordinación 116
5.6 Conclusiones 118

Capítulo VI. ESTRUCTURA FUNCIONAL Y CARACTERÍSTICAS DEL RELEVADOR ADAPTIVO DE SOBRECORRIENTE

6.1 Introducción 121
6.2 Estructura funcional de un relevador de sobrecorriente adaptivo 122
6.3 Aplicación del relevador adaptivo de sobrecorriente 124
6.3.1 Primer alternativa de aplicación 125
6.3.2 Segunda alternativa de aplicación 126
6.4 Criterio de coordinación 127
6.4.1 Coordinación relevador convencional – relevador adaptivo – relevador convencional 128
6.4.2 Coordinación relevador convencional – relevador adaptivo - fusible 132
6.4.3 Coordinación relevador convencional – relevador adaptivo - restaurador 132
6.5 Tipos de relevadores de sobrecorriente de tiempo inverso 134
6.5.1 Relevador convencional de sobrecorriente 135
6.5.2 Relevador de sobrecorriente de secuencia negativa 136
6.5.3 Relevador de sobrecorriente adaptivo 138
6.6 Influencia de la impedancia de generación 139
6.7 Estudio comparativo de relevadores de sobrecorriente 140
6.7.1 Análisis de sensibilidad 141
6.7.2 Análisis de selectividad 145
6.7.3 Análisis de tiempo de operación 146
6.7.4 Análisis de seguridad 148
6.7.5 Análisis de dependabilidad 149
6.7.6 Análisis de simplicidad 149
6.8 Consideraciones sobre la ubicación de la protección adaptiva de sobrecorriente en una red radial 150
6.9 Conclusiones 151

Capítulo VII. VERSIÓN VIRTUAL Y PRUEBAS DE LABORATORIO DE UN RELEVADOR ADAPTIVO DE SOBRECORRIENTE

7.1	Introducción	154
7.2	Estructura de aplicación del relevador virtual	155
7.3	Programación del relevador	158
7.4	Desarrollo del relevador virtual	159
7.4.1	Panel frontal del relevador virtual	161
7.5	Pruebas de laboratorio	166
7.6	Adquisición de señales en tiempo real (tiempo de operación)	167
7.6.1	Corrientes de falla constante (verificación del tiempo de operación)	168
7.6.2	Secuencias de operación (verificación de sensibilidad)	177
7.7	Archivo de señales	180
7.8	Generación interna de señales	184
7.9	Conclusiones	188

Capítulo VIII. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

8.1	Introducción	189
8.2	Conclusiones	190
8.3	Recomendaciones para trabajos futuros	192
8.4	Aportaciones	192

Referencias 194

Apéndice A. Estudio comparativo entre los detectores de falla de incremento de corriente y el detector transitorio 199

Apéndice B. Algoritmos de regresión no lineal 226

Apéndice C. Consideración del intervalo de coordinación en el ajuste de curvas 231

ÍNDICE DE FIGURAS

No.	Descripción	Pág
2.1	Operación de la protección de sobrecorriente para fallas cercanas al final de la línea protegida.	10
2.2	Características de operación de dispositivos de sobrecorriente.	12
2.3	Ejemplo de coordinación entre relevadores de sobrecorriente de tiempo inverso.	16
2.4	Coordinación Relevador-Fusible. a) diagrama unifilar, b) elemento instantáneo con recierre, c) elemento instantáneo hasta el fusible, y d) sin elemento instantáneo.	17
2.5	Ejemplo de coordinación relevador - restaurador.	19
2.6	Coordinación entre un relevador - restaurador.	20
2.7	Coordinación relevador – seccionalizador.	21
3.1	Diagrama funcional simplificado de un relevador digital de sobrecorriente.	26
3.2	Diagrama funcional del elemento instantáneo.	26
3.3	Diagrama funcional de un relevador analógico de sobrecorriente de tiempo inverso generalizado.	28
3.4	Características tiempo-corriente de un relevador con generador de funciones e integrador lineales (I>1).	29
3.5	Características de reposición tiempo-corriente de un relevador con generador de funciones e integrador lineales (I<1).	30
3.6	Zonas de operación y reposición de un relevador de sobrecorriente.	32
3.7	Representación gráfica de la ecuación generalizada.	33
3.8	Representación gráfica de la característica de reposición.	34
3.9	Representación gráfica de las características de operación y reposición.	34
3.10	Versión digital de un relevador de sobrecorriente de tiempo inverso generalizado.	35
3.11	Protección de sobrecorriente de una red radial: a) esquema de la red; b) gráficas de corriente de cortocircuito en función de I; c) gráficas $T=f(I)$.	40
4.1	Corriente de arranque adaptiva: aditiva y multiplicativa.	45
4.2	Salidas del algoritmo de incremento de corriente: a) falla sin componente aperiódica en una línea corta; b) falla con componente aperiódica en una línea corta; c) falla con componente aperiódica en una línea larga; d) falla con máxima componente aperiódica en una línea larga.	48
4.3	Cruce de la ventana de datos por la discontinuidad que la falla provoca en la señal.	51
4.4	Estimación de la señal de corriente ante una discontinuidad.	52

No.	Descripción	Pág
4.5	Salidas del detector transitorio: a) falla sin componente aperiódica en una línea corta; b) falla con componente aperiódica en una línea corta; c) falla con componente aperiódica en una línea larga; d) falla con máxima componente aperiódica en una línea larga.	54
4.6	Diagrama de bloques de la lógica de control de I_a.	55
4.7	Liberación de la falla por apertura de la línea (a), energización (b) e inserción de falla (c).	58
4.8	Liberación de la falla por apertura de otro interruptor.	59
4.9	Comportamiento de la lógica de control ante una falla evolutiva.	60
4.10	Comportamiento de la lógica de control ante corrientes de restablecimiento de carga fría.	60
4.11	Diagrama de bloques simplificado de la lógica de control de las corrientes de arranque.	62
4.12	Diagrama de bloques para el cálculo de I_a.	63
4.13	Lógica de control de I_a.	64
4.14	Valores calculados de I_a con intervalos de un minuto para una carga variable interrumpida por una falla de 30 s de duración.	66
4.15	Valores calculados de I_a con intervalos de 5 minutos para una carga variable interrumpida por una falla de 30 s de duración.	66
4.16	Valores calculados de I_a con intervalos de 1 minuto para una carga variable interrumpida por una falla de 30 seg de duración que comprende el fin del intervalo de integración.	67
4.17	Valores calculados de I_a con intervalos de 5 minutos para una carga variable interrumpida por una falla de 30 seg de duración que comprende el fin del intervalo de integración.	67
4.18	Valores calculados de I_a limitada en su magnitud cuando $I_{cc} > I_a$.	68
4.19	Corriente de demanda. Liberación de la falla por apertura de la línea (a), energización (b) e inserción de falla (c).	70
4.20	Corriente de demanda. Liberación de la falla por apertura de otro interruptor.	71
4.21	Corriente de demanda. Comportamiento de la lógica de control ante una falla evolutiva.	71
4.22	Corriente de demanda. Comportamiento de la lógica de control ante corrientes de restablecimiento de carga fría.	72
4.23	Curva $T=f(Z)$ de un relevador convencional.	75
4.24	Características $T=f(Z,I_a)$ de un relevador adaptivo.	75
4.25	Característica $T=f(Z,I_a)$ con criterio de dependencia lineal entre carga y generación para un relevador adaptivo.	76
4.26	Límites de la corriente de arranque del elemento instantáneo adaptivo.	77
4.27	Comportamiento del elemento instantáneo al variar el régimen de operación.	78

No.	Descripción	Pág
5.1	a) Sistema radial; b) características tiempo-corriente del elemento de tiempo inverso adaptivo y del relevador respaldado.	83
5.2	Características tiempo-corriente del elemento de tiempo inverso adaptivo y del relevador respaldado.	83
5.3	Adaptación de la curva de tiempo para corriente constante: a) Función $J(I)$, b) Función $H(I)$.	87
5.4	Integración de las funciones $H(I)$ y $J(I)$, para una corriente de falla I_{cc}.	88
5.5	Comportamiento de las funciones adaptivas: a) $J(I)$ y b) $H(I)$.	89
5.6	Clasificación de algoritmos de ajuste de curvas.	97
5.7	Diagrama de flujo del programa de ajuste de curvas.	98
5.8	Resultados gráficos para relevadores digitales (A, B, C, D, E, F, G, H) y electromecánicos (I, J, K, L).	102
5.8	Resultados gráficos para relevadores digitales (A, B, C, D, E, F, G, H) y electromecánicos (I, J, K, L). (Continuación).	103
5.9	Ajuste modificado del relevador descrito por (5.24) usando (5.28).	105
5.10	Resultado gráfico del programa de ajuste de curvas para fusibles comerciales.	107
5.11	Resultado gráfico del programa de ajuste de curvas para restauradores comerciales.	109
5.12	Resultado gráfico del programa de ajuste de curvas para relevadores con $H(I)$.	111
5.13	Resultado gráfico del programa de ajuste de curvas para fusibles con $H(I)$.	113
5.14	Resultado gráfico del programa de ajuste de curvas para restauradores con $H(I)$.	114
5.15	Ejemplo de coordinación entre un relevador convencional, respaldado por un relevador adaptivo.	117
6.1	Diagrama funcional simplificado de un relevador digital de sobrecorriente adaptivo.	122
6.2	Estructura funcional de un relevador adaptivo (primer alternativa).	125
6.3	Estructura funcional de un relevador adaptivo (segunda alternativa).	126
6.4	Coordinación de relevadores convencionales y adaptivo, a) comparación entre relevador convencional y adaptivo, b) criterio de coordinación.	128
6.5	Sistema radial	129
6.6	Ejemplo de coordinación con relevador convencional.	130
6.7	Ejemplo de coordinación con relevador adaptivo.	131
6.8	Ejemplo de coordinación con la característica prolongada de n-2.	131
6.9	Ejemplo de coordinación relevador convencional – relevador adaptivo - fusible	133
6.10	Ejemplo de coordinación relevador convencional – relevador adaptivo - restaurador.	134
6.11	Fallas en un sistema radial de distribución.	137
6.12	Sistema de prueba para análisis de alcance.	141

No.	Descripción	Pág
6.13	Características de operación de los tres tipos de relevadores de sobrecorriente analizados.	142
6.14	Características de operación para los tres tipos de relevadores de sobrecorriente analizados (Alimentador).	143
6.15	Características de operación para los tres tipos de relevadores de sobrecorriente analizados considerando la impedancia de generación.	144
6.16	Características de operación para los tres tipos de relevadores de sobrecorriente analizados considerando la impedancia de generación (Alimentador).	144
6.17	Ejemplo de coordinación entre relevadores (*n*) convencional, secuencia negativa y adaptivo respaldando a un relevador convencional (n-1).	147
6.18	Características de relevadores de sobrecorriente (*n*): convencional, secuencia negativa y adaptivo respaldando a un relevador convencional (*n*-1).	147
7.1	Estructura general de un relevador virtual.	156
7.2	Conexión del relevador virtual a un sistema radial.	157
7.3	Estructura digital del relevador virtual.	157
7.4	Diagrama de bloques del programa.	159
7.5	Panel frontal de adquisición en tiempo real del relevador virtual.	162
7.6	Panel frontal de lectura y simulación interna del relevador virtual.	165
7.7	Modelo físico del sistema eléctrico de potencia.	167
7.8	Curva tiempo-corriente para relevadores tipo IAC con característica muy inversa.	169
7.9	Resultado gráfico del mejor ajuste.	171
7.10	Forma de la señal de prueba.	173
7.11	Características de operación de los relevadores electromecánico y virtual obtenidas en pruebas de laboratorio (resultados de la Tabla 7.6).	175
7.12	Familia de curvas tiempo corriente del relevador digital, curva moderadamente inversa U1.	176
7.13	Programación de ajustes del relevador digital.	176
7.14	Características de operación de los relevadores digital y virtual obtenidas en pruebas de laboratorio (resultados de la Tabla 7.7).	177
7.15	Modelo físico del sistema eléctrico de potencia.	178
7.16	Prueba con adquisición de la señal en tiempo real.	180
7.17	Porcentaje de sensibilidad entre los tres tipos de relevadores, a)elemento de tiempo inverso, b)elemento instantáneo.	180
7.18	Panel de control de archivo de señal.	181
7.19	Secuencia de apertura de la línea, energización e inserción de falla (corriente de demanda).	182
7.20	Operación de protección respaldada.	183
7.21	Falla evolutiva. Operación de la propia protección.	183

No.	Descripción	Pág
7.22	Falla evolutiva. Operación de protección respaldada.	183
7.23	Corriente de carga fría.	184
7.24	Panel de control para la generación de corriente de carga y falla.	185
7.25	Prueba para un caso de generación interna de la señal.	185
7.26	Característica tiempo-corriente del relevador adaptivo.	186
7.27	Registro del integrador del relevador virtual ante la secuencia de operación de un restaurador.	187
7.28	Módulo de prueba Coordinación en zona de reposición Relevador-Restaurador.	187
A.1	Estructura funcional del relevador de sobrecorriente de inducción (a), acción de flujos magnéticos sobre el disco (b), diagrama vectorial (c).	201
A.2	Grados de inversión de características de operación.	203
A.3	Familia de curvas de relevadores de sobrecorriente de tiempo inverso.	204
A.4	Zona de operación de un relevador instantáneo de sobrecorriente.	205
A.5	Estructura funcional del relevador de sobrecorriente instantáneo (a), corriente de arranque y reposición (b).	206
A.6	Características electromagnéticas y mecánicas del relevador.	207
A.7	Partes principales de un fusible de expulsión.	209
A.8	Tipos de fusibles: a) abierto, b) cerrado y c) de elemento descubierto.	210
A.9	Características de mínimo tiempo de fundición y máximo tiempo de liberación de un fusible.	211
A.10	Fusible tipo expulsión rápido (K) y lento (T).	211
A.11	Operación de un fusible limitador.	213
A.12	Conexión fusible tipo limitador y fusible tipo expulsión.	213
A.13	Curvas de tiempo para restauradores hidráulicos.	215
A.14	Ejemplo de secuencia de operación de un restaurador.	215
A.15	Esquema de un restaurador con control hidráulico.	216
A.16	Diagrama de operación de un restaurador con control electrónico.	217
A.17	Esquema de un seccionalizador.	219
A.18	Secuencia de operación de un seccionalizador: a) Partes principales, b) La fuerza magnética desplaza el embolo hacia abajo, c) El movimiento del embolo permite la carga de aceite en la cámara desplazando el pistón, d) El disparo es realizado después de 3 cargas sucesivas de aceite bajo la posición de disparo.	220
B.1	Comparación de detectores de falla para I_{cc}=10 p.u.: a) detector transitorio; b) incremento de corriente.	223
B.2	Comparación de detectores de falla para I_{cc}=5 p.u.: a) detector transitorio; b) incremento de corriente.	223

B.3 Comparación de detectores de falla para I_{cc}=2.5 p.u.: a) detector transitorio; b) incremento de corriente. 223
B.4 Comparación de detectores de falla para I_{cc}=1.1 p.u.: a) detector transitorio; b) incremento de corriente. 224

D.1 Ajuste para relevadores digitales y electromecánicos $T(I_k)$. 232
D.2 Ajuste para relevadores digitales y electromecánicos $H(I_k)$. 233
D.3 Ajuste para fusibles 1, 2, a) función $T(I_k)$, b) función $H(I_k)$. 235
D.4 Ajuste para restauradores 1 y 3, a) función $T(I_k)$, b) función $H(I_k)$. 237

ÍNDICE DE TABLAS

No.	Descripción	Página
3.1	Casos particulares de la ecuación generalizada.	29
5.1	Resultados del ajuste con ecuaciones exponenciales.	103
5.2	Resultados del ajuste con ecuaciones polinomiales.	104
5.2	(Continuación)	104
5.3	Resultados del ajuste de fusibles con ecuaciones exponenciales.	107
5.4	Resultados del ajuste de fusibles con ecuaciones polinomiales.	108
5.4	(Continuación)	108
5.5	Resultados del ajuste de restauradores con ecuaciones exponenciales.	109
5.6	Resultados del ajuste de restauradores con ecuaciones polinomiales.	110
5.6	(Continuación)	110
5.7	Resultados del ajuste de relevadores con ecuaciones exponenciales con $H(I)$.	112
5.8	Resultados del ajuste de relevadores con ecuaciones polinomiales con $H(I)$.	112
5.8	(Continuación)	112
5.9	Resultados del ajuste de fusibles con ecuaciones exponenciales con $H(I)$.	113
5.10	Resultados del ajuste de fusibles con ecuaciones polinomiales con $H(I)$.	113
5.10	(Continuación)	113
5.11	Resultados del ajuste de restauradores con ecuaciones exponenciales con $H(I)$.	114
5.12	Resultados del ajuste de restauradores con ecuaciones polinomiales con $H(I)$.	114
5.12	(Continuación)	114
6.1	Fallas en un sistema radial de distribución.	137
7.1	Valores introducidos al programa de ajuste, curva palanca 5, Fig. 7.8.	169
7.2	Comparación de tiempos de operación para el relevador electromecánico.	170
7.3	Valores corregidos introducidos al programa de ajuste.	171
7.4	Validación de expresión analítica con redondeo en los coeficientes.	172
7.5	Tiempos de operación medidos del relevador electromecánico, relevador virtual y expresión analítica de ajuste.	174
7.6	Tiempos de operación promedio e intervalo de coordinación.	174
7.7	Tiempos de operación promedio e intervalo de coordinación.	177
7.8	Ajuste del relevador virtual, ante I_{cc} menores a la I_a del dispositivo respaldado.	186