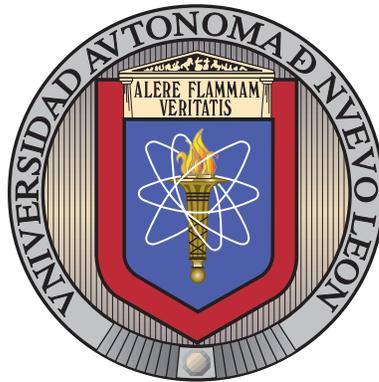


UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE NUEVO LEÓN

FACULTAD DE INGENIERÍA MECÁNICA Y ELÉCTRICA

DIVISIÓN DE ESTUDIOS DE POSGRADO



COORDINACIÓN DE RELEVADORES DE
SOBRECORRIENTE MEDIANTE ALGORITMOS
DE OPTIMIZACIÓN, UTILIZANDO CURVAS DE
TIEMPO NO CONVENCIONALES

POR

ING. CARLOS ALBERTO CASTILLO SALAZAR

EN OPCIÓN AL GRADO DE

MAESTRÍA EN CIENCIAS

DE LA INGENIERÍA ELÉCTRICA CON ORIENTACIÓN EN SISTEMAS ELÉCTRICOS
DE POTENCIA

SAN NICOLÁS DE LOS GARZA, NUEVO LEÓN

JULIO 2012

UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE NUEVO LEÓN

FACULTAD DE INGENIERÍA MECÁNICA Y ELÉCTRICA

DIVISIÓN DE ESTUDIOS DE POSGRADO



COORDINACIÓN DE RELEVADORES DE
SOBRECORRIENTE MEDIANTE ALGORITMOS DE
OPTIMIZACIÓN, UTILIZANDO CURVAS DE TIEMPO
NO CONVENCIONALES

POR

ING. CARLOS ALBERTO CASTILLO SALAZAR

EN OPCIÓN AL GRADO DE

MAESTRÍA EN CIENCIAS

DE LA INGENIERÍA ELÉCTRICA CON ORIENTACIÓN EN SISTEMAS ELÉCTRICOS
DE POTENCIA

SAN NICOLÁS DE LOS GARZA, NUEVO LEÓN

JULIO 2012

Universidad Autónoma de Nuevo León
Facultad de Ingeniería Mecánica y Eléctrica
División de Estudios de Posgrado

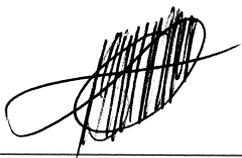
Los miembros del Comité de Tesis recomendamos que la Tesis «Coordinación de relevadores de sobrecorriente mediante algoritmos de optimización, utilizando curvas de tiempo no convencionales», realizada por el alumno Ing. Carlos Alberto Castillo Salazar, con numero de matrícula 1249685, sea aceptada para su defensa como opción al grado de Maestría en Ciencias de la Ingeniería Eléctrica con orientación en Sistemas Eléctricos de Potencia.

El Comité de Tesis



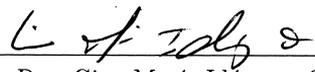
Dr. Arturo Conde Enríquez

Asesor



Dr. Óscar Leonel Chacón Mondragón

Revisor



Dra. Gina María Idárraga Ospina

Revisora

Vo. Bo.



Dr. Moisés Hinojosa Rivera

División de Estudios de Posgrado

*A Cristo, porque su amor es mejor que la vida,
a María, porque me guarda como verdadera madre,
a mi familia, porque confía plenamente en mi y me alienta,
y a mis amigos, porque mi vida no sería tan feliz sin ellos...*

ÍNDICE GENERAL

Índice de figuras	vii
Índice de tablas	x
Agradecimientos	xiii
Resumen	xv
1. Introducción	1
1.1. Hipótesis	4
1.2. Objetivo de la tesis	4
2. Conceptos generales	5
2.1. Protección de sobrecorriente	5
2.1.1. Principio de operación	6
2.1.2. Relevador direccional	8
2.1.3. Coordinación de protecciones	9
2.2. Optimización y algoritmos genéticos	12
2.2.1. Optimización	12

2.2.2. Algoritmos genéticos	15
2.2.3. Selección	18
2.2.4. Reproducción	23
2.2.5. Mutación	24
3. Coordinación mediante algoritmos genéticos	26
3.1. Población inicial	27
3.2. Función objetivo	29
3.3. Selección	32
3.3.1. Selección por ruleta	32
3.3.2. Selección por muestreo	33
3.4. Nueva Generación	34
3.4.1. Reproducción	34
3.4.2. Mutación	35
3.4.3. Padres Elite	36
3.4.4. Diagrama de flujo	36
4. Evaluación de la implementación	38
4.1. Consideraciones	39
4.2. Simulaciones iniciales	43
4.3. Resultados	46
4.3.1. Caso 1	46
4.3.2. Caso 2	48

4.3.3. Caso 3	49
4.3.4. Caso 4	51
4.3.5. Caso 5	55
4.3.6. Caso 6	57
4.4. Comparación entre los seis casos	58
5. Conclusiones y trabajo futuro	64
5.1. Conclusiones	64
5.2. Trabajos futuros	67
A. Coordinación sistema radial	69
B. Coordinación sistema anillado	72
Índice alfabético	79

ÍNDICE DE FIGURAS

2.1. Curvas convencionales del IEEE y efecto multiplicativo del dial [3].	8
2.2. Ángulo de fase de un relevador direccional de tipo cilindro.	9
2.3. Sistema radial con alimentación bilateral.	11
2.4. Categorías de la optimización.	13
2.5. Población inicial de cromosomas, generada aleatoriamente.	18
2.6. Tamaño de las zonas de cada cromosoma en el área de selección.	21
2.7. Probabilidad de que cada cromosoma sea seleccionado.	21
2.8. Selección por muestreo, realizada basándose en un rango lineal.	23
2.9. Reproducción con un solo punto de cruce.	23
2.10. Reproducción cortando en puntos múltiples.	24
2.11. Ejemplo de mutación de un cromosoma.	25
3.1. Espacio cubierto por cada zona de la ruleta, proporcional al ranking.	33
3.2. Selección por muestreo.	34
3.3. Al cruzar los genes se intercambian todos los ajustes de los relevadores.	35
3.4. Diagrama de flujo del algoritmo genético programado.	37

4.1. Reducción en la pendiente de la función de costo.	42
4.2. Caso 1. Promedio de tiempos de operación de los relevadores principales para la I_{Max} y la I_c , así como el de los respaldos para esta última, evaluando tres niveles de I_a	47
4.3. Caso 2. Promedio de tiempos de operación de los relevadores principales para la I_{Max} y la I_c , así como el de los respaldos para esta última, evaluando tres niveles de I_a y comparando con el CB.	49
4.4. Casos 3.1 y 3.2. Promedio de tiempos de operación de los relevadores principales para la I_{Max} y la I_c , así como el de los respaldos para esta última, evaluando tres niveles de I_a y comparando con el CB.	50
4.5. Casos 4.1 al 4.3 comparados con el CB, evaluando los tres niveles de I_a	54
4.6. Operación de los relevadores principal y de respaldo para el caso 5.	55
4.7. Caso 5. Promedio de tiempos de operación de los relevadores principales para la I_{Max} y la I_c , así como el de los respaldos para esta última, todos comparados con el caso base; solamente se evaluó el nivel máximo de I_a	56
4.8. Caso 6. Promedio de tiempos de operación de los relevadores principales para la I_{Max} y la I_c , así como el de los respaldos para esta última, evaluados solamente para el nivel máximo de I_a y comparados con el CB.	57
4.9. Mejores resultados de todos los casos, evaluados para corrientes de coordinación máximas y mínimas, tomando en cuenta el nivel máximo de la I_a	60
4.10. Mejores resultados de los cuatro primeros casos, evaluados para corrientes de coordinación máximas y mínimas, tomando en cuenta el nivel intermedio de la I_a	62

4.11. Mejores resultados de los cuatro primeros casos, evaluados para corrientes de coordinación máximas y mínimas, tomando en cuenta el nivel mínimo de la I_a	63
A.1. Sistema radial utilizado para el ejemplo de coordinación.	69
A.2. Curvas de tiempo inverso para los relevadores 12 y 23.	71
B.1. Sección del sistema de 14 nodos del IEEE.	72

ÍNDICE DE TABLAS

2.1. Constantes de las curvas estandarizadas.	7
2.2. Resultados de la evaluación de los cromosomas.	20
3.1. Rango de selección de parámetros.	29
3.2. Probabilidad de selección de cada cromosoma por el método de la ruleta.	33
4.1. Casos evaluados en la implementación.	40
4.2. Rangos de selección iniciales de los parámetros A, B y p	44
4.3. Casos analizados en las simulaciones iniciales.	44
4.4. Casos analizados en las simulaciones finales.	46
4.5. Resultados del caso 1.	47
4.6. Resultados del caso 2.	48
4.7. Resultados del caso 3.1 y 3.2.	51
4.8. Rangos de selección de los parámetros A, B y p , casos 4.1, 4.2 y 4.3.	52
4.9. Resultados de los casos 4.1, 4.2 y 4.3.	53
4.10. Resultados del caso 5.	56

4.11. Resultados de los casos 6.1, 6.2 y 6.3.	58
4.12. Promedios de los mejores resultados de todos los casos para la I_{cMax} y la I_{cMin} , considerando el nivel máximo de I_a	59
4.13. Promedios de los mejores resultados de los cuatro primeros casos para la I_{cMax} y la I_{cMin} , considerando el nivel intermedio de I_a	61
4.14. Promedios de los mejores resultados de los cuatro primeros casos para la I_{cMax} y la I_{cMin} , considerando el nivel mínimo de I_a	63
A.1. Datos del ejemplo de coordinación de un sistema radial.	69
B.1. Datos del ejemplo de coordinación de un sistema anillado.	73

AGRADECIMIENTOS

Agradezco a Dios y a mi madre María. El Señor me ha rescatado de las profundidades y me ha enseñado que la vida no tiene sentido si no es compartida, dándome la oportunidad de llegar, tomado de su mano, hasta donde su voluntad me ha llevado, así como de experimentar el gozo perfecto y la paz infinita que solo en Él se pueden encontrar.

“Todo lo que era valioso para mí, lo consideraré sin valor a causa de Cristo. Más aún pienso que nada vale la pena en comparación con el bien supremo, que consiste en conocer a Cristo Jesús, mi Señor, por cuyo amor he renunciado a todo, y todo lo considero como basura, con tal de ganar a Cristo y de estar unido a Él...”
Filipenses 3, 7-9.

A mis padres, Luis, Laura (†) y Alma, por siempre estar, por regalarme la vida y compartir la suya conmigo. Las palabras no bastan para expresar mi gratitud y mi amor.

A mis hermanos, Luis, Claudia, Laura, Miguel, Dinorah y Esmeralda, por ser mi familia y regalarme la dicha de ser tío, por sus palabras de aliento y por confiar en mí. A mis sobrinos, por ser la luz que me inspira para siquiera acercarme a ser la persona que creen que soy y por llenar mi vida de sonrisas.

A mis padres adoptivos, los sacerdotes Arturo, Aymeric, Didier, Julio, Raúl, Víctor, Virgilio, etcétera, gracias por entregar su vida a su vocación, por su acompañamiento, oración y ejemplo.

A mis hermanos más allá de la sangre, del corazón, pues mi vida no sería tan feliz y completa sin cada uno, por su abrazo que cobija, su sonrisa que ilumina y su mano que sostiene. Su amistad verdadera es el mejor regalo que, sin merecerlo, he podido recibir.

A Fiat, por darle plenitud a todo lo anterior.

Al Doctor Conde, por ser un excelente asesor de tesis, por la orientación y los consejos, tanto académicos como personales, por todas sus enseñanzas, aclaraciones, por ser una persona íntegra y coherente, por regalarme su valioso tiempo a cada momento que lo solicité. Así como a mis revisores, la Doctora Gina y el Doctor Chacón, por su tiempo, sus enseñanzas, así como las correcciones y aclaraciones realizadas.

A los demás profesores e investigadores del programa, los Doctores Vázquez, Andrade, De la O y Escalante, por cada una de las clases impartidas y enseñanzas transmitidas. A la Doctora Elisa, por asesorarme a pesar de no ser ya su alumno, por prestarme sus libros y apuntes, por los consejos y por ser un gran ejemplo a seguir.

A mis compañeros, Aguirre, Curti, Raúl y Víctor, por cada momento que compartimos, las desveladas y las alegrías, las mal pasadas y abundancias en la comida, por tenderme la mano siempre que lo necesité y ser así, más que compañeros de trabajo. A los demás compañeros del posgrado, especialmente a Demetrio, Conejo, Daniel, Fernando, Fili y Sara, por compartirme sus conocimientos y sus vidas.

Al Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología (CONACyT), por beneficiarme con una beca de manutención para realizar mis estudios de posgrado.

A la Facultad de Ingeniería Mecánica y Eléctrica y a la Universidad Autónoma de Nuevo León, por ser mi segunda casa.

A todos y cada uno de ustedes, así como los que por error, descuido o falta de memoria no mencioné, ¡MUCHAS GRACIAS!

RESUMEN

Ing. Carlos Alberto Castillo Salazar.

Candidato para el grado de Maestro en Ciencias de la Ingeniería Eléctrica
con orientación en Sistemas Eléctricos de Potencia.

Universidad Autónoma de Nuevo León.

Facultad de Ingeniería Mecánica y Eléctrica.

Título del estudio:

COORDINACIÓN DE RELEVADORES DE SOBRECORRIENTE MEDIANTE ALGORITMOS DE OPTIMIZACIÓN, UTILIZANDO CURVAS DE TIEMPO NO CONVENCIONALES

Número de páginas: 81.

OBJETIVOS Y MÉTODO DE ESTUDIO: El principio de protección de sobrecorriente es el más sencillo entre los existentes, una de las razones por las cuales sigue siendo utilizado ampliamente a través del mundo. Por motivos económicos, difícilmente será sustituido para sistemas de subtransmisión y menores, mientras que por razones de seguridad su uso como protección de fase ha sido prácticamente nulificado para sistemas de transmisión, ya que carece de selectividad y presenta tiempos de operación prohibitivos en algunas ocasiones. La reducción en los tiempos de operación

de la protección de sobrecorriente podría también aumentar su campo de aplicación, así como mejorar su desempeño en el ya existente.

La coordinación de protecciones es un problema complejo, mientras más grande e interconectado sea el sistema abordado, lo cual es una tendencia común en las redes actuales, y más grados de libertad se consideren, la complejidad irá en aumento. El problema de coordinación es resuelto generalmente en forma heurística, dependiendo en gran medida de la experiencia del personal de protecciones. Buscando facilitar el procedimiento se ha planteado este problema como uno de optimización.

El objetivo del presente trabajo de tesis consiste en reducir los tiempos de operación de las protecciones de sobrecorriente mediante la adición de grados de libertad a la ecuación de la curva característica de tiempo inverso, dando lugar a curvas de tiempo no convencionales. De esta manera se pretende reducir el tiempo de operación de los relevadores ante condiciones de falla, así como disminuir el total de relevadores incapaces de coordinar, tanto al operar como protecciones principales como de respaldo. Asimismo se propone el cálculo de parámetros de ajuste para diferentes niveles de corriente de arranque, considerando que la mayor parte del tiempo el sistema opera en condiciones inferiores a la máxima cargabilidad.

Para satisfacer los objetivos anteriores se desarrolló una herramienta capaz de llevar a cabo la coordinación mediante la implementación de un algoritmo genético. La herramienta logra determinar los ajustes para realizar la coordinación de protecciones de sobrecorriente, incluyendo entre uno y cinco grados de libertad a la ecuación de la curva característica de tiempo inverso. Se logró demostrar mediante la evaluación de la coordinación en diversos sistemas de prueba que la adición de grados de libertad, así como la consideración de diferentes niveles de corriente de arranque, mejora la sensibilidad de los relevadores de sobrecorriente, reduciendo el tiempo de operación de las protecciones principales y de respaldo.

CAPÍTULO 1

INTRODUCCIÓN

La electricidad se ha convertido en un servicio imprescindible en la vida del ser humano, la gran mayoría de las actividades que éste realiza así como los instrumentos que utiliza requieren energía eléctrica, siendo necesario que las compañías encargadas de suministrarla se comprometan a ofrecer al usuario calidad y continuidad del servicio.

En un *Sistema Eléctrico de Potencia* (SEP) se cuenta con diversos elementos que colaboran para el cumplimiento de dichos compromisos, cada uno orientado a alguna tarea en específico; al hablar de estos dispositivos es común que vengan a la mente algunos muy evidentes, tales como generadores, líneas de transmisión y transformadores. Sin embargo, ocasionalmente el sistema está sometido a situaciones anormales, intolerables o peligrosas, ocasionadas por fallas, condiciones atmosféricas, conmutación de cargas, accidentes, errores, etcétera; en caso de que los elementos involucrados en dichos escenarios no sean aislados rápidamente, consintiendo que el SEP permanezca expuesto a los mismos, se pueden ocasionar severos daños, comprometiendo tanto la calidad como la continuidad del servicio. Es así como surge la necesidad de introducir *equipos de protección*, ineludibles en cualquier SEP.

Por definición del Instituto de Ingenieros Eléctricos y Electrónicos (IEEE, por sus siglas en inglés) un *relevador* es un “dispositivo que opera debido a la variación de las condiciones de un circuito para afectar la operación de otro(s) dispositivo(s) en el mismo u otro circuito eléctrico, ya sea abriéndolo(s), cerrándolo(s) o ambos” [5].

Una de las aplicaciones más sofisticadas de estos dispositivos es la protección del SEP, el IEEE define que un *relevador de protección* es un “relevador cuya función es detectar condiciones anormales o peligrosas en el sistema e iniciar apropiadas acciones de control” [4]. La mayor parte del tiempo estos dispositivos permanecen inactivos, sin embargo, su correcta operación al ser requeridos es indispensable para evitar el daño o mal funcionamiento del sistema [9, 11, 19].

Existen distintos métodos capaces de discriminar entre la operación normal y anormal del sistema. Con base en la comparación de una o más señales, los *principios de protección* determinan si el sistema está siendo sometido a condiciones de falla, concluyendo si el relevador debe o no operar. Los parámetros de voltaje o corriente medidos en la línea pueden ser de amplitud, fase y frecuencia para señales de corriente alterna, así como valor y signo para las de corriente directa [12]. Además de esta información se pueden requerir mediciones en más de un punto, canales de comunicación u otras características, lo que permite categorizar a los relevadores en diferentes principios, como *distancia*, *piloto*, *diferencial* y *sobrecorriente*, siendo esta última la que se abordará en el presente trabajo. Un *sistema de protecciones* está integrado por relevadores que operan bajo el mismo o diferente principio.

El diseño de un sistema de protecciones capaz de aliviar cualquier problema se desarrolla con cierto grado de infactibilidad, debido a las innumerables condiciones que se pueden presentar en el SEP. Por esta razón, al diseñar uno se deben realizar ciertas consideraciones por parte del ingeniero en protecciones, basadas en criterios económicos, estándares, mediciones, antecedentes y sobre todo en la experiencia. Es entonces natural que a lo largo de los años la coordinación de protecciones ha sido considerada como un arte dominado gracias a la experiencia [11]. El principal problema de esta consideración radica en la posibilidad de presentarse diversas soluciones para un mismo sistema diseñado por diferentes ingenieros, pudiendo ser todas buenas, aunque quizás no óptimas. Aunado a este hecho, los procedimientos para llevar a cabo la coordinación suelen ser laboriosos y tardados, lo que dificulta el trabajo, aún para los más experimentados.

El incremento constante en la complejidad de los sistemas eléctricos, la sensibilidad de los equipos conectados, así como las ya conocidas exigencias *económicas*, de *velocidad*, *selectividad*, *confiabilidad* y *simplicidad* son solo algunos de los factores que hacen cada vez más compleja e importante la coordinación de protecciones. Con estos hechos en mente, en años recientes se ha propuesto el objetivo de atacar el problema de coordinación como uno de optimización, en el que cada ajuste del relevador pueda ser considerado como un grado de libertad. Determinando los ajustes óptimos de los relevadores se busca llevar al sistema de protecciones a su mejor desempeño, respetando límites operacionales de las protecciones y estándares del SEP.

Difícilmente se podrá prescindir del ingeniero en protecciones, por lo que es probable que la coordinación de protecciones siga siendo un arte dominado por la experiencia, sin embargo, este tipo de herramientas pueden facilitar su trabajo e incrementar los índices de seguridad del sistema eléctrico, conjuntando de esta manera el arte y la ciencia de las protecciones.

La protección de sobrecorriente se comenzó a utilizar hace ya más de cien años [18], sufriendo ligeras modificaciones hasta convertirse en el principio de protección más utilizado, cuando menos en Norte América [3]. Debido a la creciente demanda diferentes compañías se evocaron a su diseño e implementación, cada una tomando consideraciones distintas, dando lugar a diferentes características de operación y dificultando cada vez más su coordinación. Con el objetivo de que las características de los relevadores de sobrecorriente implementados en el SEP fueran compatibles para lograr la coordinación de protecciones, después de aproximadamente 50 años de utilizarse a gran escala y de acuerdo a las herramientas computacionales disponibles, el IEEE implementó una ecuación para calcular su tiempo de operación. Estandarizando algunos de los parámetros que conforman dicha ecuación se dio lugar a tres tipos de curvas convencionales [3, 8], de las cuales se hablará en los capítulos posteriores.

La utilización de curvas de tiempo convencionales presenta ciertas limitaciones a la protección de sobrecorriente, ya que en algunas ocasiones se obtienen tiempos de operación muy elevados o no permisibles. Asimismo, tradicionalmente la corriente

de arranque se considera con base en el nivel máximo de corriente de carga, siendo la menor parte del tiempo cuando el sistema opera bajo estas condiciones y agregando en consecuencia restricciones al sistema. Por otra parte, la capacidad computacional con la que cuentan los relevadores en la actualidad y por consiguiente el potencial de realizar operaciones para reajustar sus curvas es mucho más grande que en la época en la que se implementaron los estándares, por lo que salir de ellos, respetando la compatibilidad y buscando lograr la coordinación puede ser una opción de gran utilidad para lidiar con estas limitaciones.

1.1 HIPÓTESIS

Partiendo de las consideraciones planteadas en la sección anterior, la hipótesis de este trabajo establece que:

- El uso de curvas de tiempo no convencionales en protecciones de sobrecorriente permitirá incrementar la sensibilidad de los relevadores ante condiciones de falla, reducir su tiempo de operación y por consiguiente mejorar la coordinación entre los mismos.

1.2 OBJETIVO DE LA TESIS

El objetivo de esta tesis se establece a continuación:

- Solucionar el problema de coordinación de protecciones de sobrecorriente mediante la implementación de algoritmos de optimización que utilicen hasta cinco grados de libertad para obtener los ajustes de curvas de tiempo no convencionales, considerando diferentes niveles de corriente de arranque.

CAPÍTULO 2

CONCEPTOS GENERALES DE LA PROTECCIÓN DE SOBRECORRIENTE Y LOS ALGORITMOS GENÉTICOS.

En el presente capítulo se describirá el principio de operación de la protección de sobrecorriente, así como el procedimiento para llevar a cabo su coordinación; acto seguido se detallará el método de optimización utilizado, los algoritmos genéticos.

2.1 PROTECCIÓN DE SOBRECORRIENTE

De todos los principios aplicables a líneas de transmisión la protección de sobrecorriente es el más económico y sencillo. De cierta manera, estas características ocasionan que al incrementarse la complejidad del sistema este principio sea más difícil de implementar, además de requerir ajustes o incluso reemplazos con mayor frecuencia al cambiar la configuración del SEP [12].

A pesar de que la tendencia muestra que los relevadores de distancia y piloto poco a poco desplazan a los de sobrecorriente, en la actualidad éstos últimos se siguen utilizando en gran medida, sobre todo en circuitos industriales, de distribución, de subtransmisión y cuando el costo de implementación de otro principio no es justificable. En líneas de transmisión principalmente se desempeñan como protecciones de respaldo y de tierra [19].

2.1.1 PRINCIPIO DE OPERACIÓN

Como su nombre lo indica, la *protección de sobrecorriente* está diseñada para operar cuando la corriente medida es superior a un ajuste definido como *corriente de arranque*, siempre y cuando el sentido de la corriente coincida con la *direccionalidad* del relevador. Es una protección de *selectividad relativa*, ya que puede operar ante condiciones anormales en la zona principal (protección primaria) o en zonas adyacentes (protección de respaldo).

Para cada relevador es calculada una *curva de tiempo inverso* en la que el tiempo de operación es, valga la redundancia, inversamente proporcional a la magnitud de corriente medida, dicho de otro modo, mientras mayor sea la magnitud de la falla, menor será el tiempo de operación y viceversa [22]. La curva se obtiene calculando el tiempo de operación para diferentes magnitudes de corriente a través de la ecuación 2.1, estandarizada por el IEEE en la norma *C37.112-1996* [3].

$$t_{op} = \left[\frac{A}{\left[\frac{I_f}{I_a} \right]^p - 1} + B \right] * dial, \quad (2.1)$$

donde:

t_{op} = Tiempo de operación.

I_f = Corriente de falla.

I_a = Corriente de arranque.

$dial$ = Palanca de tiempo.

A, B, p = Constantes características de cada curva.

En la misma norma se definen los siguientes conceptos:

Corriente de falla (I_f) Es la magnitud de corriente de entrada al relevador.

Corriente de arranque (I_a) Define el valor a partir del cual el relevador opera, por lo general entre 1.4 y 2 veces la corriente de carga (I_l).

Palanca de tiempo (*dial*) Permite escalar la curva del relevador en el eje vertical, a un tiempo y corriente deseados, conservando el mismo grado de inversión. En relevadores electromecánicos el dial representa la distancia de viaje del disco (integral de la velocidad con respecto al tiempo).

Cuando $I_f > I_a$ el tiempo de operación es positivo, lo que indica que el relevador va a operar; mientras más se acerque la magnitud de corriente de falla a la de la corriente de arranque el tiempo de operación será mayor. Por otra parte, cuando $I_f < I_a$ se obtiene un tiempo negativo, de manera que el relevador no operará ante esa magnitud de corriente de falla. Definir correctamente la corriente de arranque es primordial para que la protección sea capaz de discriminar entre condiciones de falla y condiciones normales de carga.

Tabla 2.1: Constantes de las curvas estandarizadas.

Norma	Tipo de curva	A	B	P
IEEE	Moderadamente inversa (MI)	0.0515	0.1140	0.02
	Muy inversa (VI)	19.6100	0.4910	2
	Extremadamente inversa (EI)	28.2	0.1267	2
IEC	Inversa estándar (SI)	0.14	0	0.02
	Muy inversa (VI)	13.5	0	1
	Extremadamente inversa (EI)	80	0	2
	Inversa de tiempo corto (STI)	0.05	0	0.04
	Inversa de tiempo largo (LTI)	120	0	1

Las constantes características para cada curva definidas por el IEEE son mostradas en la tabla 2.1. De cada conjunto se obtiene una de las tres *curvas convencionales*, conocidas como *Moderadamente Inversa*, *Muy Inversa* y *Extremadamente Inversa* (respectivamente MI, VI y EI, por sus siglas en inglés) [3]; además se pueden observar las curvas estándar propuestas por el IEC, las cuales serán utilizadas en menor medida para uno de los casos implementados. En la figura 2.1 se observa un ejemplo las curvas del estándar del IEEE, además de presentarse el efecto que tiene el dial como multiplicador de la curva de tiempo, modificando su posición mientras respeta su grado de inversión.

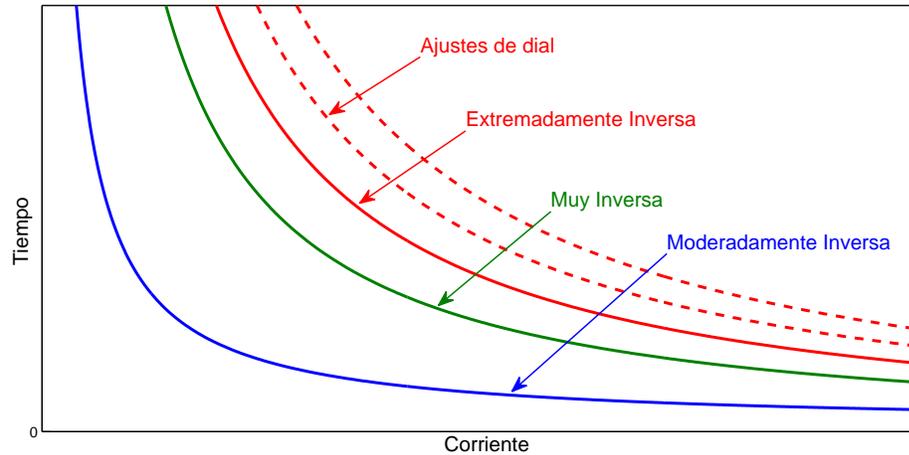


Figura 2.1: Curvas convencionales del IEEE y efecto multiplicativo del dial [3].

2.1.2 RELEVADOR DIRECCIONAL

Cuando la corriente de falla puede fluir en ambas direcciones a través del relevador, por ejemplo en sistemas anillados o con alimentación bilateral, es necesario que además de la magnitud de corriente se tome en cuenta la dirección de la potencia de corto circuito, dando lugar a un *relevador direccional* [12, 22]. El principal objetivo de conjuntar un relevador direccional con uno de sobrecorriente es limitar la operación de la protección a una dirección especificada.

En la figura 2.2 se muestra la característica de ángulo de fase de un relevador direccional de tipo cilindro, se obtiene el máximo torque cuando la corriente fluye de polaridad a no polaridad (I_{pq}), mientras que adelanta por 30° al voltaje. Teóricamente el relevador opera cuando la corriente fluye desde 60° en atraso hasta 120° en adelante con respecto al voltaje de referencia (zona de operación), es decir, opera mientras no alcance la línea de torque cero, que delimita la entrada a la zona de no operación; no obstante, habitualmente los valores mínimos de arranque del relevador direccional son ajustados al ángulo de torque máximo. A medida que la corriente I_{pq} se adelante o retrase con respecto a esta posición, mayor magnitud será requerida para alcanzar el máximo torque. [9, 11].

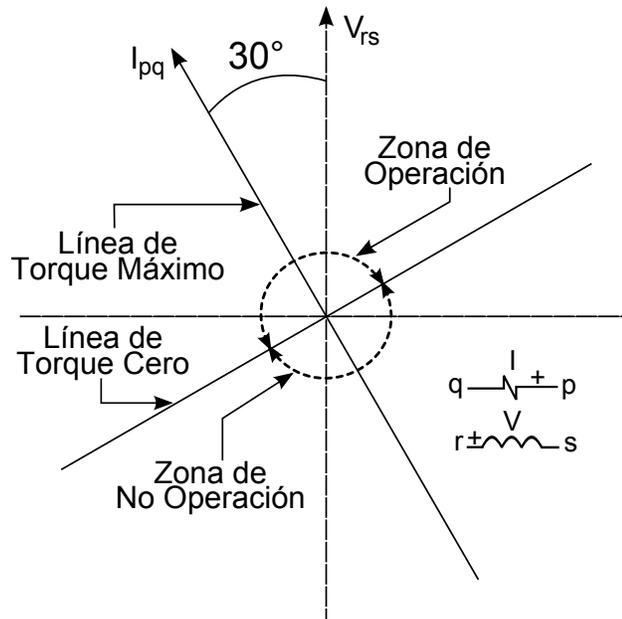


Figura 2.2: Ángulo de fase de un relevador direccional de tipo cilindro.

Un principio similar establece la posición del máximo ángulo de torque a 45° adelantando al voltaje, ambos principios son utilizados en protecciones direccionales de fase y de tierra [9, 11, 19].

2.1.3 COORDINACIÓN DE PROTECCIONES

La protección de sobrecorriente es de selectividad relativa, es decir, es capaz de operar como protección principal ante una falla en la zona protegida y, al agregar un retraso de tiempo, como respaldo para el relevador de la línea adyacente. Para determinar los ajustes con los cuales cada relevador será capaz de operar como protección principal y de respaldo es necesario realizar una *coordinación de protecciones*.

La *corriente de coordinación* (I_c) es definida como la máxima corriente que ven en conjunto los relevadores a coordinar, en sistemas radiales sin alimentadores intermedios ambos relevadores ven el mismo valor de corriente, mientras que en sistemas anillados o con alimentación bilateral la corriente detectada por el respaldo es más pequeña que la corriente de falla total (efecto *infeed*), por lo que la corriente de coordinación debe ser igual a la magnitud que ve el respaldo.

El principio de coordinación por tiempo establece que en primera instancia se debe calcular el tiempo de operación para una falla en la línea protegida (*protección principal*). Una protección adicional, llamada (*protección de respaldo*), debe ajustarse para operar en caso que la principal no opere, evitando así incrementos en los tiempos de liberación. Para cada protección principal se pueden ajustar tantos respaldos como líneas adyacentes existan. El tiempo de operación de la protección de respaldo debe ser igual al tiempo de operación de la protección principal para la corriente de coordinación más un *Intervalo de Tiempo de Coordinación* (*CTI*, por sus siglas en inglés), tal como se muestra en la ecuación 2.2.

$$t_{\text{respaldo}} = t_{\text{primario}} + CTI. \quad (2.2)$$

El valor del CTI sirve para asegurar que el respaldo operará solo cuando la protección principal falle o su operación demore demasiado; es obtenido sumando el retardo de tiempo de liberación de la falla, el tiempo de operación del interruptor, el tiempo de sobreviaje del relevador (en relevadores electromecánicos) y un factor de seguridad, normalmente se define entre 0.2 y 0.5 segundos, siendo 0.3 segundos el valor más utilizado [9].

Una vez definido el tiempo de operación del relevador de respaldo, se calculan los ajustes que éste necesita para satisfacer dicho tiempo. El dial para el relevador de respaldo se obtiene luego de despejar la ecuación 2.1, dando lugar a la ecuación 2.3.

$$dial = \frac{t_{op}}{\left[\frac{A}{\left[\frac{I_f}{I_a} \right]^p - 1} + B \right]}. \quad (2.3)$$

Se calcula manteniendo la corriente de coordinación, utilizando la corriente de arranque y los parámetros A, B y p del relevador de respaldo. Una vez calculado el dial, mediante la ecuación 2.1 se procede a determinar el tiempo de operación para la falla en la que opera como relevador principal. En caso de que existan más relevadores a coordinar se repite el mismo procedimiento.

Llevar a cabo el proceso de coordinación en sistemas radiales es relativamente sencillo, la complicación se presenta al trabajar con sistemas anillados en los que una protección actuará como respaldo para diferentes líneas y por consiguiente diferentes corrientes de coordinación. En los apéndices A y B se muestran ejemplos numéricos de coordinación.

NECESIDAD DE UN RELEVADOR DIRECCIONAL DE SOBRECORRIENTE

A continuación, partiendo del pequeño sistema con alimentación bilateral mostrado en la figura 2.3 se explica la necesidad de un relevador direccional de sobrecorriente en el proceso de coordinación.

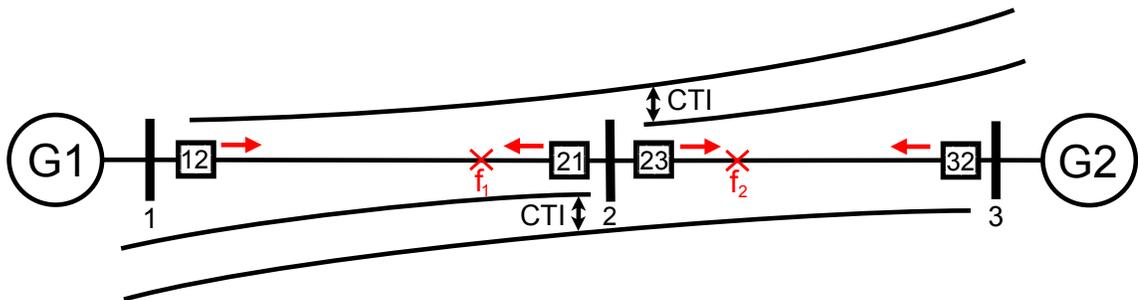


Figura 2.3: Sistema radial con alimentación bilateral.

Suponiendo que las fallas f_1 y f_2 son cercanas al nodo 2, para la falla f_1 los relevadores 12 y 21 deben operar como protección principal, mientras que los relevadores 23 y 32 deben hacer lo propio para la falla f_2 . Sin embargo, debido a que los relevadores 21 y 23 están localizados en el mismo nodo, la corriente que detectan al presentarse una falla en cualquiera de las dos líneas es prácticamente la misma, por lo que regirse solamente por su magnitud imposibilitaría la discriminación y ocasionaría la incorrecta apertura de una línea que no presenta condiciones de falla. La adición de unidades direccionales resuelve el problema. Los relevadores se ajustan para operar únicamente al detectar fallas en la dirección marcada por las flechas, por lo que la falla f_1 solo es vista por los relevadores 12 y 21 como protecciones principales y por el relevador 32 como protección de respaldo. La falla f_2 debe ser liberada por los relevadores 23 y 32, mientras que el 12 se ajusta como respaldo.

En resumen, la utilización de relevadores direccionales permite discriminar entre una falla en la línea protegida y una en la línea adyacente, a pesar de que la magnitud de corriente sea prácticamente igual.

2.2 OPTIMIZACIÓN Y ALGORITMOS GENÉTICOS

Los algoritmos genéticos (GA, por sus siglas en inglés) fueron desarrollados entre 1960 y 1970 por John Holland, así como sus estudiantes y colegas de la Universidad de Michigan [16, 20]. Su función es realizar *búsquedas heurísticas* basándose en la teoría de selección natural propuesta independientemente por Charles Darwin y Alfred Russel Wallace en 1858. Continuamente el mencionado método es utilizado para optimizar la solución de diversos problemas multiobjetivo. A continuación se definirán más detalladamente las características de un algoritmo genético, no sin antes presentar una breve introducción a la optimización.

2.2.1 OPTIMIZACIÓN

En resumen la optimización es el proceso llevado a cabo para maximizar las características deseadas de un sistema, minimizando simultáneamente las no deseadas [21]. Optimizar un sistema es encontrar los ajustes necesarios para que éste se opere de la mejor manera. Vale la pena resaltar que el término '*mejor*' involucra que existen diferentes soluciones que no generan el mismo desempeño [15].

Algunos problemas tienen una solución única, por ejemplo determinar cual es la montaña más alta del mundo o el resultado de algunas operaciones algebraicas, para estos casos '*mejor*' tiene una definición absoluta. En otras ocasiones pueden presentarse diferentes soluciones, obteniéndose con cada una el mejor resultado, por ejemplo, si se desea encontrar el valor que haga cero un polinomio, es decir su raíz, es posible que diversas soluciones arrojen la misma respuesta, siendo una tan buena como la otra. Otro tipo de problemas presentan como dificultad la posibilidad de encontrar diferentes soluciones o puntos óptimos, como determinar cual es la mejor

computadora o llevar a cabo la coordinación de protecciones en un SEP, en estos casos el mejor resultado es relativo a los criterios considerados. El propósito es encontrar la mejor solución u *óptimo global*, sin embargo es importante recalcar que debido a una mala selección de criterios, e incluso a la incapacidad del método de optimización utilizado es posible alcanzar solamente una solución subóptima u *óptima local* [15].

La *Función Objetivo* (FO) es una función que engloba las aptitudes que una solución debe tener para considerarse buena, así como las penalizaciones correspondientes para las soluciones que salgan de los límites establecidos, etcétera. Cuando se busca el valor mínimo la función objetivo es llamada *función de costo*, en el caso específico en el que el objetivo sea llegar a un valor igual a cero, la función se conoce como *función de error*. Por último, cuando la finalidad sea encontrar un valor máximo la función es nombrada *función de aptitud* [15, 21].

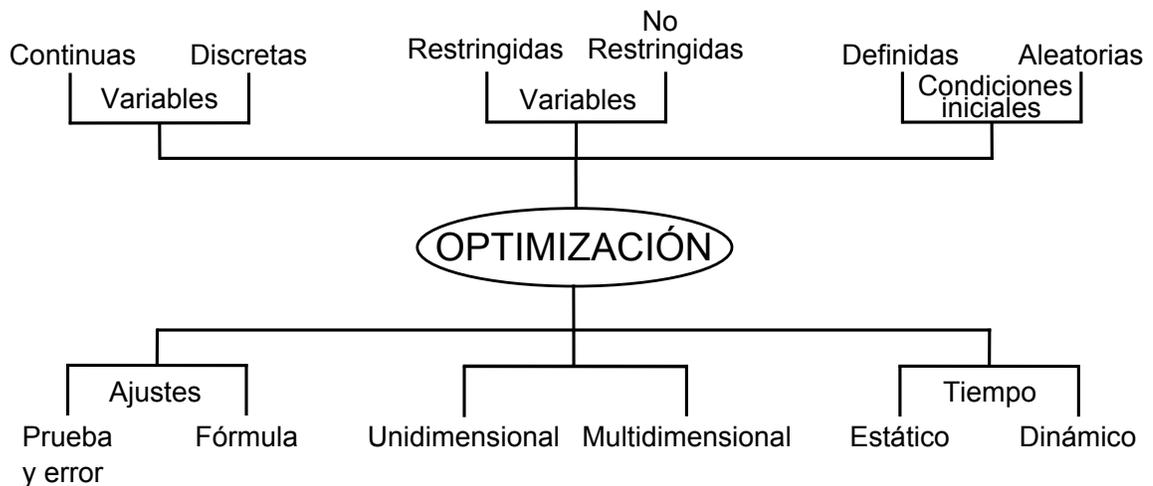


Figura 2.4: Categorías de la optimización.

Como se observa en la figura 2.4 los métodos de optimización pueden ser clasificados en diferentes categorías, descritas en los párrafos siguientes [15], comenzando por la esquina inferior izquierda y continuando en sentido contrario al de las manecillas del reloj:

1. La optimización mediante prueba y error hace referencia a métodos que proporcionan una posible solución al problema, la evalúan y determinan si es buena,

en caso de no serlo se propone una nueva solución hasta que el problema se resuelva. No se requiere un conocimiento profundo del sistema y encontrar la solución involucra cierto grado de azar. Se puede utilizar en sistemas en los que no se conoce por completo su funcionamiento. En contraparte existen métodos que utilizan una formulación matemática para optimizar el problema, para llevarla a cabo se requiere conocer el sistema analizado, así como una idea clara del resultado que se obtendrá al realizar ajustes en las variables involucradas.

2. La optimización es unidimensional cuando solamente existe una variable involucrada. Si el problema tiene más de una variable se conoce como multidimensional, mientras más variables existan el problema de optimización se hace más complejo.
3. Cuando la optimización es de tiempo estático las variables involucradas son invariantes en el tiempo, por el contrario, en la optimización de tiempo dinámico las variables son dependientes del tiempo. Por ejemplo, en un SEP la demanda requerida por los usuarios varía constantemente, entre el día y la noche, así como entre el invierno y el verano.
4. Algunos algoritmos de optimización deben comenzar la búsqueda a partir de condiciones iniciales, por lo general son rápidos, aunque presentan mayores posibilidades de atascarse en soluciones locales, sobre todo si las condiciones iniciales son deficientes. Los algoritmos que parten de condiciones iniciales aleatorias tienen la posibilidad de abarcar mayor área del espacio de solución, sin embargo, al carecer de un camino trazado por el cual comenzar la búsqueda, tardan más tiempo en llegar a una solución global.
5. A pesar de que existen métodos que trabajan mejor con variables sin restricciones, ciertos sistemas requieren que sus variables se encuentren dentro de un rango definido, el cual puede estar determinado por los límites operacionales de una máquina, por citar un ejemplo. Las restricciones de un sistema pueden ser lineales o no lineales.

6. Las variables involucradas pueden ser continuas o discretas. Mientras que las variables discretas tienen un número finito de posibles soluciones, las variables continuas pueden elegir cualquier valor dentro del rango definido.

La combinación de estas características puede hacer un problema de optimización más sencillo o difícil de resolver. Para el caso de la coordinación de protecciones eléctricas en un SEP las variables son continuas, restringidas y variantes en el tiempo, mientras que el problema de optimización es multidimensional. Los ajustes son realizados combinando una formulación matemática con la prueba y error, dependiendo del método utilizado. Por último, las condiciones iniciales utilizadas actualmente son aleatorias, sin embargo trabajos recientes empiezan a utilizar la salida de un método de optimización como entrada de otro, buscando reducir el tiempo de ejecución de los algoritmos, por ejemplo el trabajo mostrado en la referencia [7]. Uno de los métodos de optimización que se puede adaptar a las necesidades del problema de coordinación de protecciones sin mayor dificultad son los algoritmos genéticos, los cuales se describen en las siguientes secciones.

2.2.2 ALGORITMOS GENÉTICOS

Los algoritmos genéticos pertenecen a lo que hoy en día se conoce como computación evolutiva, surgieron entre mediados de los años sesenta y principios de los setenta de la mano de John Holland con el objetivo de resolver problemas de optimización, así como hacer estudios sobre la autoadaptación de moléculas en procesos biológicos [16]. Un algoritmo genético es una técnica iterativa de búsqueda y optimización basada en la selección natural que combina búsquedas dirigidas con estocásticas, produciendo un notorio balance entre la explotación y exploración del espacio de búsqueda [13].

Inicialmente se generan vectores o individuos de manera aleatoria, cada individuo, usualmente llamado *cromosoma* (C_x) es un candidato a dar solución al problema y está formado por uno o varios *genes*, los cuales se organizan individ-

ualmente o por bloques y representan el o los ajustes para una de las variables del problema. Un conjunto de cromosomas conforma una *población*, por lo general el tamaño de la población permanece constante durante toda la simulación. En cada iteración o *generación* se evalúan los cromosomas con base en una función objetivo y se determina cuáles son los más aptos para sobrevivir y dejar descendencia. Algunos cromosomas son seleccionados como padres para que, a través de *operadores genéticos*, den lugar a una nueva población. La probabilidad de ser seleccionados como padres es proporcional al resultado de su evaluación, por lo que los más aptos tienen mayores posibilidades de serlo, incluso en más de una ocasión [6, 13, 14, 20]. Los dos operadores genéticos básicos son descritos a continuación:

Reproducción Es el operador genético primario, la mayor parte de la nueva población es obtenida de esta forma. Se seleccionan aleatoriamente dos o más padres y sus atributos son mezclados eligiendo uno o varios puntos de cruce, dando lugar a nuevos cromosomas.

Mutación Es un operador utilizado en mucho menor medida, su objetivo es ayudar al algoritmo a no atascarse en una solución local. El procedimiento consiste en seleccionar un cromosoma y modificar uno o varios de sus genes aleatoriamente.

La nueva generación estará conformada en su mayoría por individuos que resultan del operador de reproducción, un pequeño porcentaje de cromosomas mutados y ocasionalmente algunos de los padres más aptos de la generación anterior, con el objetivo de asegurar que los cromosomas sean cuando menos igual de aptos en la nueva generación.

En resumen, al iniciar el algoritmo genético existe una población aleatoria y muy diversa, con lo que se busca cubrir gran parte del espacio de búsqueda; en las primeras iteraciones los operadores genéticos se utilizan para explorar la mayor parte del mismo, siendo lo más importante determinar las zonas donde se encuentran los elementos más aptos. Una vez localizados dichos elementos se exploran sus vecindades, saliendo ocasionalmente de ellas mediante un operador de mutación con el

objetivo de no atascarse en un mínimo local. Debido a que se realizan búsquedas ciegas, este método no garantiza una rápida convergencia, tampoco puede garantizar que todos los hijos obtenidos por los operadores sean mejores que sus padres [13]. Por encima de estas desventajas, se presentan ventajas considerables que justifican el uso de este método de optimización [6, 13, 14]:

Sencillez Los GA son fáciles de comprender y no requieren de un conocimiento matemático profundo.

Flexibilidad Muchos problemas no cuentan con una fórmula exacta para ser resueltos, ya que son muy complejos u obtener su solución tomaría mucho tiempo. Los algoritmos genéticos, basados en búsquedas heurísticas, proveen gran flexibilidad para ser implementados en problemas muy específicos. Aunque proporcionen un resultado que no siempre es exacto, en muchas ocasiones la cercanía es suficiente.

Adaptabilidad Se pueden adaptar para resolver cualquier tipo de función objetivo que contenga todo tipo de restricciones, además pueden ser implementados para buscar una o varias soluciones.

Robustez El uso de operadores genéticos dota de esta característica a los GA, haciéndolos muy efectivos en la aproximación a la solución global en comparación con otros métodos heurísticos, además de reducir la carga computacional. El secreto consiste en que en todo momento realiza una búsqueda en gran parte del espacio de solución, a diferencia de otras técnicas que consisten en abarcar el espacio total realizando búsquedas locales.

En las siguientes secciones se ahondará en la descripción de cada paso de un algoritmo genético.

GENERACIÓN DE LA POBLACIÓN

El primer paso de los GA consiste en generar aleatoriamente una población de cromosomas compuestos de genes, cada gen representa el ajuste de una de las variables del sistema, por lo tanto el cromosoma entero contiene una posible solución al problema. Suponiendo que se presenta un problema en el que se desea determinar cuáles unidades deben mantenerse en funcionamiento para cumplir con determinada demanda buscando minimizar el consumo de combustible, el estado de cada máquina se puede representar mediante unos y ceros. La figura 2.5 muestra los cromosomas iniciales, suponiendo que la población sea de cuatro individuos y se cuente con un total de diez máquinas.

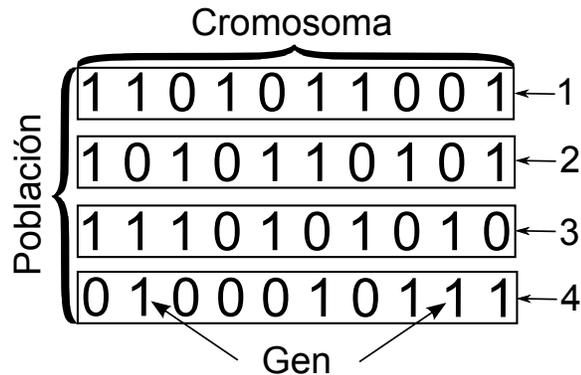


Figura 2.5: Población inicial de cromosomas, generada aleatoriamente.

Mientras más grande sea la población el algoritmo podrá abarcar mayor espacio de solución, lo cual se ve reflejado en una mayor posibilidad de encontrar una solución global. Sin embargo, disponer de más cromosomas se traduce en más operaciones, por lo que el algoritmo será más lento.

2.2.3 SELECCIÓN

La función objetivo (FO) debe ser precisa para definir cuáles cromosomas contienen la combinación de genes que suscitan una resolución óptima del problema tratado, es de suma importancia que ésta establezca concretamente los atributos

que ocasionarán que un cromosoma resulte ser mejor que otro, además de penalizar a los que arrojen resultados fuera de los rangos establecidos. Si la FO no está correctamente definida el algoritmo no podrá obtener la solución deseada. Todos los cromosomas de todas las generaciones son evaluados mediante la función objetivo, por lo que el número de operaciones puede llegar a ser de varios millones, de ahí se deriva la necesidad de que este procedimiento sea rápido. Se obtendrán resultados diferentes y algunos cromosomas serán más aptos que otros, lo que incrementará su probabilidad de ser seleccionados para prevalecer en la siguiente generación.

El *área de selección* (AS) está compuesta por zonas, cada una de ellas representa a un cromosoma, siendo su tamaño proporcional a la aptitud del mismo; los cromosomas con mayor aptitud ocuparán mayor porcentaje del área de selección. Se presentan dos opciones para determinar el tamaño de cada zona, la primera consiste en que el porcentaje del área de selección ocupado por cada cromosoma sea directamente proporcional al resultado de su evaluación, en el presente trabajo se nombrará a esta opción *Porcentaje por Evaluación* (PE).

En algunos escenarios los individuos más aptos tendrán resultados mucho mejores que los menos aptos, por lo que abarcarán la mayor parte del área de selección, los genes de las nuevas generaciones estarán muy influenciados por ellos, acabando rápidamente con la diversidad y muy probablemente llevando al algoritmo a una solución prematura o local. La manera de calcular el porcentaje por evaluación de cada cromosoma cuando se trabaje con una función de aptitud se muestra en la ecuación 2.4, en caso de que en el problema se utilice una función de costo (que busque minimizar) se deben realizar ciertos ajustes a dicha ecuación.

$$PE_i = \frac{e_i}{\sum_{j=1}^N e_j}. \quad (2.4)$$

donde:

PE_i = Porcentaje por evaluación del cromosoma i .

e = Resultado de la evaluación del cromosoma.

N = Tamaño de la población.

Ocasionalmente la población se reacomoda de acuerdo a su aptitud, es decir, colocando en el primer escalón al mejor y descendiendo hasta llegar al peor candidato. Dicho reacomodo se conoce como *ranking*. Con el objetivo de dar mayor probabilidad a los individuos más aptos sin descartar por completo a los menos aptos la segunda opción consiste en asignarle al cromosoma un valor igual al inverso de su posición en el ranking, para después calcular el porcentaje que le tocará cubrir de acuerdo a la ecuación 2.5, en el presente trabajo se nombra a esta opción *Porcentaje por Ranking* (PR).

$$PR_i = \frac{v_i}{\sum_{j=1}^N v_j}. \quad (2.5)$$

donde:

PR_i = Porcentaje por ranking del cromosoma i .

v = Valor asignado al cromosoma i .

N = Tamaño de la población.

En la tabla 2.2 se muestran los resultados de los cromosomas, suponiendo que fueron evaluados utilizando una función de costo. En la tercer columna se observa el porcentaje del área de selección correspondiente a cada cromosoma de acuerdo al resultado de su evaluación. En la cuarta se realiza el reacomodo por ranking, en la quinta se le asigna un valor correspondiente a su posición y en la última la probabilidad de ser seleccionado en función del ranking. Además, en la figura 2.6 se observa el tamaño de las zonas para cada cromosoma, utilizando ambos criterios.

Tabla 2.2: Resultados de la evaluación de los cromosomas.

C_x	Evaluación	PE	Ranking	Valor asignado	PR
1	14	8.96 %	3	1	48 %
2	10	12.55 %	4	1/2	24 %
3	2	62.78 %	2	1/3	16 %
4	8	15.69 %	1	1/4	12 %



Figura 2.6: Tamaño de las zonas de cada cromosoma en el área de selección.

Existen diferentes técnicas para llevar a cabo el proceso de selección, a continuación se describen algunas de ellas:

SELECCIÓN PROPORCIONAL O POR RULETA

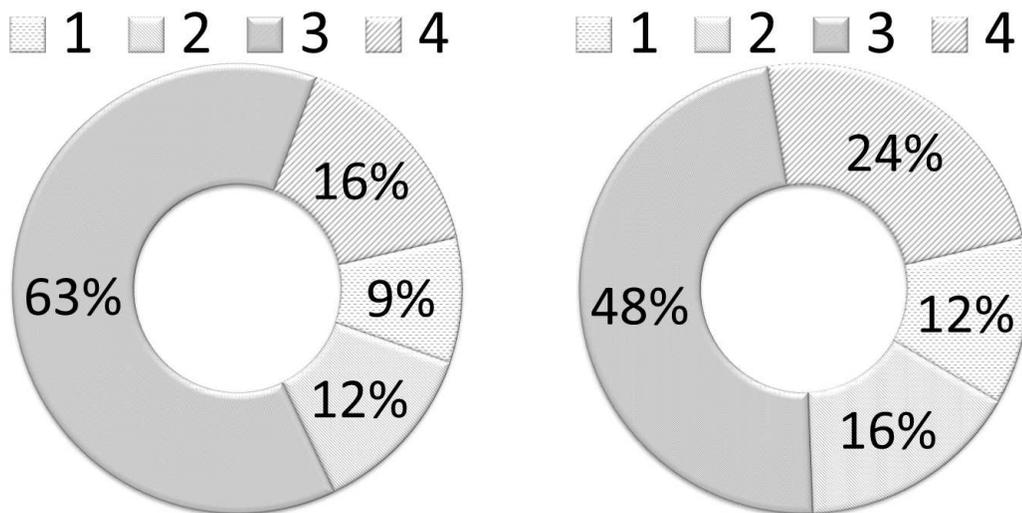


Figura 2.7: Probabilidad de que cada cromosoma sea seleccionado.

Cada sección de la ruleta representa a un cromosoma, el tamaño de la sección es proporcional al resultado de la evaluación del mismo. El porcentaje del área de selección cubierto por cada cromosoma es igual a la probabilidad que tiene de ser seleccionado y puede ser determinado tomando en cuenta su evaluación o ranking,

aplicando las ecuaciones 2.4 y 2.5. Se generan valores aleatorios dentro del área de selección simulando el giro de la ruleta, siendo seleccionado el cromosoma correspondiente a cada valor. En las figuras 2.7(a) y 2.7(b) se presentan, respectivamente, los porcentajes del área de selección ocupados por cada cromosoma tanto por evaluación como por ranking, para el mismo ejemplo.

SELECCIÓN POR RANGO LINEAL O MUESTREO DETERMINISTA

La selección por rango lineal no elige aleatoriamente a los cromosomas padres. En principio, a partir del total de individuos que se seleccionarán, se establece el intervalo de muestreo, el cual permanece constante durante la simulación a menos que se decida cambiar el total de elementos seleccionados. En cada iteración los cromosomas se ordenan linealmente, a cada uno le corresponde un área proporcional a su evaluación o ranking, siendo la segunda opción la más utilizada. Los cromosomas que estén ubicados en cada punto muestreado se seleccionan como padres para la siguiente generación.

Una de las ventajas de este método es que asegura la participación de elementos de baja aptitud, además de que las posiciones en las cuales se seleccionará un cromosoma son definidas desde el principio, a diferencia del método de la ruleta en el que en cada iteración se le debe de hacer ‘girar’ para obtener valores aleatorios, repercutiendo en el número de operaciones y por consiguiente en el tiempo de simulación.

La figura 2.8 muestra un ejemplo de esta técnica, si el porcentaje del área de selección ocupado por cada C_x está definido directamente por el resultado de la evaluación se elige el cromosoma más apto en tres ocasiones, limitando la diversidad. La opción de establecer el porcentaje basándose en el ranking permite la participación de otros individuos, no necesariamente los más aptos.



Figura 2.8: Selección por muestreo, realizada basándose en un rango lineal.

2.2.4 REPRODUCCIÓN

Es el operador básico de un algoritmo genético, su objetivo es tomar atributos de padres aptos buscando generar hijos aún más aptos. En su modo más sencillo dos cromosomas son seleccionados y separados del resto, se selecciona un punto de corte de manera aleatoria para luego intercambiar los genes de la sección cortada. La reproducción puede realizarse de diferentes maneras, como se define a continuación.

REPRODUCCIÓN CORTANDO EN UN SOLO PUNTO

Cortar en un solo punto es el modo más sencillo de reproducción. Aleatoriamente se determina un punto de corte, dividiendo así cada cromosoma en dos partes, mismas que son intercambiadas dando lugar a dos individuos de la nueva generación. Un ejemplo de este operador se muestra en la figura 2.9.

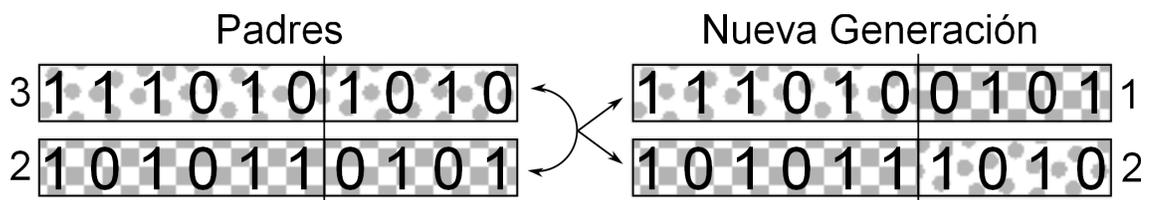


Figura 2.9: Reproducción con un solo punto de cruce.

REPRODUCCIÓN CORTANDO EN PUNTOS MÚLTIPLES

El objetivo es el mismo que el de cortar en un solo punto, combinar los genes de dos de los mejores individuos para dar lugar a la nueva generación. En esta ocasión se definen n puntos de cruce, algunos autores reportan que es más conveniente llevar a cabo esta técnica debido a que al combinar genes de diferentes secciones de los cromosomas se logra una mezcla más uniforme [6]. Sin embargo, para sistemas en los que los cromosomas tengan una gran cantidad de genes, realizar múltiples cortes repercutirá en la duración de la simulación, por lo que mantener bajo el total de cortes puede ser una mejor opción. En la figura 2.10 se observa un ejemplo de ésta técnica.

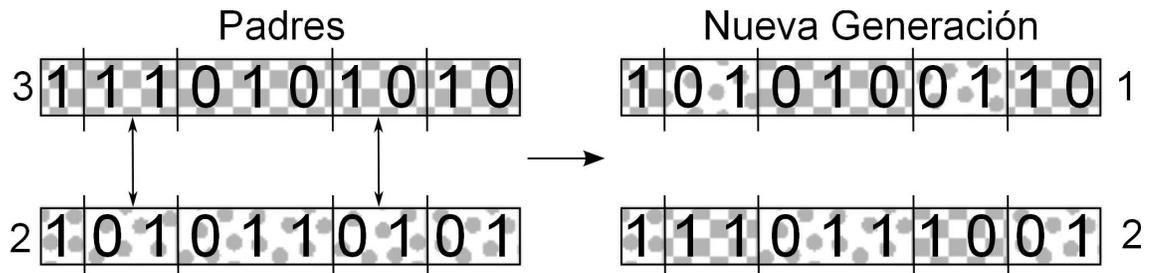


Figura 2.10: Reproducción cortando en puntos múltiples.

Existen otras técnicas para llevar a cabo el proceso de reproducción, en el presente trabajo no se describirán pero pueden ser consultadas en las referencias alusivas al tema [6, 14, 15, 20]. Las dos aquí descritas fueron probadas en la implementación, descartando el uso de la reproducción en puntos múltiples con el objetivo de reducir el tiempo de simulación.

2.2.5 MUTACIÓN

La mutación provee de diversidad a la población, ayuda a realizar búsquedas saltando entre el espacio de solución. El principal beneficio de este operador es ayudar a evitar que el algoritmo converja de manera prematura en una solución local. Consiste en cambiar el valor de uno o más genes de un cromosoma, realizando

la selección del cromosoma y gen a mutar de manera aleatoria. Los expertos señalan que las mutaciones deben realizarse en una mínima parte de la población (menor al diez por ciento) y no en todas las generaciones. En la figura 2.11 se puede observar un ejemplo de este operador.



Figura 2.11: Ejemplo de mutación de un cromosoma.

CAPÍTULO 3

COORDINACIÓN DE PROTECCIONES MEDIANTE ALGORITMOS GENÉTICOS

En este capítulo se describirá la manera de resolver el problema de coordinación de protecciones de sobrecorriente mediante la implementación de un algoritmo genético. Las técnicas, procedimientos y consideraciones descritas a continuación hacen referencia a lo implementado en el presente trabajo de tesis, realizando algunos ajustes pueden ser utilizadas para resolver otro tipo de problemas.

La ecuación utilizada para determinar el tiempo de operación del relevador de sobrecorriente ante diferentes magnitudes de falla y por consiguiente para formar la curva de tiempo inverso fue descrita en el capítulo anterior en la ecuación 2.1. Se puede observar que para determinar el tiempo de operación es necesario contar con seis parámetros que pueden ser modificados. De los seis parámetros variables, cinco son ajustes del relevador (A , B , p , I_a y $dial$) y el último es la corriente de falla definida como entrada (I_f).

Cada ajuste del relevador es considerado como un posible Grado de Libertad (GDL). Generalmente los métodos de optimización se utilizan para precisar el ajuste del dial, es decir, se considera un solo GDL mientras que los demás ajustes permanecen constantes, un ejemplo es el trabajo de la referencia [17]. Otros autores proponen dos grados de libertad, permitiéndole tomar a la corriente de arranque valores que comúnmente se ubican entre 1.2 y 2 veces la corriente de carga (I_l) [7].

Como se describió en los capítulos anteriores, los parámetros A , B y p fueron estandarizados por el IEEE, cada conjunto de constantes da lugar a una de las denominadas curvas convencionales; dichas constantes se definieron debido a diversas razones, una de ellas fue la limitada capacidad computacional de los relevadores, a los que les era imposible almacenar la información necesaria para contar con una mayor gama de curvas o en su defecto recalculas las mismas. Asimismo, coordinar protecciones que presenten curvas con similar grado de inversión ayuda a evitar el posible cruce entre las mismas.

Para algunos casos, limitar el grado de inversión de las curvas características ocasiona que la coordinación de protecciones no sea posible o arroje tiempos muy elevados tanto en protecciones principales como de respaldo. Además, los relevadores utilizados actualmente tienen capacidad de sobra para redefinir su curva característica en caso de ser necesario.

Partiendo de este punto se introduce la posibilidad de permitir que los parámetros A , B y p tomen valores diferentes a los establecidos por el IEEE, obteniendo de esta manera *curvas de tiempo no convencionales*. Por lo tanto, aunados al *dial* y la I_a arrojan un total de cinco grados de libertad. La hipótesis señala que utilizar curvas de tiempo no convencionales permitiría incrementar la sensibilidad de los relevadores ante condiciones de falla, reducir su tiempo de operación y por consiguiente mejorar la coordinación entre los mismos.

3.1 POBLACIÓN INICIAL

Cada cromosoma debe contener los ajustes para el Total de Relevadores (TR) presentes en el sistema, de tal forma que si se cuenta con tres relevadores y se consideran cinco grados de libertad la longitud del cromosoma será de $[15 \times 1]$. El tamaño de la población es igual al Total de Cromosomas (TC) que se utilizarán, suponiendo que se tienen 10 individuos la matriz de la población ($P(C_x)$) será de $[15 \times 10]$, lo que da un total de 150 genes.

En la matriz mostrada en 3.1 se presenta la manera de ordenar la población inicial; cada columna representa un cromosoma por lo que el TC determina el total de las mismas, al mismo tiempo cada fila constituye un gen o en otras palabras un ajuste de un relevador.

$$P(C_x) = \left(\begin{array}{ccccc}
 dial_{1-1} & dial_{1-2} & dial_{1-3} & \dots & dial_{1-TC} \\
 dial_{2-1} & dial_{2-2} & dial_{2-3} & \dots & dial_{2-TC} \\
 dial_{3-1} & dial_{3-2} & dial_{3-3} & \dots & dial_{3-TC} \\
 \vdots & \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\
 dial_{TR-1} & dial_{TR-2} & dial_{TR-3} & \dots & dial_{TR-TC} \\
 \hline
 Ia_{1-1} & Ia_{1-2} & Ia_{1-3} & \dots & Ia_{1-TC} \\
 \vdots & \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\
 Ia_{TR-1} & Ia_{TR-2} & Ia_{TR-3} & \dots & Ia_{TR-TC} \\
 \hline
 A_{1-1} & A_{1-2} & A_{1-3} & \dots & A_{1-TC} \\
 \vdots & \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\
 A_{TR-1} & A_{TR-2} & A_{TR-3} & \dots & A_{TR-TC} \\
 \hline
 B_{1-1} & B_{1-2} & B_{1-3} & \dots & B_{1-TC} \\
 \vdots & \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\
 B_{TR-1} & B_{TR-2} & B_{TR-3} & \dots & B_{TR-TC} \\
 \hline
 p_{1-1} & p_{1-2} & p_{1-3} & \dots & p_{1-TC} \\
 \vdots & \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\
 p_{TR-1} & p_{TR-2} & p_{TR-3} & \dots & p_{TR-TC}
 \end{array} \right) \quad (3.1)$$

Los rangos máximos entre los cuales una variable puede ser seleccionada en el presente trabajo se muestran en la tabla 3.1, los límites mínimo y máximo de los ajustes A , B y p están definidos entre el menor y el mayor valor de las constantes de la tabla 2.1, mientras más abiertos sean las curvas serán menos parecidas a las convencionales, asimismo el tiempo de convergencia puede incrementarse debido a la gran cantidad de combinaciones disponibles. Se redujo el rango de selección del dial hasta 3 unidades, ya que uno de los objetivos consiste en reducir el tiempo de op-

eración de los relevadores, por lo que sería inútil permitir multiplicadores demasiado grandes. Se realizaron pruebas proponiendo rangos diferentes a los aquí mencionados, fueron descartados debido a que los resultados obtenidos se alejaban del objetivo.

Tabla 3.1: Rango de selección de parámetros.

Parámetro	Mínimo	Máximo
$dial$	0.5	3
I_a	$1.4 * I_l$	$2 * I_l$
A	0.0515	28.2
B	0.1140	0.4910
p	0.02	2

Una matriz como la de la ecuación 3.1 con valores asignados aleatoriamente dentro de los rangos mostrados en la tabla 3.1 se proporciona como entrada al algoritmo genético. Los valores de corriente de carga deben obtenerse previamente mediante un análisis de flujos o contingencias, mientras que las de falla mediante un análisis de corto circuito. En adición se deben definir las parejas de coordinación.

3.2 FUNCIÓN OBJETIVO

Es importante recalcar la relevancia que tiene la función objetivo en cualquier método de optimización, sin ser los algoritmos genéticos la excepción. Su labor es establecer claramente qué resultados se esperan de un cromosoma y penalizar a aquellos que obtengan soluciones fuera de los límites operativos con la intención de definir qué tan aptos son y, por consiguiente, qué tan cerca están de ser el óptimo global.

En la coordinación de protecciones de sobrecorriente se busca satisfacer diversas necesidades, mientras más de ellas sean satisfechas el cromosoma será más apto. Se puede considerar que el primer objetivo es que cada protección sea capaz de

detectar fallas en su zona principal y de respaldar a las protecciones de líneas adyacentes. Como se mostró anteriormente, para que se obtenga un tiempo de operación positivo la I_f debe ser mayor que la I_a , en el caso contrario la protección carecerá de sensibilidad ante esa magnitud de corriente, por lo que no operará. Los individuos que obtengan tiempos negativos deben ser penalizados. El siguiente objetivo sería reducir al mínimo los tiempos de liberación de falla. En resumen el mejor cromosoma será el que contenga los ajustes que hagan operar a los relevadores en el menor tiempo posible, tanto como protecciones principales como de respaldo.

En primera instancia el tiempo de operación de cada relevador de cada cromosoma es determinado utilizando la ecuación 2.1 para una falla en su zona principal (t_{pr}). El valor de la I_f es igual a la corriente de coordinación (I_c), es decir, la corriente que ve en conjunto con cada uno de sus respaldos. Acto seguido se calcula el tiempo de operación de cada respaldo (t_{re}) para la misma corriente. El tiempo de operación de los respaldos debe ser igual al del relevador principal más el valor del CTI, tal como se muestra en la ecuación 2.2. Por lo tanto, calculados los tiempos de la protección principal y de la de respaldo se puede calcular el CTI que obtuvo la pareja de coordinación (CTI_{real}), haciendo uso de la ecuación 3.2. Si el resultado de esta operación es igual al valor deseado de CTI (generalmente 0.3) el respaldo está ajustado correctamente, de no ser así existe un error en la coordinación, el cual se nombrará *Error de Intervalo de Tiempo de Coordinación* (E_{CTI}) y puede ser calculado mediante la ecuación 3.3.

$$CTI_{real} = t_{re} - t_{pr}. \quad (3.2)$$

$$E_{CTI} = CTI_{real} - CTI_{deseado}. \quad (3.3)$$

En algunas parejas el E_{CTI} será mínimo, sin embargo difícilmente llegará a ser cero. Cuando éste es negativo la coordinación no se cumple, cuando es positivo, se está obteniendo un retraso de tiempo más grande que el deseado. Ambos escenarios pueden presentarse y deben ser penalizados, el primero en mayor medida.

Lograr la coordinación con tiempos muy elevados significa que la magnitud de corriente de falla es muy cercana a la corriente de arranque. El elevado tiempo de operación de algunos relevadores repercutirá en la coordinación, obteniéndose tiempos mayores en ciertas protecciones. Debido a que ocasionalmente esta escasez de sensibilidad es una limitante inherente al principio de protección una opción consiste en utilizar otro principio para estos relevadores ‘problema’, buscando aliviar al sistema.

Tomando en cuenta que agregar grados de libertad incrementa considerablemente el tamaño de las matrices y por consiguiente el número de operaciones, se decide utilizar una función objetivo sencilla, basada en operaciones algebraicas básicas y utilizando valores que ya fueron calculadas para no agregar mayor carga computacional al algoritmo. Haciendo uso de los conceptos definidos en los párrafos anteriores se define que la función objetivo empleada en el presente trabajo consiste en la sumatoria de tiempos principales, de respaldo y del error de intervalo de tiempo de coordinación, así como una relación que involucra el total de relevadores que no coordinan, el total de relevadores presentes en el sistema y el tiempo de operación de las protecciones principales, tal como se aprecia en la ecuación 3.4. Cuando el E_{CTI} de un individuo indica que no se logra la coordinación se le agrega una penalización mayor, buscando erradicar estas situaciones, como es mostrado en la ecuación 3.5.

$$f(x) = \left[\left(\frac{\sum_{j=1}^{TR} T_{ncj}}{\sum_{j=1}^{TR} t_{prj}} \right) * \alpha + \left(\sum_{j=1}^{TR} t_{prj} \right) * \beta + \left(\sum_{j=1}^{TR} t_{rej} \right) * \gamma + \left(\sum_{j=1}^{TR} E_{CTI_j} \right) * \delta \right]. \quad (3.4)$$

$$E_{CTI_j} < 0 \Rightarrow E_{CTI_j} * -\epsilon. \quad (3.5)$$

Donde α , β , γ y δ son constantes que ponderan la influencia de cada sumatoria, TR es el total de relevadores, T_{nc} es el total de relevadores que no coordinan y ϵ es una penalización adjudicada a éstos; por último, t_{pr} y t_{re} son los tiempos de operación de protecciones principales y de respaldo.

3.3 SELECCIÓN

Una vez evaluados los cromosomas de acuerdo a la función objetivo se obtendrán diferentes resultados, los individuos con menores valores serán más aptos por lo que tendrán mayores probabilidades de sobrevivir. La selección se lleva a cabo con uno de los dos métodos descritos en la sección 2.2.3, llamados selección por ruleta y por muestreo. Los mejores resultados de la evaluación de los cromosomas generalmente están muy separados de los peores, sobre todo en las primeras iteraciones, por lo tanto en ambos casos el área de selección es normalizada utilizando un porcentaje por ranking (PR), ya que utilizar un porcentaje por evaluación (PE) acabaría rápidamente con la diversidad, incrementando las posibilidades de que el algoritmo se atasque en una solución local.

En un porcentaje por ranking en cada iteración los cromosomas son reacomodados de acuerdo a sus resultados para luego asignarles un valor igual al inverso de su posición (v), dicho valor es proporcional al porcentaje que ocupará del área de selección. Para una población de diez cromosomas el área de selección será de la siguiente longitud:

$$AS = \sum_{j=1}^{10} v_j,$$
$$AS = 2.9290.$$

3.3.1 SELECCIÓN POR RULETA

La dimensión de la zona ocupada por cada cromosoma es proporcional al resultado de su evaluación, suponiendo que se tienen diez cromosomas y que se utiliza el porcentaje por ranking, en la figura 3.1 se puede observar el tamaño de la zona correspondiente a cada individuo, mientras que la probabilidad que tienen de ser seleccionados como padres se muestra en la tabla 3.2.

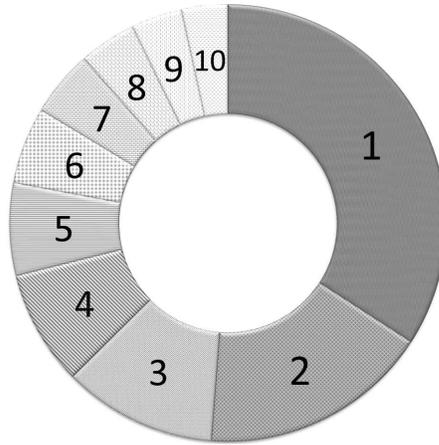


Figura 3.1: Espacio cubierto por cada zona de la ruleta, proporcional al ranking.

Tabla 3.2: Probabilidad de selección de cada cromosoma por el método de la ruleta.

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
34.14 %	17.07 %	11.38 %	8.53 %	6.82 %	5.69 %	4.87 %	4.26 %	3.79 %	3.41 %

Las principales ventajas y desventajas de este método se deben a la misma razón, la aleatoriedad. A diferencia del método de muestreo, en el de ruleta cualquier cromosoma puede ser seleccionado, independientemente de su ranking. La desventaja consiste en que en cada iteración se deben obtener nuevos valores aleatorios e identificar a cuál cromosoma corresponden. Puede no parecer una carga computacional muy grande, sin embargo realizar la misma acción cientos de veces por iteración deja de ser algo despreciable.

3.3.2 SELECCIÓN POR MUESTREO

Los cromosomas se ordenan de acuerdo al ranking, suponiendo que se quieren elegir nueve cromosomas como padres para la siguiente generación basta muestrear igual número de ocasiones el área de selección, eligiendo como padre al cromosoma correspondiente a la zona muestreada, tal como se observa en la figura 3.2. Los individuos más aptos son seleccionados como padres más de una vez, en este ejemplo el mejor evaluado sería seleccionado en tres ocasiones, el segundo lugar en dos,

mientras que el tercero, quinto, séptimo y noveno en una ocasión. Ya que el tamaño de la población permanece constante durante la simulación la longitud del área de selección siempre será la misma, siendo necesario realizar este procedimiento solo una vez (siempre y cuando se desee seleccionar la misma cantidad de padres). La ventaja consiste en la reducción de operaciones, la desventaja en que siempre se seleccionarán los cromosomas que se encuentren en esas posiciones.



Figura 3.2: Selección por muestreo.

3.4 NUEVA GENERACIÓN

La nueva generación estará compuesta por los cromosomas obtenidos luego de aplicar los operadores de reproducción y mutación, así como por un pequeño porcentaje de padres elite.

3.4.1 REPRODUCCIÓN

La mayor parte de la población que conforma la nueva generación es obtenida mediante el operador de reproducción, una vez seleccionados los padres se realiza este procedimiento utilizando las técnicas descritas en el capítulo anterior. Se debe cuidar que al llevarla a cabo se intercambien todos los genes correspondientes al relevador seleccionado, evitando así perder información. La figura 3.3 muestra un ejemplo del presente operador. Suponiendo que el punto de cruce está colocado después del relevador 3, se deben intercambiar todos los ajustes de los relevadores 4 y 5.

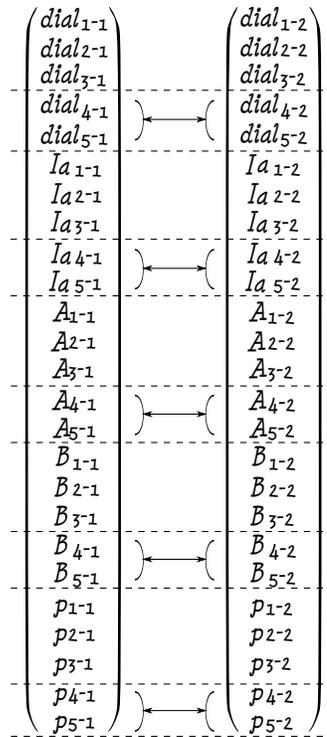


Figura 3.3: Al cruzar los genes se intercambian todos los ajustes de los relevadores.

En el presente trabajo la reproducción se realiza considerando un solo punto de cruce ya que, debido a la gran longitud de los cromosomas, tomar en cuenta múltiples puntos daría lugar a mayor tiempo computacional. El punto se establece aleatoriamente entre el 25 y el 75 % del total de relevadores, dicho de otra forma si el sistema cuenta con 100 relevadores el punto de cruce estará colocado entre el relevador 25 y 75.

3.4.2 MUTACIÓN

Una pequeña parte de la población (máximo un 10 %) es sometida a este operador. La mutación consiste en cambiar uno o más genes de una pequeña porción de la población de manera aleatoria. A diferencia del proceso de reproducción, en este operador no es necesario cambiar todos los ajustes del relevador. En algunas ocasiones sucede que el algoritmo se atasca en un mínimo local rápidamente, buscando escapar de esta situación se introducen mutaciones masivas (hasta un 40 % de los

elementos), las cuales se realizan cuando se detecta que el individuo más apto de la población no mejoró después de cierto número de iteraciones. Además, un pequeño porcentaje de las mutaciones se realizan específicamente a los individuos más aptos o elite, en lugar de seleccionar a los candidatos a mutaciones aleatoriamente.

3.4.3 PADRES ELITE

La parte minoritaria de la nueva generación está conformada por los llamados *Padres Elite*, que no son más que una pequeña parte de los cromosomas que obtuvieron los mejores resultados en la evaluación, es decir, los mejor rankeados. La utilización de estos cromosomas asegura que el individuo más apto de la nueva generación obtenga resultados cuando menos iguales al de la generación anterior.

3.4.4 DIAGRAMA DE FLUJO

La figura 3.4 muestra un diagrama simplificado de la herramienta programada para llevar a cabo la coordinación de protecciones de sobrecorriente mediante la implementación de un algoritmo genético. Los símbolos utilizados se describen a continuación:

NI = Número de iteración actual.

TI = Total de iteraciones.

x = Contador.

y = Límite antes de ordenar una mutación masiva.

Y = Límite antes de detener el algoritmo.

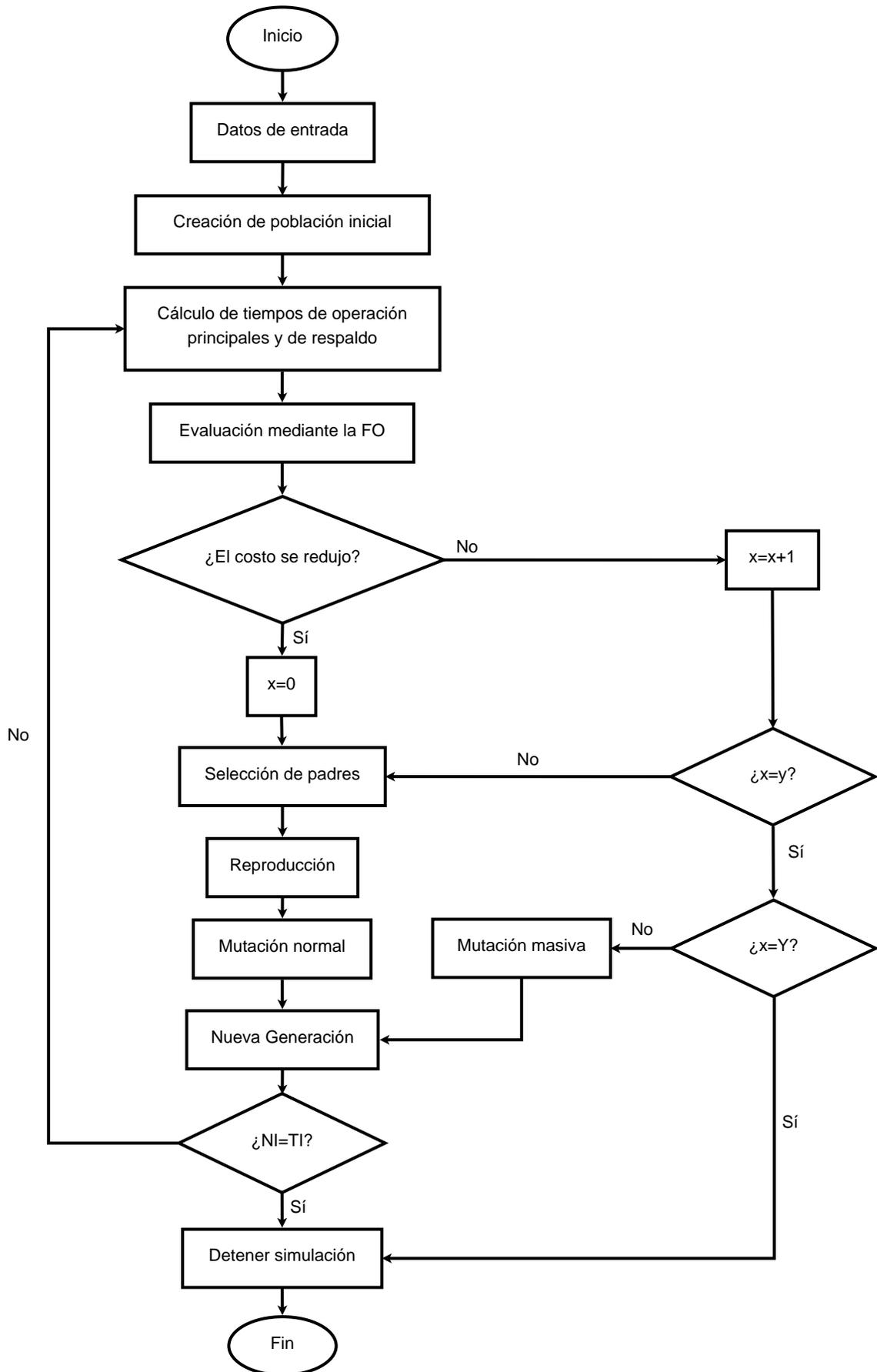


Figura 3.4: Diagrama de flujo del algoritmo genético programado.

CAPÍTULO 4

EVALUACIÓN DE LA IMPLEMENTACIÓN DE UN ALGORITMO GENÉTICO QUE RESUELVE LA COORDINACIÓN DE PROTECCIONES DE SOBRECORRIENTE UTILIZANDO CURVAS DE TIEMPO NO CONVENCIONALES

En el presente capítulo se muestran los resultados obtenidos al evaluar la implementación de un algoritmo genético que resuelve la coordinación de protecciones de sobrecorriente utilizando curvas de tiempo no convencionales.

Inicialmente se revelan las consideraciones realizadas, así como algunas alternativas empleadas con el afán de obtener mejores resultados; consecutivamente, de manera cualitativa se exponen los primeros resultados, mismos que fueron determinantes en la evolución de la programación del algoritmo y permitieron definir cuáles de las alternativas serían capaces de optimizar el desempeño del mismo. A la postre se presentan de manera cuantitativa y gráfica los resultados finales del presente trabajo de tesis.

4.1 CONSIDERACIONES

Las simulaciones se aplicaron en los sistemas de prueba de 14 y 30 nodos de la IEEE. Para llevar a cabo los estudios de corto circuito y flujos se utilizó el paquete *PowerWorld*[®] [2], en la versión más actualizada de *Glover, Sarma & Overbye*, la cual permite simular redes de hasta 40 nodos. La programación y evaluación del algoritmo se efectuó en *Matlab*[®] [1]. Cada escenario fue repetido un mínimo de 20 veces, el promedio en los resultados de la coordinación fue evaluado posteriormente.

Se presentan diferentes alternativas para llevar a cabo la coordinación de protecciones, todas comparadas con un *Caso Base (CB)*, dicho caso consiste en obtener la coordinación tomando en cuenta solo el dial como GDL, utilizando la curva de tiempo muy inversa y considerando la condición de carga máxima. En el segundo caso, además del dial se agrega la corriente de arranque, contando así con dos GDL; para el tercer caso se definen tres GDL, añadiendo la selección de una de las curvas estándar al *dial* y la I_a , en lugar de conservar la misma para todos los relevadores. Dicho de otro modo, para el tercer caso el relevador, además de ajustar el *dial* y la I_a , podrá elegir una de las curvas convencionales mostradas en la tabla 2.1. En el cuarto caso todos los parámetros variables de la ecuación 2.1 son utilizados como GDL para dar un total de cinco, obteniéndose por consiguiente curvas de tiempo no convencionales.

El quinto caso es una adaptación del trabajo de la referencia [10], la implementación parte del CB, el cambio consiste en agregarle un condicional que permite a los relevadores de respaldo utilizar su curva de tiempo inverso solo para corrientes mayores a la I_c , cuando se presenten valores inferiores a dicha corriente, el respaldo emulará la forma de la curva del relevador principal luego de sumarle el CTI. Con esta alternativa se busca reducir los tiempos de operación del relevador para fallas de corriente mínima y es descrita a fondo más adelante. El sexto y último caso consiste en realizar la coordinación para dos corrientes de falla (mínima y máxima), tomando en cuenta cinco GDL. El resumen de los casos utilizados se muestra en la tabla 4.1.

Tabla 4.1: Casos evaluados en la implementación.

Caso	GDL	Variables
1	1	$dial$
2	2	$dial, I_a$
3	3	$dial, I_a, curva$
4	5	$dial, I_a, A, B, p$
5	1	$dial$
6	5	$dial, I_a, A, B, p, I_{Max}, I_{min}$

Algunas alternativas que fueron propuestas con el objetivo de mejorar los resultados de la coordinación a continuación son descritas.

Corriente de carga (I_l) En la literatura revisada fue común encontrar trabajos en los que se considera que la corriente de carga es constante para todos los relevadores del sistema, es decir, se determina la línea por la cual fluye mayor cantidad de corriente, ajustando la I_a desde 1.2 veces este valor y se establece a todas las parejas de coordinación. Contar con corrientes de arranque iguales en todos los relevadores puede ser beneficioso para una coordinación ideal, pudiendo arrojar incluso buenos ajustes de protecciones para sistemas pequeños; sin embargo, en sistemas reales, anillados, con fuentes intermedias, entre más complejidades, esta consideración se aleja por completo de la situación real y pone en riesgo la correcta operación del sistema de protecciones.

En el presente trabajo de tesis se consideró una corriente de carga para cada pareja de coordinación. Utilizando el paquete *Power World* se llevó a cabo un análisis de flujos, con el que se obtuvieron las corrientes que circulan por las líneas durante la operación de los sistemas. Para el sistema de 14 nodos la máxima I_l que fluye entre dos nodos es 15 veces mayor que algunas de las que fluyen por otros. Si para todas las parejas se tomara el valor máximo como I_a , muchas de ellas nunca operarían, lo harían con tiempos muy altos o en una reacción en cascada, a pesar de que en los cálculos hayan obtenido buenos resultados. Asimismo la I_a se establece como mínimo en 1.4 veces la I_l .

Niveles de carga Como se mencionó en el capítulo 3, tradicionalmente la coordinación de protecciones se lleva a cabo estableciendo la I_a entre 1.4 a 2 veces la corriente de carga máxima, sin embargo, la mayor parte del tiempo el sistema opera en condiciones inferiores a dicho nivel; por lo tanto, si siempre es utilizado ese valor de corriente, el algoritmo de optimización es sometido a restricciones más elevadas que las necesarias, obteniéndose en consecuencia tiempos de operación más altos. Partiendo de la ecuación 2.1, mientras mayor sea la I_f respecto a la I_a , menor será el tiempo de operación de la protección; con esta idea en mente, se propone realizar la coordinación de protecciones para diferentes niveles de carga [10].

La condición de carga máxima se establece como caso base, aunado a éste se consideran cargas intermedia y mínima; dichos niveles de I_l para cada pareja de coordinación fueron obtenidos luego de operar el sistema a 2/3 y 1/3 de su capacidad, respectivamente. Realizando simulaciones en los sistemas de 14 y 30 nodos se pudo observar que al disminuir la I_l , la I_f sufre modificaciones que no son significativas, por lo tanto, en el presente trabajo esta última se considera constante para los tres niveles de carga propuestos. Cada caso fue evaluado para cada uno de los tres escenarios.

Mutaciones masivas La función objetivo utilizada busca reducir el costo, mientras que los mayores adelantos se alcanzan durante las primeras simulaciones, la pendiente se va reduciendo gradualmente hasta llegar al mínimo global, suponiendo que el algoritmo no termina en un mínimo local. En la figura 4.1 se grafica el mejor resultado de la función de costo a medida que avanzan las iteraciones para un sistema de prueba, se puede observar que más del 90 % de la reducción de costo se logra durante las primeras 500 iteraciones. Es importante aclarar que a pesar de que el valor numérico de la función de costo es relativo a los coeficientes y ponderaciones utilizados, el comportamiento de la curva mostrada sigue siendo el mismo en cualquier algoritmo genético, obteniéndose los mayores avances durante las primeras iteraciones.

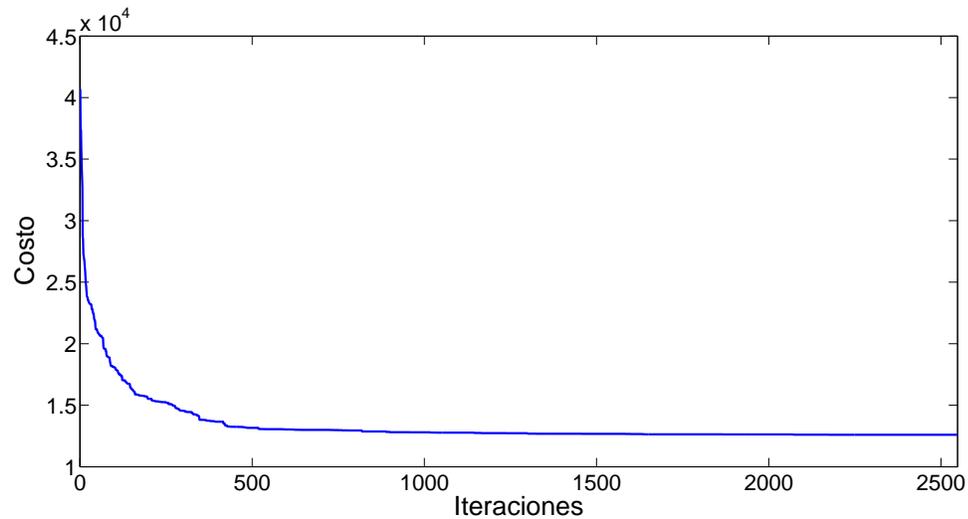


Figura 4.1: Reducción en la pendiente de la función de costo.

Con el objetivo de evitar que la solución obtenida sea un mínimo local, se implementó una rutina que monitorea la pendiente de reducción de costo; si después de cierto número de iteraciones ésta permanece constante o con una variación despreciable, se programan mutaciones masivas en los cromosomas (hasta un 40 % de cromosomas mutados, contra un 10 % de mutaciones perpetradas normalmente).

Se realizaron simulaciones cortas y largas, las cortas se obtuvieron haciendo uso de la rutina mencionada en el párrafo anterior; la simulación es detenida luego de que, a pesar de agregar mutaciones masivas, el sistema siga sin mejorar considerablemente, alcanzándose en promedio 2700 iteraciones para una población de 200 cromosomas en los sistemas de 14 y 30 nodos. Para las simulaciones largas se definió un total de iteraciones tal que, al ser éste alcanzado, la pendiente de reducción de costo fuese prácticamente nula, definiéndose un total de 7000.

Relevadores carentes de sensibilidad Debido a la topología del sistema, sobre todo en redes anilladas que presenten fuentes intermedias, algunos relevadores de respaldo detectan corrientes de coordinación inferiores a la de arranque, por lo que la coordinación nunca podría llevarse a cabo utilizando la protección de

sobrecorriente. Por esta razón, los relevadores que exhiben este problema no son incluidos en el algoritmo genético, es decir, son sacados del sistema antes de comenzar la coordinación.

Relevadores problema De igual forma que en el apartado anterior, existen casos en los que la I_c , a pesar de no ser menor que la I_a , si es muy cercana a ésta. Es bien sabido que el tiempo de operación de la protección es inversamente proporcional a la magnitud de la corriente detectada, por lo que en casos como el mencionado éste sería muy alto.

Relevadores con altos tiempos de operación pueden ocasionar el mismo problema en otras parejas de coordinación, por lo que se propone una rutina que detecta relevadores problema, es decir, relevadores que al paso de las iteraciones no logran una coordinación factible u operan con tiempos excesivamente altos. La rutina consiste en contar el número de veces que un relevador es considerado problema, si persiste luego de ciertas iteraciones es sacado de la simulación, buscando así aliviar las restricciones del sistema. Una vez eliminada la protección problema y después de correr cierta cantidad de iteraciones dejando así que el algoritmo se estabilice, el contador se reinicia, realizando el mismo procedimiento descrito.

4.2 SIMULACIONES INICIALES

Las primeras simulaciones se realizaron con el objetivo de observar el desempeño del algoritmo programado y de las alternativas propuestas, así como el de obtener un panorama general mediante el cual se pudiera redefinir el camino a tomar en las simulaciones posteriores. Por consiguiente se tomaron en cuenta diferentes escenarios para cada caso, por ejemplo, se evaluaron los casos 1 y 2 utilizando los tres primeros tipos de curvas mostrados en la tabla 2.1, buscando así determinar cuál de ellas facilita mayormente la coordinación. Además, para el caso 4 se definieron diferentes rangos entre los cuales seleccionar los parámetros A , B y p ,

mismos que se pueden observar en la tabla 4.2. Cada uno de los casos fue evaluado para tres diferentes niveles de carga, traducidos en diferentes niveles de corriente de arranque.

Tabla 4.2: Rangos de selección iniciales de los parámetros A , B y p .

ID	A	B	p
R1	[-250 250]	[-50 50]	[0.01 10]
R2	[0.01 50]	[0.01 5]	[0.01 2]
R3	[0.0515 28.2]	[0.114 0.491]	[0.02 2]
R4	[0.01 0.5]	[0.01 1]	[0.01 0.2]
R5	[19 20]	[0.3 0.7]	[1.9 2.1]

Para cada caso mostrado en la tabla 4.3 se realizaron 20 simulaciones con un promedio de 7000 iteraciones cada una. Se evaluaron el porcentaje de Relevadores que No Coordinan ($\%RNC$) y el porcentaje de relevadores cuyo tiempo de operación es mayor a un segundo, es decir, Relevadores de Tiempo Alto ($\%RTA$); dichos porcentajes se calculan en función del total de parejas de relevadores a coordinar, siendo un total de 42 para el sistema de 14 nodos y 110 para el de 30. Además, se tomó en cuenta el promedio del tiempo de operación de los relevadores primarios para la corriente de falla máxima (corto circuito trifásico), el tiempo promedio de los mismos para la corriente de coordinación (I_c), el error promedio de los respaldos (E_{CTI}) y el tiempo de operación de estos últimos para la I_c . Es prácticamente imposible que un algoritmo genético arroje los mismos resultados en más de una ocasión, por lo que para evaluar los resultados se obtuvo un promedio del desempeño de cada caso para las 20 simulaciones.

Tabla 4.3: Casos analizados en las simulaciones iniciales.

Caso 1			Caso 2			Caso 3	Caso 4				
MI	VI	EI	MI	VI	EI		R1	R2	R3	R4	R5

Luego de analizar los resultados se pudo observar que la curva moderadamente inversa es la que presenta condiciones más favorables para llevar a cabo la coordinación en los casos 1 y 2. Además, añadir GDL al algoritmo genético trajo beneficios,

se pudo determinar que el tiempo de operación del relevador principal y del respaldo disminuye en los casos 2, 3 y 4 con respecto al caso 1, tomado como base. El mejor resultado fue obtenido por el caso 4 mientras se utiliza el cuarto rango de selección de parámetros, siendo éste el más reducido y contando con valores muy cercanos a las constantes de la curva moderadamente inversa, por lo que el patrón de comportamiento es similar a lo observado en los casos 1 y 2. Asimismo se pudo comprobar que al tomar en cuenta niveles inferiores de carga, el algoritmo arroja mejores resultados. La alternativa de sacar de la simulación a los relevadores problema no rindió buenos resultados, el algoritmo no fue capaz de adaptarse a la salida constante de relevadores, dando lugar a soluciones de menor calidad. A pesar de esto, valdría la pena retomar esta idea en un trabajo futuro, pudiendo inclusive incluirse esta rutina considerando otro algoritmo de optimización.

Una nota importante es resaltar que la apertura de los rangos de selección de parámetros para el caso 4 no mejoró la coordinación, sobre todo para las opciones R1 y R2, que fueron las más abiertas. En gran medida las curvas obtenidas sufrían uno o múltiples cruces para corrientes inferiores a la de coordinación, además de perder la característica de tiempo inverso, sobre todo para R1. Los rangos R3, R4 y R5 obtuvieron los mejores resultados y un menor cruce de curvas, siendo éstos conservados para las simulaciones posteriores. A pesar a los malos resultados de los primeros dos rangos, no se descarta su posible utilización para otros escenarios, sobre todo cuando se presenten pocos relevadores a coordinar y en sistemas industriales o radiales.

Pese a que la reducción en los tiempos de operación demuestra que son correctas las hipótesis planteadas, el promedio de tiempos de operación para las simulaciones iniciales es muy alto (mayor a 1.77 segundos para el mejor de los casos), asimismo, aunque el $\%RNC$ es muy cercano a cero, el $\%RTA$ es muy alto (aproximadamente 50 %), por lo que en las simulaciones posteriores la función objetivo penalizó a mayor medida a los relevadores que operaran con tiempos altos.

4.3 RESULTADOS

En esta sección se muestran los resultados finales del presente trabajo de tesis, obtenidos bajo las consideraciones anteriormente mencionadas. Los seis casos propuestos, mostrados en la tabla 4.1 y retomados en la tabla 4.4 son a continuación descritos y comparados con el caso base. Además, cada uno fue evaluado para tres corrientes de arranque distintas. A diferencia de los resultados iniciales, que se obtuvieron luego de un promedio de 7000 iteraciones, los obtenidos en esta sección provienen de las simulaciones definidas anteriormente como cortas, detenidas luego de que la pendiente de la curva de reducción de costo de la función objetivo dejara de presentar decrementos considerables (aproximadamente 2700 iteraciones). Gracias a esta consideración se logra reducir el tiempo de simulación, sacrificando una posible mejoría en los resultados que se obtendría luego de realizar más iteraciones.

Tabla 4.4: Casos analizados en las simulaciones finales.

Caso 1	Caso 2	Caso 3		Caso 4			Caso 5	Caso 6		
		3C	8C	R3	R4	R5		R3	R4	R5
		3.1	3.2	4.1	4.2	4.3		6.1	6.2	6.3

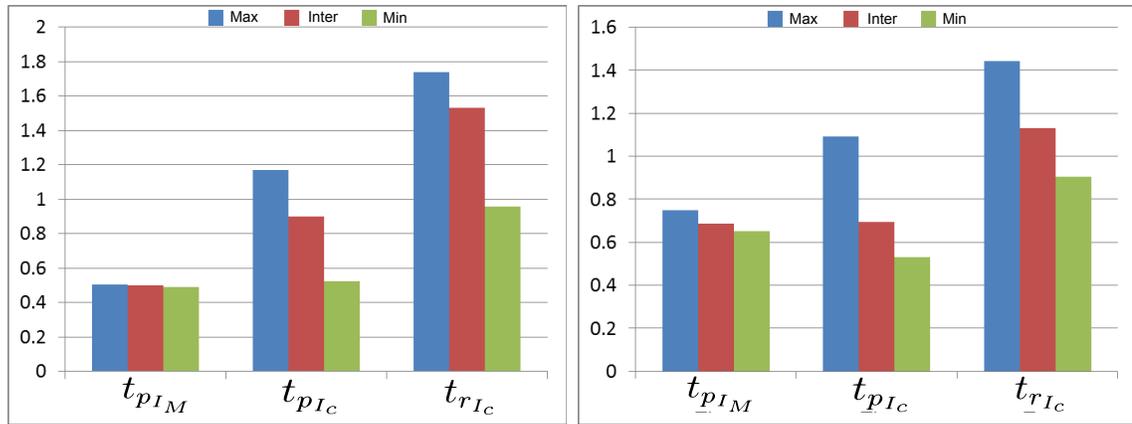
4.3.1 CASO 1

El primer caso consiste en tomar en cuenta solo el *dial* como GDL, abriendo el rango de selección entre 0.5 y 3 unidades; evaluado para la corriente de carga máxima es considerado como Caso Base (*CB*), los demás escenarios serán comparados con éste para así determinar el grado de mejora o deterioro en la coordinación de protecciones. En la tabla 4.5 se puede observar el resumen de los resultados obtenidos en estas simulaciones, mismos que se muestran graficados en la figura 4.2(a) y 4.2(b), respectivamente para el sistema de 14 y el de 30 nodos.

Los resultados mostrados corresponden al promedio del tiempo de operación de los relevadores primarios para la máxima corriente de falla ($t_{p_{IM}}$) y de éstos

Tabla 4.5: Resultados del caso 1.

t	CB	Caso 1	%R	I_a		t	CB	Caso 1	%R	I_a		
t_{pI_M}	0.503	0.503	0.000	IMax	14 Nodos	t_{pI_M}	0.749	0.749	0.000	IMax	30 Nodos	
t_{pI_c}	1.169	1.169	0.000			t_{pI_c}	1.090	1.090	0.000			IMax
t_{rI_c}	1.737	1.737	0.000			t_{rI_c}	1.444	1.444	0.000			
		0.502	0.281	IInter				0.685	8.587			
		0.898	23.191						0.696	36.165		
		1.531	11.878						1.131	21.687		
		0.489	2.824	IMin			0.650	13.235	IMin			
		0.527	54.946					0.531		51.298		
		0.960	44.708					0.906		37.297		



(a) Sistema de 14 nodos.

(b) Sistema de 30 nodos.

Figura 4.2: Caso 1. Promedio de tiempos de operación de los relevadores principales para la I_{Max} y la I_c , así como el de los respaldos para esta última, evaluando tres niveles de I_a .

mismos para la corriente de coordinación (t_{pI_c}), así como el tiempo de operación de los relevadores de respaldo para esta última (t_{rI_c}). En la columna CB se presentan los resultados del caso base, en la subsecuente los del caso en turno, mientras que la tercer columna de valores, etiquetada con %R, presenta el porcentaje de reducción en tiempo respecto al caso base, de tal forma que el t_{pI_c} del caso 1 para el sistema de 14 nodos, evaluado para una corriente de carga intermedia disminuyó en un 11.878 %. La quinta columna indica el nivel de corriente utilizado y la sexta el sistema correspondiente. Las mismas columnas con repetidas para el sistema de 30 nodos.

Analizando los resultados se puede observar que para ambos sistemas la coordinación mejora conforme se reduce la magnitud de la I_a , comprobando la hipótesis establecida. Un resultado no mostrado, pero que vale la pena resaltar es que el $\%RNC$, que para las primeras simulaciones era menor al 10%, para este caso alcanza un promedio de 36% en ambos sistemas, mientras que el $\%RTA$ se reduce a menos del 5%. Dicho de otro modo se logró reducir los tiempos de operación a costa de sacrificar la coordinación de algunos relevadores. Se debe tener en claro que no en todos los casos se logrará la coordinación del total de relevadores con tiempos bajos, más por limitaciones de la protección que del algoritmo.

4.3.2 CASO 2

En el caso dos se considera, además del *dial*, la I_a como GDL; como se mencionó en el capítulo 3, existen trabajos previos en el que esta alternativa ya ha sido empleada [7]. El rango de selección del dial permanece igual, mientras que la corriente de arranque puede tomar valores entre 1.4 y 1.7 veces la I_l .

Tabla 4.6: Resultados del caso 2.

t	CB	Caso 2	$\%R$	I_a		t	CB	Caso 2	$\%R$	I_a	
t_{pI_M}	0.503	0.497	1.267	IMax	14 Nodos	t_{pI_M}	0.749	0.604	19.362	IMax	30 Nodos
t_{pI_c}	1.169	1.129	3.477			t_{pI_c}	1.090	0.843	22.707		
t_{rI_c}	1.737	1.701	2.067			t_{rI_c}	1.444	1.318	8.710		
		0.490	2.519	IInter				0.698	6.787		
		0.879	24.817					0.736	32.533		
		1.515	12.785					1.181	18.201		
		0.375	25.360	IMin			0.667	10.951			
		0.464	60.306				0.561	48.559			
		1.019	41.357				0.937	35.099			

En los resultados de la tabla 4.6 y las figuras 4.3(a) y 4.3(b) se muestra que la adición de un GDL no presenta mejoras contundentes en cuanto a los tiempos de operación, pudiéndose apreciar que los mayores adelantos son alcanzados gracias a la utilización de diferentes niveles de carga; mientras tanto, el $\%RNC$ se reduce en

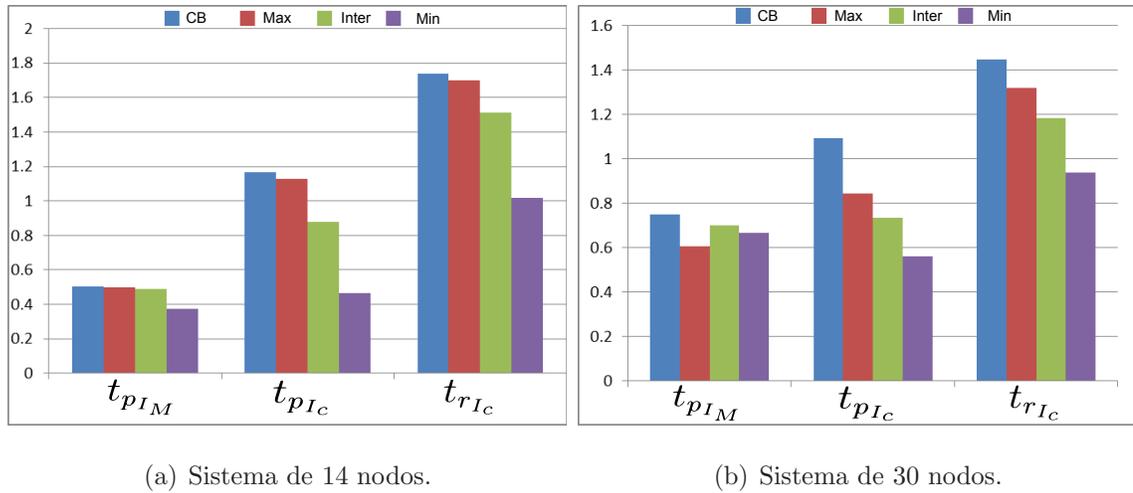


Figura 4.3: Caso 2. Promedio de tiempos de operación de los relevadores principales para la I_{Max} y la I_c , así como el de los respaldos para esta última, evaluando tres niveles de I_a y comparando con el CB.

promedio apenas dos unidades y el $\%RTA$ permanece prácticamente en el mismo valor.

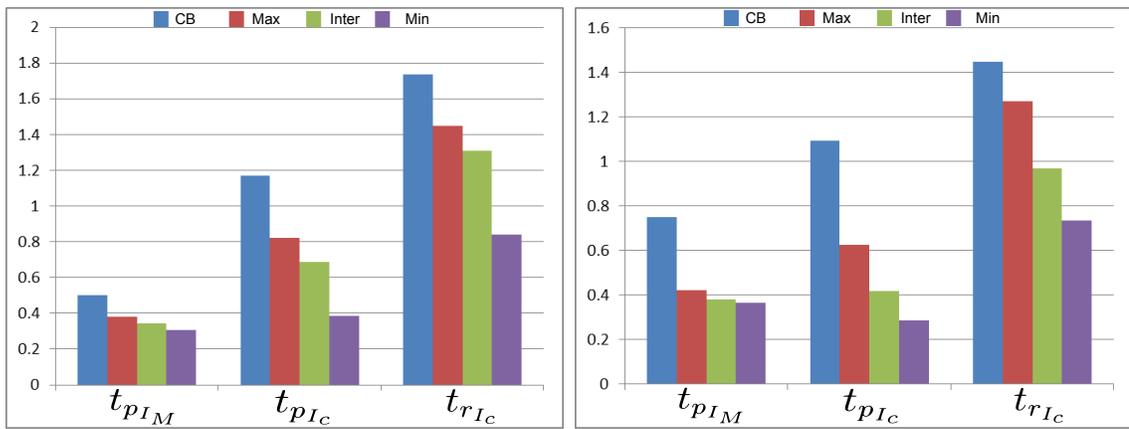
4.3.3 CASO 3

En el tercer caso, además del dial y la corriente de arranque se elige una de las curvas estándar como tercer GDL. Con el objetivo de observar el comportamiento del algoritmo luego de abrir el rango de selección se analizaron dos escenarios, en el primero (3.1) se consideran solo las tres curvas estándar del IEEE, mientras que en el segundo (3.2) se agregan las cinco del IEC, dando un total de ocho posibles opciones. La tabla 4.7 presenta los resultados para el caso 3.1 y 3.2 respectivamente, en las figuras 4.4(a) y 4.4(b) se grafican los resultados del primer caso, mientras que en 4.4(c) y 4.4(d) los del segundo.

Ambos escenarios arrojan resultados con una reducción importante en los tiempos de operación de las protecciones, en contraste con los primeros dos casos, en éste se pueden apreciar mejoras considerables incluso desde la corriente de arranque máxima. Aunque una de las principales preocupaciones en la coordinación de protecciones

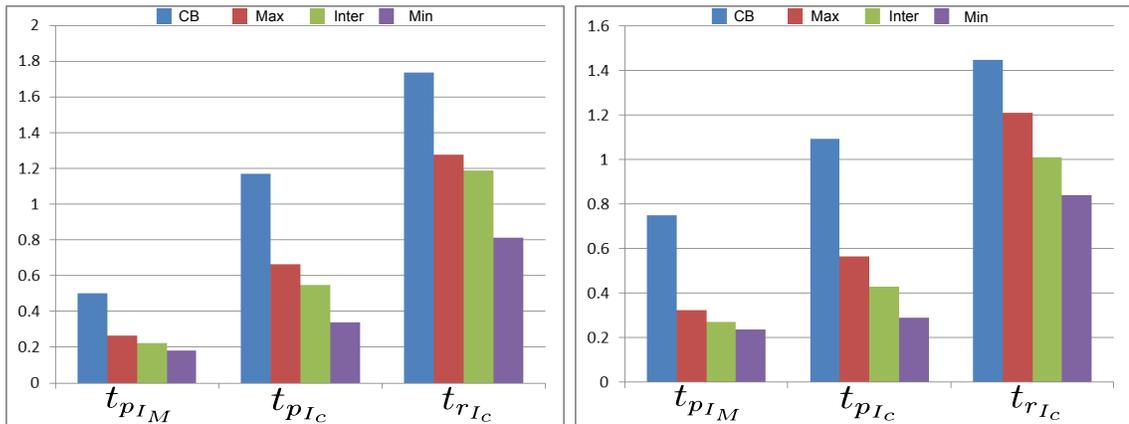
es reducir el tiempo de operación de la protección de respaldo, es importante resaltar la reducción entre un 40 y 75 % en la operación de la protección primaria.

Tomando en cuenta solo el porcentaje en reducción de tiempo, el caso 3.1 es ligeramente mejor, sin embargo, aunado a estos resultados, el $\%RNC$ se disminuye a un 26 % para el caso 3.1 y hasta un 23 % para el caso 3.2, equilibrándose así ambas alternativas. Abrir el rango de selección de curvas permite reducir el total de relevadores que no coordinan, en consecuencia se sacrifica ligeramente la reducción en los tiempos de operación.



(a) Caso 3.1, sistema de 14 nodos.

(b) Caso 3.1, sistema de 30 nodos.



(c) Caso 3.2, sistema de 14 nodos.

(d) Caso 3.2, sistema de 30 nodos.

Figura 4.4: Casos 3.1 y 3.2. Promedio de tiempos de operación de los relevadores principales para la I_{Max} y la I_c , así como el de los respaldos para esta última, evaluando tres niveles de I_a y comparando con el CB.

Tabla 4.7: Resultados del caso 3.1 y 3.2.

t	CB	Caso 3.1	%R	I_a		t	CB	Caso 3.1	%R	I_a	
$t_{p_{I_M}}$	0.503	0.379	24.586	IMax	14 Nodos	$t_{p_{I_M}}$	0.749	0.421	43.777	IMax	30 Nodos
$t_{p_{I_c}}$	1.169	0.823	29.619			$t_{p_{I_c}}$	1.090	0.624	42.764		
$t_{r_{I_c}}$	1.737	1.446	16.745			$t_{r_{I_c}}$	1.444	1.270	12.040		
		0.345	31.453	IInter				0.379	49.359		
		0.687	41.234					0.418	61.666		
		1.308	24.695					0.967	33.015		
		0.309	38.638	IMin			0.365	51.307			
		0.384	67.147				0.286	73.779			
		0.841	51.582				0.735	49.075			
t	CB	Caso 3.2	%R	I_a		t	CB	Caso 3.2	%R	I_a	
$t_{p_{I_M}}$	0.503	0.263	47.760	IMax	14 Nodos	$t_{p_{I_M}}$	0.749	0.322	57.030	IMax	30 Nodos
$t_{p_{I_c}}$	1.169	0.663	43.267			$t_{p_{I_c}}$	1.090	0.565	48.208		
$t_{r_{I_c}}$	1.737	1.277	26.470			$t_{r_{I_c}}$	1.444	1.208	16.370		
		0.223	55.703	IInter				0.270	63.975		
		0.547	53.179					0.428	60.728		
		1.189	31.527					1.009	30.145		
		0.182	63.776	IMin			0.235	68.613			
		0.340	70.942				0.291	73.326			
		0.811	53.307				0.839	41.935			

4.3.4 CASO 4

El cuarto caso consiste en permitir que todos los parámetros variables de la curva 2.2 puedan ser utilizados como GDL, a excepción de la corriente de falla, debido a que ésta no proviene de un ajuste definido sino de la medición obtenida. Los rangos de selección del *dial* y la I_a permanecen idénticos a los de los casos anteriores, mientras que para los ajustes A , B y p se utilizaron tres conjuntos de parámetros, definidos de acuerdo a los resultados de las simulaciones iniciales, las tres alternativas se muestran en la tabla 4.8.

El caso 4.1 permite los rangos más abiertos, los valores son establecidos con base en los mínimos y máximos de las curvas estándar del IEEE, por ejemplo, el mínimo valor del parámetro A es el de la curva moderadamente inversa, mientras

Tabla 4.8: Rangos de selección de los parámetros A , B y p , casos 4.1, 4.2 y 4.3.

	Caso 4.1	Caso 4.2	Caso 4.3
A	[0.0515 - 28.2]	[0.01 - 0.5]	[19 - 20]
B	[0.114 - 0.491]	[0.01 - 1]	[0.3 - 0.7]
p	[0.02 - 2]	[0.01 - 0.2]	[1.9 - 2.1]

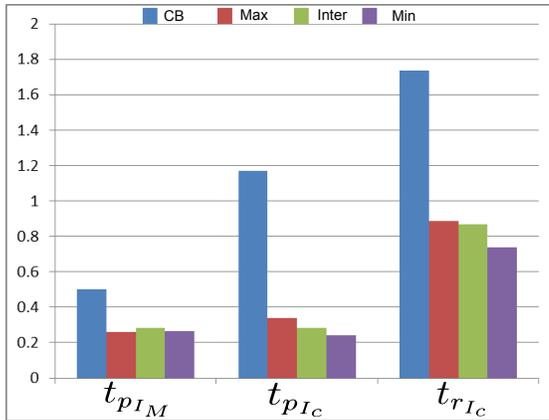
que el máximo viene del ajuste de la extremadamente inversa. La apertura en los rangos permite a las curvas tomar diversas formas, pudiendo ocasionar su cruce para corrientes inferiores a la de coordinación e incluso, aunque en pocas ocasiones, la pérdida de la característica de tiempo inverso.

El caso 4.2 selecciona valores cercanos a los ajustes de la curva moderadamente inversa, por lo que las curvas formadas por los ajustes resultantes del algoritmo tendrán similitud a ésta. De la misma manera, el último conjunto del presente caso corresponde a valores cercanos a la curva muy inversa, por ser ésta la más utilizada al realizar la coordinación de protecciones. En la tabla 4.9 se pueden observar los promedios en los tiempos de operación de las protecciones para los casos 4.1, 4.2 y 4.3. Asimismo son mostrados gráficamente en el conjunto de figuras 4.5.

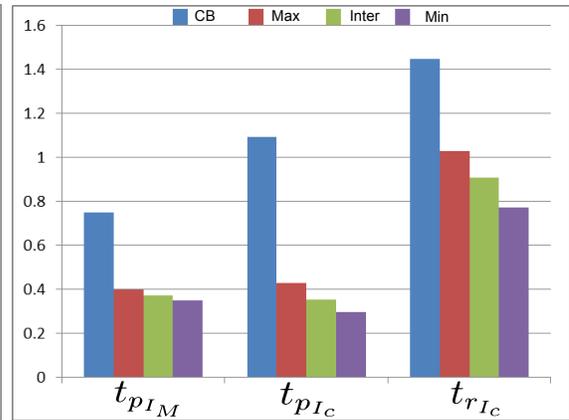
Los mejores resultados en la coordinación se obtuvieron en las tres variantes del presente caso, alcanzándose en promedio, para el sistema de 14 nodos, reducciones en los $t_{r_{Ic}}$ de un 60 % y de un 45 % en el de 30 nodos, ambos comparados con el caso base. Mientras que los $t_{p_{Ic}}$ se redujeron hasta en un 80 %. Aunado a esto, el %RNC se redujo a un 25 %, mientras que el %RTA permaneció prácticamente en cero. El caso 4.3 presenta en promedio los menores tiempos, pero logra la coordinación de menos relevadores en comparación con el caso 4.2, que opera con tiempos ligeramente más altos; sucede una situación similar a la del caso 3, los escenarios que logran coordinar mayor cantidad de relevadores, sacrifican en consecuencia algunas fracciones de segundo del tiempo promedio de operación.

Tabla 4.9: Resultados de los casos 4.1, 4.2 y 4.3.

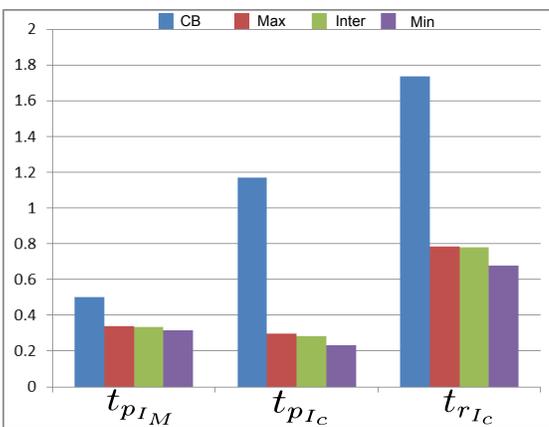
t	CB	Caso 4.1	%R	I_a		t	CB	Caso 4.1	%R	I_a	
t_{pIM}	0.503	0.262	47.903	IMax	14 Nodos	t_{pIM}	0.749	0.400	46.561	IMax	30 Nodos
t_{pIc}	1.169	0.340	70.880			t_{pIc}	1.090	0.430	60.596		
t_{rIc}	1.737	0.885	49.049			t_{rIc}	1.444	1.026	28.936		
		0.285	43.436	IInter				0.374	50.070		
		0.285	75.648					0.355	67.453		
		0.869	49.993					0.907	37.189		
		0.267	46.942	IMin				0.350	53.282		
		0.243	79.257					0.297	72.756		
		0.740	57.374					0.771	46.624		
t	CB	Caso 4.2	%R	I_a			t	CB	Caso 4.2	%R	
t_{pIM}	0.503	0.341	32.308	IMax	14 Nodos	t_{pIM}	0.749	0.491	34.416	IMax	30 Nodos
t_{pIc}	1.169	0.299	74.441			t_{pIc}	1.090	0.401	63.251		
t_{rIc}	1.737	0.786	54.729			t_{rIc}	1.444	0.958	33.697		
		0.334	33.509	IInter				0.464	38.133		
		0.281	75.943					0.367	66.333		
		0.781	55.019					0.904	37.433		
		0.318	36.867	IMin				0.441	41.113		
		0.232	80.192					0.321	70.592		
		0.680	60.843					0.819	43.317		
t	CB	Caso 4.3	%R	I_a			t	CB	Caso 4.3	%R	
t_{pIM}	0.503	0.345	31.411	IMax	14 Nodos	t_{pIM}	0.749	0.395	47.216	IMax	30 Nodos
t_{pIc}	1.169	0.748	36.024			t_{pIc}	1.090	0.468	57.112		
t_{rIc}	1.737	1.297	25.337			t_{rIc}	1.444	1.021	29.322		
		0.273	45.748	IInter				0.384	48.700		
		0.711	39.178					0.356	67.337		
		1.253	27.850					0.869	39.844		
		0.244	51.578	IMin				0.370	50.571		
		0.245	79.082					0.251	77.022		
		0.705	59.408					0.697	51.734		



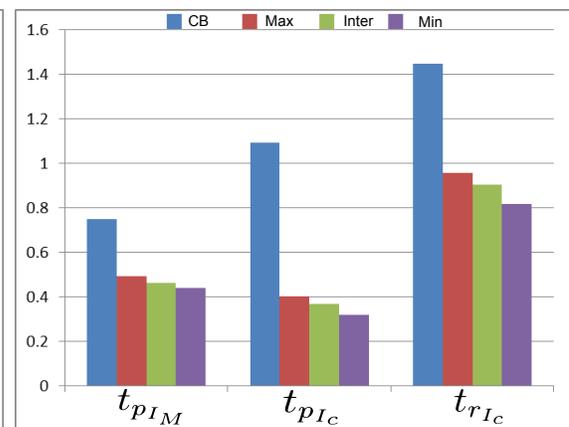
(a) Caso 4.1, sistema de 14 nodos.



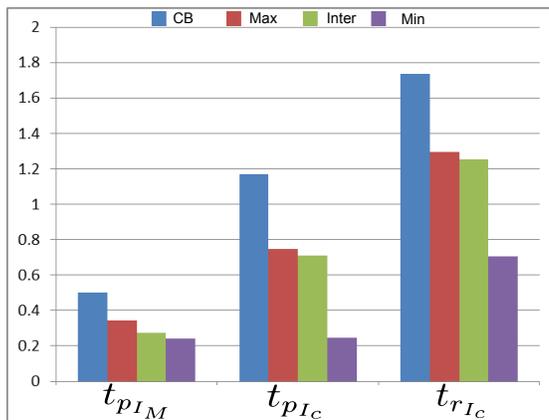
(b) Caso 4.1, sistema de 30 nodos.



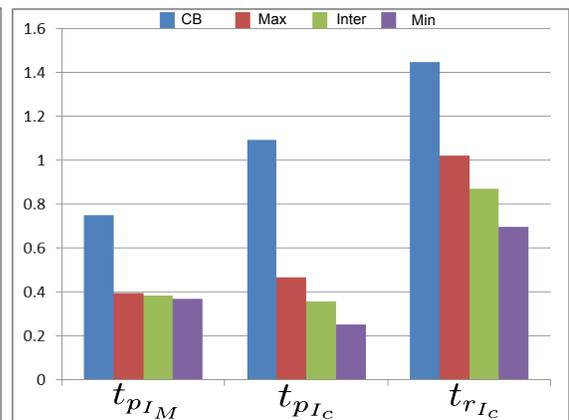
(c) Caso 4.2, sistema de 14 nodos.



(d) Caso 4.2, sistema de 30 nodos.



(e) Caso 4.3, sistema de 14 nodos.



(f) Caso 4.3, sistema de 30 nodos.

Figura 4.5: Casos 4.1 al 4.3 comparados con el CB, evaluando los tres niveles de I_a .

4.3.5 CASO 5

El caso es una variación del caso base puesto que utiliza un solo GDL, consiste en adaptar el algoritmo genético programado para encontrar los ajustes que logren la coordinación del escenario desarrollado por Conde y Vázquez (2011) en la referencia [10]. Se propone que los relevadores de respaldo operen con sus ajustes solamente para corrientes superiores a la de coordinación, mientras que para corrientes inferiores emularían la característica del relevador principal, luego de sumarle el intervalo de tiempo de coordinación (CTI); de esta forma se busca reducir el tiempo de operación de las protecciones de respaldo para corrientes inferiores a la I_c . En la figura 4.6 se muestra de manera gráfica lo mencionado anteriormente.

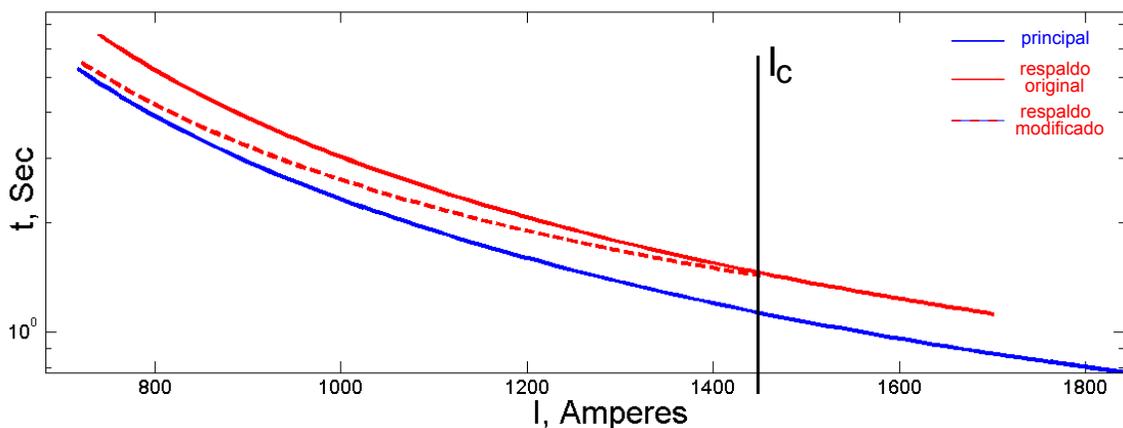


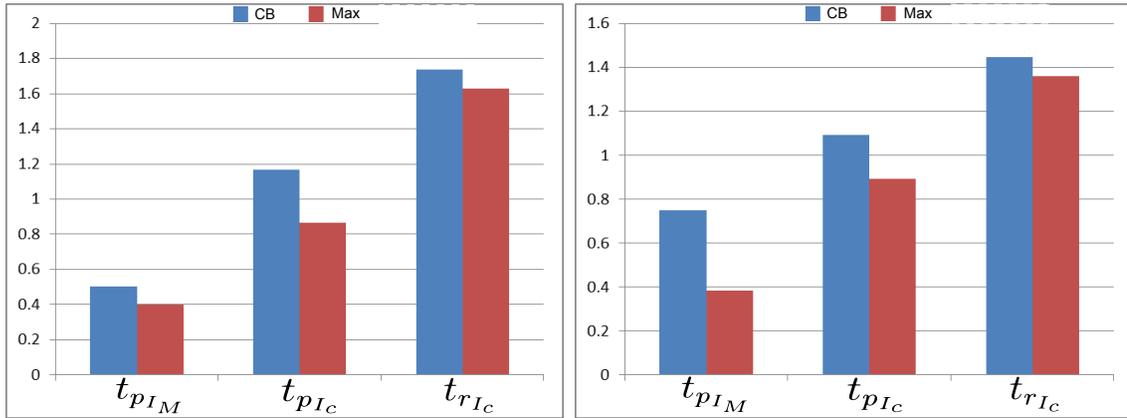
Figura 4.6: Operación de los relevadores principal y de respaldo para el caso 5.

Para implementar este caso en el algoritmo genético se realizaron algunas operaciones previas; contrario a los demás casos, los relevadores que contaran con más de un respaldo se coordinaron solamente con el más lento de éstos. Es decir, con los ajustes de cada relevador se calcularon los tiempos de operación de las protecciones principales y de respaldo, si el relevador 12 es respaldado por el 32 y el 52, se determinó cuál de estos últimos opera en un tiempo mayor, para luego ser utilizado. En la tabla 4.10 se presentan los resultados obtenidos, mientras que en la figura 4.7 son graficados. Para este caso solamente se presentan las simulaciones correspondientes a la corriente de arranque máxima.

Además de que el objetivo principal del presente caso consiste en reducir el tiempo de operación de las protecciones para corrientes inferiores a la de coordinación, también logró ciertas mejorías para esta última, sobre todo en la operación de las protecciones principales. A pesar de no ser mostrado, el efecto de reducir la I_a es similar a los casos anteriores, reflejándose en una mejor coordinación.

Tabla 4.10: Resultados del caso 5.

t	CB	Caso 5	%R	I_a		t	CB	Caso 5	%R	I_a	
t_{pI_M}	0.503	0.398	20.942	IMax	14 Nodos	t_{pI_M}	0.749	0.385	48.636	IMax	30 Nodos
t_{pI_c}	1.169	0.865	26.019			t_{pI_c}	1.090	0.891	18.312		
t_{rI_c}	1.737	1.627	6.316			t_{rI_c}	1.444	1.360	5.836		



(a) Sistema de 14 nodos.

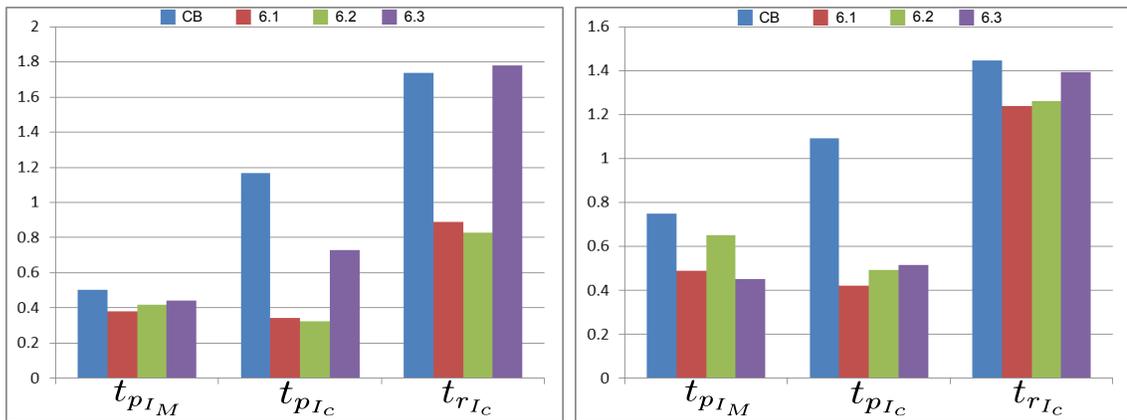
(b) Sistema de 30 nodos.

Figura 4.7: Caso 5. Promedio de tiempos de operación de los relevadores principales para la I_{Max} y la I_c , así como el de los respaldos para esta última, todos comparados con el caso base; solamente se evaluó el nivel máximo de I_a .

4.3.6 CASO 6

Tradicionalmente, como fue expuesto en la teoría, la coordinación de protecciones de sobrecorriente se realiza para la corriente de coordinación, determinada tomando en cuenta una falla máxima (trifásica). Esto quiere decir que se busca lograr que la operación del respaldo cumpla con el CTI para un solo punto en la curva de tiempo inverso, por lo que la coordinación no está garantizada para una falla de magnitud inferior. Tomando en cuenta este problema, en el último caso se propone agregar una restricción más a la función objetivo del algoritmo genético, dicha restricción consiste en realizar la coordinación para dos puntos en la curva, tanto para la falla máxima como para una mínima (entre dos líneas).

Se agregó la restricción al algoritmo, dándole una ponderación menor a la coordinación para falla mínima. Al igual que el caso anterior, en la figura 4.8 y en la tabla 4.11 se muestran solamente los resultados para la corriente de arranque máxima.



(a) Sistema de 14 nodos.

(b) Sistema de 30 nodos.

Figura 4.8: Caso 6. Promedio de tiempos de operación de los relevadores principales para la I_{Max} y la I_c , así como el de los respaldos para esta última, evaluados solamente para el nivel máximo de I_a y comparados con el CB.

Tabla 4.11: Resultados de los casos 6.1, 6.2 y 6.3.

t	CB	Caso 6.1	%R	I_a		t	CB	Caso 6.1	%R	I_a	
t_{pIM}	0.503	0.380	24.481		14 Nodos	t_{pIM}	0.749	0.489	34.759		30 Nodos
t_{pIc}	1.169	0.341	70.869	6.1		t_{pIc}	1.090	0.422	61.271	6.1	
t_{rIc}	1.737	0.888	48.897			t_{rIc}	1.444	1.237	14.329		
		0.419	16.650					0.652	12.973		
		0.325	72.239	6.2				0.492	54.874	6.2	
		0.829	52.273					1.260	12.739		
		0.441	12.354					0.453	39.555		
		0.728	37.737	6.3				0.517	52.594	6.3	
		1.781	-2.528					1.395	3.428		

No se lograron reducciones importantes en los tiempos de operación de los relevadores de respaldo, caso contrario en las protecciones principales. El presente caso debe ser explorado mayormente, redefiniendo las penalizaciones en la función objetivo e introduciendo nuevas alternativas.

4.4 COMPARACIÓN ENTRE LOS SEIS CASOS

Con el objetivo de definir más claramente cuáles de los casos presentados son los que facilitan mayormente la coordinación, a diferencia de la sección anterior, en la que se comparaban los resultados promedio de 20 simulaciones, en ésta se comparan los mejores resultados de cada caso, evaluados para corrientes de coordinación máximas (I_{cMax}) y mínimas (I_{cMin}), así como para los tres niveles de I_a .

En la tabla 4.12 se pueden observar, para ambos sistemas, los promedios de los tiempos de operación de la protección principal para la corriente máxima (t_{pIM}) y para la corriente de coordinación (t_{pIc}), así como el promedio de tiempo de operación de los relevadores de respaldo para esta última (t_{rIc}), considerándose el máximo nivel en la I_a . Los mismos resultados pueden ser observados gráficamente en el conjunto de figuras 4.9. Los mejores resultados se obtienen considerando cinco GdL.

Tabla 4.12: Promedios de los mejores resultados de todos los casos para la I_{cMax} y la I_{cMin} , considerando el nivel máximo de I_a .

		Caso													
t		1	2	3.1	3.2	4.1	4.2	4.3	5	6.1	6.2	6.3			
t_{pI_M}		0.498	0.438	0.354	0.217	0.232	0.295	0.285	0.402	0.338	0.351	0.402	I_{cMax}	14 Nodos	
t_{pI_c}		1.044	1.043	0.697	0.519	0.282	0.264	0.602	0.680	0.263	0.263	0.654			I_{cMin}
t_{rI_c}		1.572	1.668	1.328	1.098	0.749	0.705	1.085	1.191	0.723	0.710	1.372			
		0.509	0.449	0.371	0.236	0.263	0.301	0.296	0.411	0.341	0.355	0.413			
		1.341	1.293	1.287	0.765	0.364	0.276	0.693	0.827	0.734	0.479	4.762			
		2.963	2.898	3.076	1.923	1.341	0.840	1.815	1.127	2.193	1.320	12.498			
t_{pI_M}		0.685	0.473	0.416	0.267	0.369	0.428	0.350	0.393	0.473	0.534	0.430	I_{cMax}	30 Nodos	
t_{pI_c}		0.774	0.606	0.582	0.473	0.340	0.320	0.365	0.854	0.331	0.370	0.460			I_{cMin}
t_{rI_c}		1.222	1.062	1.163	1.004	0.920	0.827	0.840	1.294	0.951	1.012	1.208			
		0.702	0.485	0.415	0.266	0.392	0.446	0.370	0.610	0.490	0.541	0.447			
		0.835	0.568	0.586	0.529	0.396	0.324	0.324	0.917	1.527	0.779	4.836			
		1.529	1.459	1.450	1.298	1.132	0.885	1.248	1.217	4.945	1.368	16.207			

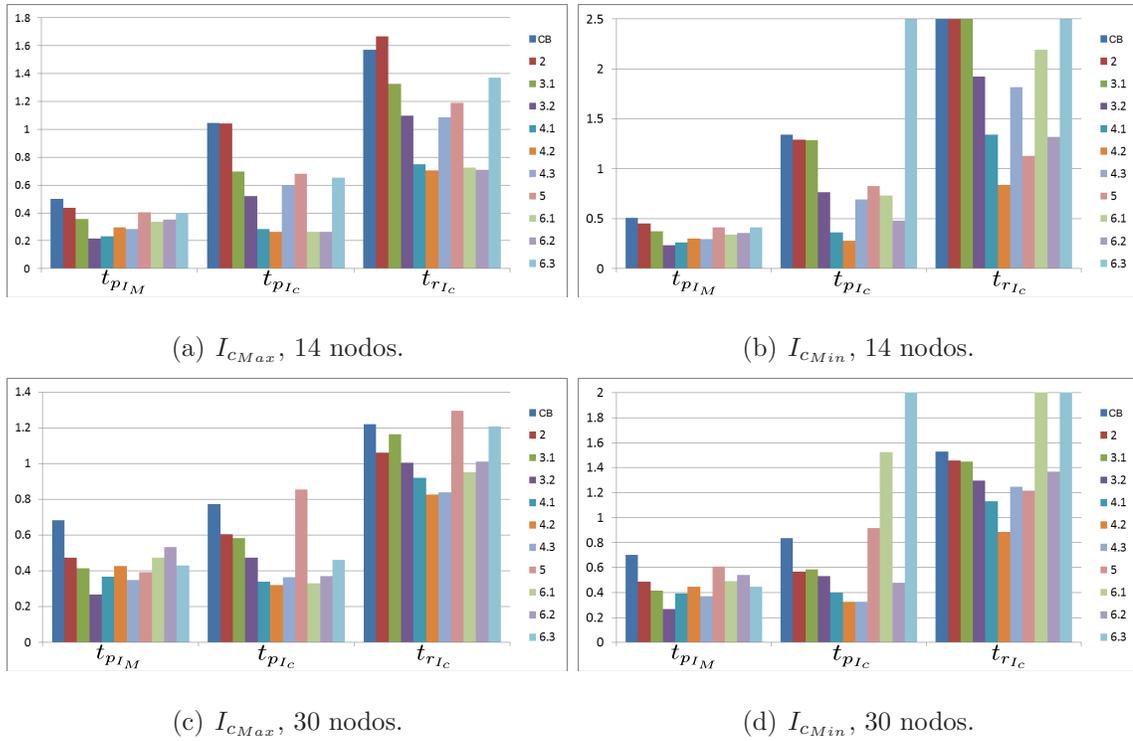


Figura 4.9: Mejores resultados de todos los casos, evaluados para corrientes de coordinación máximas y mínimas, tomando en cuenta el nivel máximo de la I_a .

Vale la pena resaltar los resultados del caso 5 que, a pesar de no ser los mejores, son bastante buenos si se toma en cuenta que solamente se están considerando los respaldos más lentos, tal como se expuso en la sección anterior. El promedio en los tiempos de operación para la I_{CMin} está entre los mejores tres considerando ambos sistemas. Con los casos 6.1 y 6.2 se obtuvieron resultados buenos para la I_{CMax} , sin embargo solo el segundo logró mantenerlos para una I_{CMin} en ambos sistemas; por otra parte, se puede observar que el caso 6.3 no es capaz de reducir los tiempos de las protecciones para una corriente de coordinación mínima, obteniendo resultados totalmente descartables.

A continuación, en las tablas 4.13 y 4.14 se presentan los mismos resultados, considerando ahora el nivel intermedio y mínimo en la corriente de arranque, respectivamente. Asimismo pueden ser observados de manera gráfica en las figuras 4.10 y 4.11.

Tabla 4.13: Promedios de los mejores resultados de los cuatro primeros casos para la I_{cMax} y la I_{cMin} , considerando el nivel intermedio de I_a .

		Caso								
t		1	2	3.1	3.2	4.1	4.2	4.3		
t_{pIM}		0.488	0.502	0.328	0.246	0.367	0.418	0.314	I_{cMax}	14 Nodos
t_{pIc}		0.436	0.447	0.354	0.387	0.306	0.332	0.255		
t_{rIc}		0.840	0.854	0.867	0.923	0.772	0.756	0.712		
		0.494	0.513	0.328	0.245	0.390	0.435	0.327	I_{cMin}	
		0.437	0.839	0.318	0.431	0.366	0.356	0.530		
		0.951	1.767	0.870	1.238	1.182	0.864	1.280		
t_{pIM}		0.554	0.527	0.332	0.221	0.270	0.324	0.298	I_{cMax}	30 Nodos
t_{pIc}		0.803	0.868	0.616	0.482	0.242	0.238	0.463		
t_{rIc}		1.381	1.408	1.113	1.059	0.762	0.686	0.965		
		0.559	0.534	0.344	0.242	0.295	0.332	0.307	I_{cMin}	
		0.931	1.058	0.799	0.765	0.350	0.241	0.499		
		2.358	2.285	2.436	3.140	1.439	0.782	1.546		

Para los tres niveles de corriente de arranque, sin tomar en cuenta los resultados de los casos 5 y 6, se puede observar que generalmente, a medida que se agregan GDL al algoritmo, los promedios en los tiempos de operación de las protecciones descienden en ambos sistemas, sobre todo para la máxima corriente de coordinación. El caso 4.3, aunque no rompe con esta percepción, tampoco alcanza a ser tan bueno como los otros dos que consideran 5 GDL.

La observación antes notada sobre la I_{cMax} no corresponde al comportamiento de los casos para la I_{cMin} , a medida que se disminuye la I_a , los casos 2 y 3 arrojan mayores tiempos de operación, siendo el caso 4 el único que obtiene resultados concluyentes independientemente del nivel de corriente de arranque.

No obstante los buenos resultados del caso 4.3 para la I_{cMax} , para la mínima éstos no logran ser mantenidos, siendo en algunos escenarios incluso mayores que el caso base. Como se recordará, los rangos de selección de parámetros del caso 4.3 son cercanos a la curva muy inversa, esto ayuda que la operación de la protección sea muy rápida para corrientes altas, caso contrario con corrientes inferiores. Por el contrario,

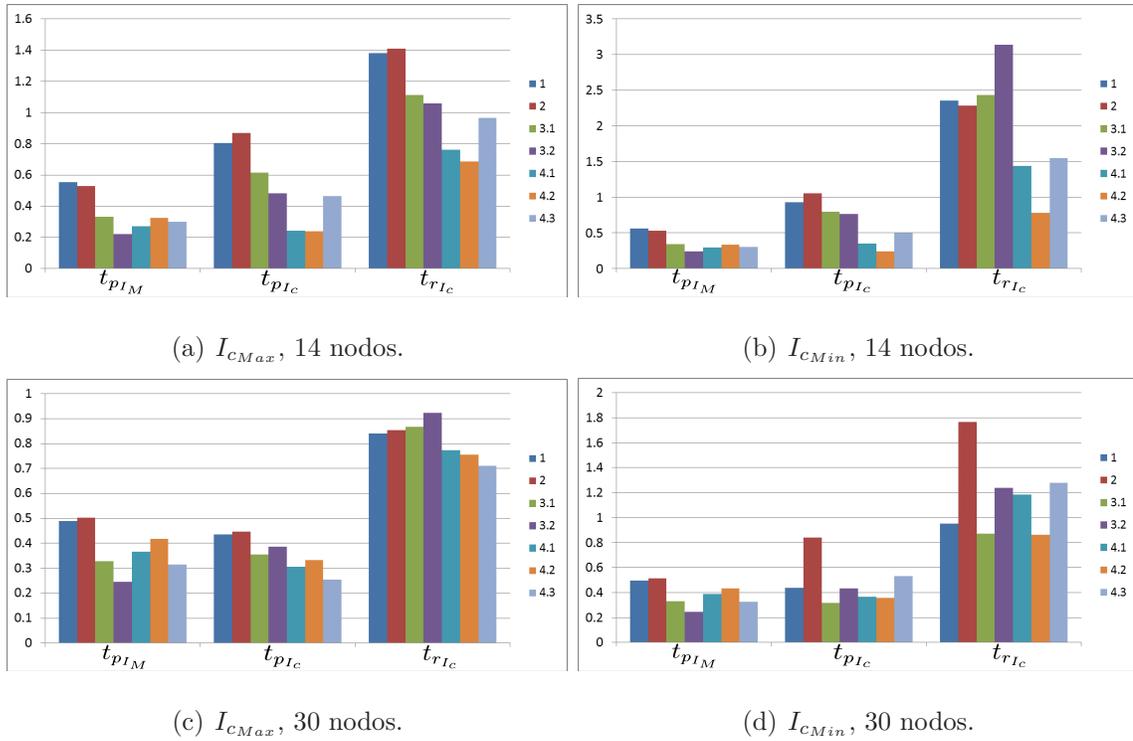


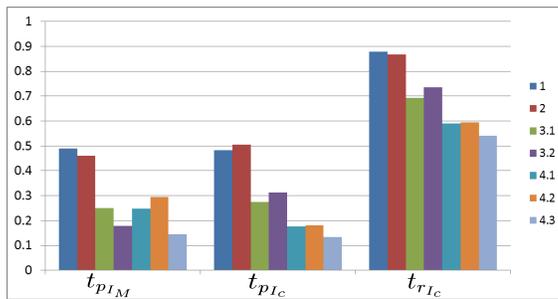
Figura 4.10: Mejores resultados de los cuatro primeros casos, evaluados para corrientes de coordinación máximas y mínimas, tomando en cuenta el nivel intermedio de la I_a .

para el caso 4.2, donde los rangos de selección son cercanos a la curva moderadamente inversa, se obtuvieron los mejores resultados para la I_{CMax} , manteniéndose éstos para una I_{CMin} .

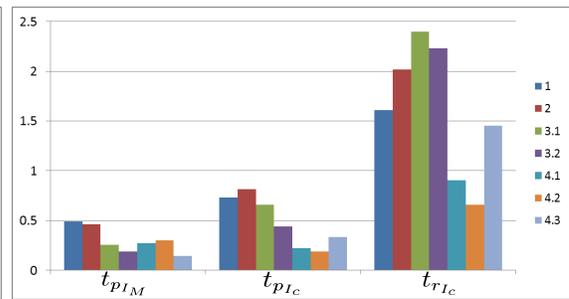
Al igual que en la sección anterior, incrementar los GDL permite la coordinación de una mayor cantidad de relevadores, tanto para la corriente de coordinación máxima como mínima. Sin embargo, en todos los casos y con todos los niveles de I_a , un porcentaje de relevadores dejan de coordinar al ser evaluados para la I_{CMin} , lo que indica un cruce de curvas o carencia de sensibilidad para dichos niveles de corriente de falla. Al utilizar 5 GDL también se logra reducir el %RNC para una corriente mínima, aproximadamente en un 10 % para la I_{aMax} y hasta un 20 % en la I_{aMin} , comparando ambos sistemas con el caso base.

Tabla 4.14: Promedios de los mejores resultados de los cuatro primeros casos para la $I_{c_{Max}}$ y la $I_{c_{Min}}$, considerando el nivel mínimo de I_a .

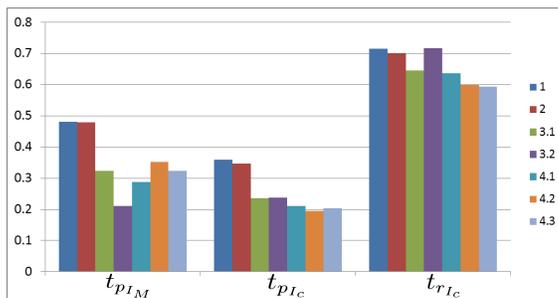
		Caso								
t		1	2	3.1	3.2	4.1	4.2	4.3		
$t_{p_{IM}}$		0.482	0.479	0.324	0.211	0.287	0.352	0.323	$I_{c_{Max}}$	14 Nodos
$t_{p_{Ic}}$		0.359	0.346	0.235	0.237	0.211	0.194	0.204		
$t_{r_{Ic}}$		0.715	0.702	0.645	0.716	0.637	0.598	0.593		
		0.483	0.481	0.328	0.211	0.298	0.362	0.328	$I_{c_{Min}}$	
		0.550	0.810	0.359	1.356	0.625	0.184	0.524		
		0.938	1.504	1.338	2.824	1.383	0.612	1.287		
$t_{p_{IM}}$		0.489	0.461	0.251	0.178	0.247	0.295	0.144	$I_{c_{Max}}$	30 Nodos
$t_{p_{Ic}}$		0.483	0.506	0.275	0.313	0.175	0.180	0.133		
$t_{r_{Ic}}$		0.879	0.867	0.694	0.736	0.589	0.595	0.540		
		0.490	0.462	0.256	0.190	0.271	0.302	0.146	$I_{c_{Min}}$	
		0.733	0.818	0.659	0.441	0.220	0.190	0.334		
		1.607	2.019	2.398	2.228	0.907	0.657	1.454		



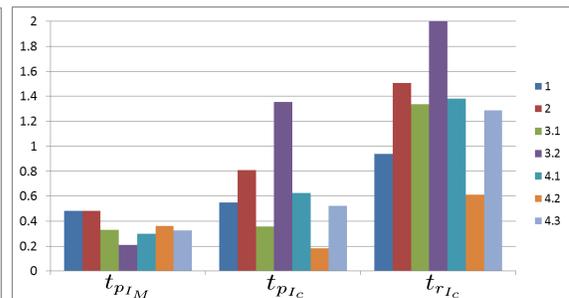
(a) $I_{c_{Max}}$, 14 nodos.



(b) $I_{c_{Min}}$, 14 nodos.



(c) $I_{c_{Max}}$, 30 nodos.



(d) $I_{c_{Min}}$, 30 nodos.

Figura 4.11: Mejores resultados de los cuatro primeros casos, evaluados para corrientes de coordinación máximas y mínimas, tomando en cuenta el nivel mínimo de la I_a .

CAPÍTULO 5

CONCLUSIONES Y TRABAJOS FUTUROS

En el presente capítulo se resaltan los puntos más sobresalientes de este trabajo de tesis, se describen las aportaciones realizadas y se presentan algunas recomendaciones sobre posibles trabajos futuros.

5.1 CONCLUSIONES

El algoritmo genético programado cumple con el objetivo de realizar la coordinación de protecciones de sobrecorriente tomando en cuenta desde uno hasta cinco grados de libertad en la curva característica.

El tiempo de simulación aumenta mientras más grados de libertad son considerados y más parejas de coordinación se presenten, es decir, incrementa en función de la complejidad en el sistema. A pesar de que la idea principal en la programación de este algoritmo no fue la implementación de una coordinación en tiempo real, los tiempos de simulación no son demasiado altos, por lo que con algunas mejoras pudiera alcanzarse dicho objetivo.

Agregar grados de libertad a la ecuación de la curva que define la operación de las protecciones de sobrecorriente mejora la coordinación entre las mismas, reduciendo sus tiempos cuando operan como protecciones principales, así como cuando funcionan como respaldos. En promedio permite la coordinación de una mayor cantidad de relevadores con respecto al caso base, permaneciendo este beneficio para corrientes

inferiores a la I_{cMax} . La coordinación de todas las protecciones puede ser satisfecha en diferentes casos, obteniéndose sin embargo tiempos de operación muy elevados; en la función objetivo debe considerar este problema, dando una correcta ponderación a las penalizaciones consideradas, dependiendo de las necesidades del sistema. En el presente trabajo se buscó reducir el promedio en los tiempos de operación, sacrificando la coordinación de algunas protecciones, sin embargo, para otros sistemas en los que la rápida operación no sea tan indispensable, se puede dar mayor peso a la penalización de los relevadores que no coordinan.

La rutina propuesta, referente a monitorear el cambio en la pendiente de la curva de costo de la función objetivo con respecto al número de iteraciones, dio buenos resultados para detener la simulación luego de que no se detectaran reducciones significativas, además de que programar mutaciones masivas brindó mayor diversidad a los cromosomas, buscando así evitar soluciones prematuras.

Es importante identificar a las protecciones que no son capaces de coordinar por este principio de protección y dejarlas fuera del algoritmo, evitando así que agreguen restricciones innecesarias a la función objetivo. La alternativa propuesta, referente a identificar los relevadores problema mientras el algoritmo está funcionando no dio los frutos esperados, sin dejar de ser un caso interesante para su análisis y posible reimplementación.

La correcta selección del nivel de corriente de arranque juega un papel muy importante en la coordinación de protecciones, establecer una corriente común para todos los relevadores puede arrojar mejores resultados, sin embargo, a medida que incrementa la complejidad de los sistemas, esta consideración se aleja cada vez más de la realidad, ocasionando falta de sensibilidad y por consiguiente la incorrecta operación del sistema de protecciones. Establecer corrientes de arranque independientes con base en la corriente de carga que circula entre los relevadores, aunque incrementa los tiempos de operación calculados, arroja resultados más confiables.

Se puede aseverar que la coordinación mejora al realizarla para niveles de carga inferiores a la máxima, dando lugar a diferentes corrientes de arranque. Considerando que la mayor parte del tiempo el sistema opera en condiciones por debajo de la demanda máxima, así como los adelantos en la capacidad computacional de los relevadores, recalcular los ajustes de las protecciones con base en la corriente de carga se convierte en una opción muy atractiva para reducir el tiempo de operación de las mismas.

Abrir el rango de selección de los parámetros considerados como GDL, después de un alto número de iteraciones puede arrojar mejores resultados, sin ser garantía en todos los casos, debido a posibles estancamientos en soluciones mínimas locales. Se concluye que las mejoras obtenidas no justifican el alto tiempo de duración de las simulaciones por lo que, cuando menos para los sistemas utilizados y más complejos, es más conveniente reducir los rangos de selección de los parámetros.

El rango de selección de los parámetros A , B y p que arrojó mejores resultados, tanto para corrientes máximas como para corrientes mínimas, es en el que se utilizan valores cercanos a la curva moderadamente inversa (caso 4.2). Sin embargo, el caso 4.3, cuyo rango de parámetros se define cerca a la curva muy inversa también mejora considerablemente los resultados respecto al caso base. La selección de uno u otro rango dependería de las necesidades del sistema.

El algoritmo fue adaptado para encontrar los ajustes en las protecciones para la alternativa propuesta en la referencia [10], que también obtuvo mejoras respecto al caso base, tanto para la corriente máxima de coordinación como para la mínima. Por su parte, realizar la coordinación de protecciones para más de un punto en la curva, es decir, para más de un nivel de corriente de corto arrojó buenos resultados cuando se consideraron rangos cercanos a la curva moderadamente inversa. Por ser estos dos últimos casos a los que menos tiempo se les dedicó, algunas pruebas, ajustes y posibles mejoras quedaron pendientes como trabajo futuro; sin embargo, gracias a los resultados obtenidos, se considera que ambas alternativas prometen buenos resultados luego de perfeccionar su implementación.

5.2 TRABAJOS FUTUROS

Los algoritmos genéticos presentan mayores facilidades que otros métodos de optimización para programar la coordinación de protecciones, su naturaleza consiste en explorar el área de solución, acercándose más al resultado conforme avanza el número de iteraciones; sin embargo, esta misma impide llegar a los mismos resultados luego de diferentes simulaciones, así como garantizar que el óptimo global sea alcanzado. Una posible implementación futura consiste en utilizar la salida del algoritmo genético como condiciones iniciales para otro método de optimización, permitiendo a este último partir de un resultado más cómodo y cercano al óptimo e hipotéticamente obteniendo así mejores resultados.

Extender el algoritmo para incluir en algunos casos otros principios de protección, sobre todo en relevadores que carecen de sensibilidad al utilizar el principio de sobrecorriente, puede aligerar las restricciones del sistema, alcanzando mayores reducciones en los tiempos de operación.

Perfeccionar la programación del algoritmo, eliminando los ciclos redundantes e innecesarios puede reducir aún más el tiempo de simulación, dando lugar así a un posible análisis y coordinación de protecciones en tiempo real.

Se insiste en posteriormente analizar de nuevo la alternativa de sacar a los relevadores problema mientras la simulación se lleva a cabo, realizando mejoras en el algoritmo para que éste pueda adaptarse a cambios en las restricciones y la topología de la red.

Las mutaciones masivas programadas luego de la detección de poca disminución en la pendiente de la curva de costo dieron buenos resultados, sin embargo éstas podrían ser definidas con base en una función más especializada, pudiendo ser adaptadas a algún algoritmo parecido al de enjambre de partículas u otro que sea capaz de predecir la dirección del mínimo global en el espacio de solución, para así decidir hacia dónde dirigir las mutaciones, en lugar de realizarlas de manera aleatoria.

Los casos 5 y 6 deben ser analizados con más detenimiento, explorando más alternativas que permitan obtener mayores beneficios. Contar con relevadores de respaldo que se adapten a la forma del relevador principal reduciría tiempo y esfuerzo respecto a la operación de los mismos; el mismo caso 5 puede ser adaptado para obtener la coordinación considerando cinco GDL, en lugar de uno solo. Respecto al caso 6, realizar la coordinación de protecciones para más de un punto es algo completamente diferente a lo que se ha venido haciendo con los años; además de realizarla para la corriente de coordinación máxima y mínima, pueden proponerse puntos intermedios e incluso alguna función no lineal.

APÉNDICE A

EJEMPLO DE COORDINACIÓN PARA UN SISTEMA RADIAL

En la figura A.1 se presenta un pequeño sistema radial de tres nodos, dos relevadores, dos cargas y un generador. Para la falla f_2 el relevador 23 debe operar como protección principal, mientras que el relevador 12 debe cumplir como protección de respaldo para la misma y como protección principal para la falla f_1 . En la tabla A.1 se condensan los datos necesarios para llevar a cabo la coordinación de protecciones. Los parámetros de la curva muy inversa (VI) se pueden observar en la tabla 2.1.

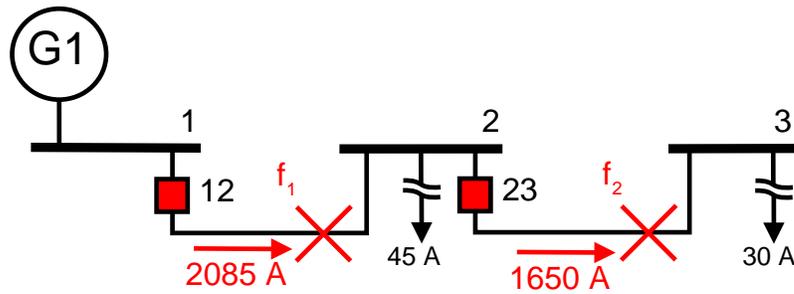


Figura A.1: Sistema radial utilizado para el ejemplo de coordinación.

Tabla A.1: Datos del ejemplo de coordinación de un sistema radial.

I_{f_2}	I_{f_1}	I_{c_3}	I_{c_2}	$dial_{23}$	Curva
1650 A.	2085 A.	30 A.	45 A.	0.5 s.	VI.

Lo primero que se debe realizar es definir la corriente de arranque de los relevadores, la protección utilizará dicho ajuste para discriminar entre condiciones de

falla y operación normal del sistema. Con el objetivo de evitar que la protección opere por carga, la corriente de arranque puede definirse entre 1.4 y 2 veces la corriente de carga máxima, para este ejemplo se considera el límite mínimo:

$$\begin{aligned}
 I_{a23} &= I_{c3} * 1.4, \\
 I_{a23} &= 30 * 1.4, \\
 I_{a23} &= 42A. \\
 I_{a12} &= (I_{c3} + I_{c2}) * 1.4, \\
 I_{a12} &= (30 + 45) * 1.4, \\
 I_{a12} &= 105A.
 \end{aligned}$$

Sustituyendo los datos del problema, así como la constante característica de la curva muy inversa (tabla 2.1) en la ecuación 2.1 se obtiene el tiempo de operación del relevador 23 para la falla f_2 .

$$\begin{aligned}
 t_{23_{principal}} &= \left[\frac{19.61}{\left[\frac{1650}{42} \right]^2 - 1} + 0.491 \right] * 0.5, \\
 t_{23_{principal}} &= 0.2518s.
 \end{aligned}$$

El relevador 12 se ajusta para operar como respaldo del 23 en caso de ser necesario. Se utiliza la ecuación 2.2 para determinar el tiempo de operación del respaldo para la corriente de coordinación:

$$\begin{aligned}
 t_{12_{respaldo}} &= t_{23_{principal}} + CTI, \\
 t_{12_{respaldo}} &= 0.2518s + 0.3s, \\
 t_{12_{respaldo}} &= 0.5518s.
 \end{aligned}$$

A continuación se calcula el dial requerido para que la protección 12 opere como respaldo, aplicando la ecuación 2.3.

$$dial_{12} = \frac{t_{12_{respaldo}}}{\left[\frac{A}{\left[\frac{I_{f23}}{I_{a12}} \right]^p} + B \right]},$$

$$dial_{12} = \frac{0.5518}{\left[\frac{19.61}{\left[\frac{1650}{105} \right]^2 - 1} + 0.491 \right]},$$

$$dial_{12} = 0.9668s.$$

Por último se calcula el tiempo de operación del relevador 12 para la falla f_1 , en la que debe operar como protección principal.

$$t_{12_{principal}} = \left[\frac{19.61}{\left[\frac{2085}{105} \right]^2 - 1} + 0.491 \right] * 0.9668,$$

$$t_{12_{principal}} = 0.5229s.$$

En la figura A.2 se muestran las curvas de tiempo inverso para el presente ejemplo, fueron obtenidas calculando el tiempo de operación de cada relevador para diferentes magnitudes de corriente de falla; vale la pena resaltar la importancia de la correcta selección y/o determinación de los demás parámetros (corriente de arranque y/o tipo de curva) ya que éstos permanecen constantes.

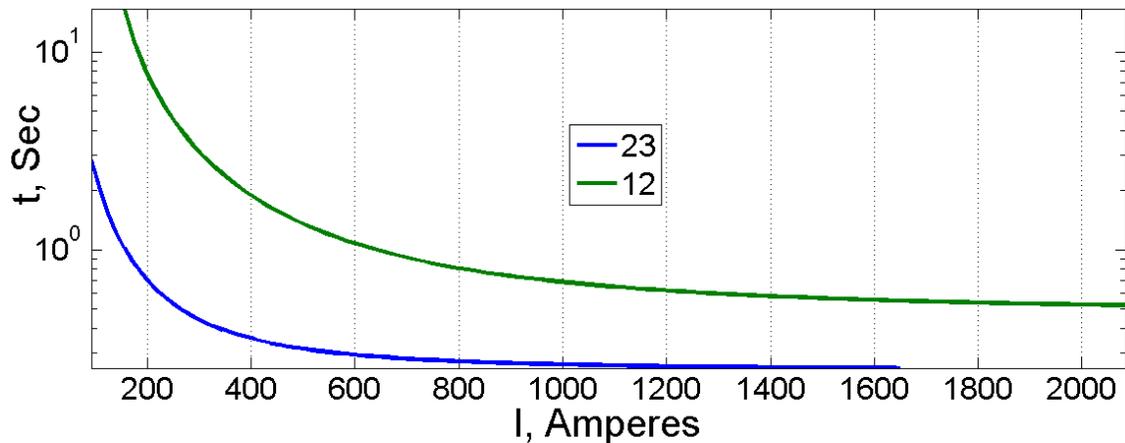


Figura A.2: Curvas de tiempo inverso para los relevadores 12 y 23.

Se puede observar que para diferentes magnitudes de corriente el relevador 12 se ajusta correctamente para operar como respaldo del relevador 23. Sin embargo no se garantiza que el CTI se cumpla para toda la curva ya que el procedimiento se realiza para un solo punto de la misma, que es la corriente de coordinación.

Para determinar la corriente de coordinación se realiza un análisis de corto circuito; por lo general se utiliza una falla trifásica con extremo abierto, ya que es el escenario que arroja la corriente de mayor magnitud, además de que supone que uno de los relevadores operó correctamente, lo cual es más probable. En la misma figura B.1 se muestran las corrientes vistas por los relevadores 51, 25 y 45 para la falla f_1 ; como se mencionó anteriormente, debido al efecto de fuentes intermedias los relevadores de respaldo no ven la misma magnitud de falla, por lo que la corriente de coordinación se define como el máximo valor visto por los relevadores 25 y 45, respectivamente. Los datos necesarios para llevar a cabo la coordinación se muestran en la tabla B.1

Tabla B.1: Datos del ejemplo de coordinación de un sistema anillado.

$I_{f_{51}}$	1842 A.
$I_{f_{25}}$	599 A.
$I_{f_{45}}$	954 A.
$I_{c_{51}}$	298 A.
$I_{c_{25}}$	167 A.
$I_{c_{45}}$	260 A.
$dial_{51}$	0.5 s.
$Curva$	MI.

En primer lugar se establece que la corriente de arranque de los relevadores será de 1.4 veces la I_c , por lo tanto:

$$I_{a_{51}} = 298A * 1.4,$$

$$I_{a_{51}} = 417.2A.$$

$$I_{a_{25}} = 167A * 1.4,$$

$$I_{a_{25}} = 237.8A.$$

$$I_{a_{45}} = 260A * 1.4,$$

$$I_{a_{45}} = 364A.$$

Sustituyendo los datos del problema (tabla B.1) y las constantes de la curva MI (tabla 2.1) en la ecuación 2.1 se obtiene el tiempo de operación del relevador 51 para la corriente principal, así como para las corrientes de coordinación:

$$\begin{aligned}
 t_{51_{principal}} &= \left[\frac{0.0515}{\left[\frac{1842}{417.2} \right]^{0.02} - 1} + 0.114 \right] * 0.5, \\
 t_{51_{principal}} &= 0.91117s. \\
 t_{51_{25}} &= \left[\frac{0.0515}{\left[\frac{599}{417.2} \right]^{0.02} - 1} + 0.114 \right] * 0.5, \\
 t_{51_{25}} &= 3.6038s. \\
 t_{51_{45}} &= \left[\frac{0.0515}{\left[\frac{954}{417.2} \right]^{0.02} - 1} + 0.114 \right] * 0.5, \\
 t_{51_{45}} &= 1.6008s.
 \end{aligned}$$

Se utiliza la ecuación 2.2 para determinar cuál debe ser el tiempo de operación de los relevadores 25 y 45 para respaldar al relevador 51.

$$\begin{aligned}
 t_{25_{respaldo}} &= t_{51_{25}} + CTI, \\
 t_{25_{respaldo}} &= 3.6038s + 0.3s, \\
 t_{25_{respaldo}} &= 3.9038s. \\
 t_{45_{respaldo}} &= t_{51_{45}} + CTI, \\
 t_{45_{respaldo}} &= 1.9008s.
 \end{aligned}$$

A continuación se calcula el *dial* para cada protección, sustituyendo la corriente de coordinación, corriente de arranque y constantes de la curva en la ecuación 2.3.

$$\begin{aligned}
 dial_{25} &= \frac{0.5518}{\left[\frac{0.0515}{\left[\frac{599}{237.8} \right]^{0.02} - 1} + 0.114 \right]}, \\
 dial_{25} &= 1.3575s. \\
 dial_{45} &= \frac{0.5518}{\left[\frac{0.0515}{\left[\frac{954}{364} \right]^{0.02} - 1} + 0.114 \right]}, \\
 dial_{45} &= 1.414s.
 \end{aligned}$$

Ahora se debe calcular el tiempo de operación de los relevadores 25 y 45 para la falla en la que se desempeñen como protecciones principales, acto seguido se vuelve a realizar el mismo procedimiento para ajustar los relevadores que los respaldarán. Los mayores problemas se presentan al cerrar un anillo, ya que el relevador que se utilizó en un principio (en este caso el 51) debe operar como respaldo de los relevadores que lo cierran. Mientras más grande sea el sistema, la coordinación se vuelve más complicada y laboriosa, siendo en diversas ocasiones imposible, por lo que se debe recurrir a otro principio de protección.

Del presente análisis se puede resaltar que los tiempos de operación de la protección principal incluso para una falla máxima son altos, por consiguiente los respaldos operarán con un retardo mayor. Además es un procedimiento muy lento en el que pueden pasar varios días para realizar la coordinación, sin garantizar que ésta sea factible. Es claro que se deben de buscar alternativas para incrementar la sensibilidad de las protecciones ante condiciones de falla, así como reducir los tiempos de operación y tiempos de simulación. Debido a esta clase de problemas, trabajos recientes se esfuerzan encontrar los ajustes óptimos de los relevadores, viendo el problema de coordinación de protecciones como uno de optimización, facilitando de esta manera el trabajo del ingeniero de protecciones.

BIBLIOGRAFÍA

- [1] «Matlab, The Language of Technical Computing», URL <http://www.mathworks.com/products/matlab/>.
- [2] «PowerWorld Corporation, The Visual Approach to Analyzing Power Systems», URL <http://powerworld.com/>.
- [3] «IEEE Standard Inverse-Time Characteristic Equations for Overcurrent Relays», IEEE *Std C37.112-1996*, pág. i, 1997.
- [4] «IEEE 100, The Authoritative Dictionary of IEEE Standards Terms Seventh Edition», IEEE *Std 100-2000*, 2000.
- [5] «IEEE Standard for Relays and Relay Systems Associated With Electric Power Apparatus», IEEE *Std C37.90-2005 (Revision of IEEE Std C37.90-1989)*, págs. 1–19, 2006.
- [6] AFFENZELLER, M., S. WINKLER, S. WAGNER y A. BEHAM, *Genetic Algorithms and Genetic Programming: Modern Concepts and Practical Applications*, primera edición, Chapman & Hall/CRC, 2009.
- [7] BEDEKAR, P. y S. BHIDE, «Optimum Coordination of Directional Overcurrent Relays Using the Hybrid GA-NLP Approach», *Power Delivery, IEEE Transactions on*, **26**(1), págs. 109–119, jan. 2011.
- [8] BENMOUYAL, G., M. MEISINGER, J. BURNWORTH, W. ELMORE, K. FREIRICH, P. KOTOS, P. LEBLANC, P. LERLEY, J. MCCONNELL, J. MIZENER, J. PINTO DE SA, R. RAMASWAMI, M. SACHDEV, W. STRANG,

- J. WALDRON, S. WATANSIROCH y S. ZOCHOLL, «IEEE standard inverse-time characteristic equations for overcurrent relays», *Power Delivery, IEEE Transactions on*, **14**(3), págs. 868 –872, jul 1999.
- [9] BLACKBURN, J. L. y T. J. DOMIN, *Protective Relaying: Principles and Applications*, tercera edición, CRS Press, 2006.
- [10] CONDE, A. y E. VAZQUEZ, «Application of a proposed overcurrent relay in radial distribution networks», *Electric Power Systems Research*, **81**(2), págs. 570 – 579, 2011.
- [11] ELMORE, W. A., *Protective Relaying Theory and Applications*, segunda edición, Marcel Dekker, 2004.
- [12] FERRER, H. A., *Protección de Sistemas Eléctricos de Potencia*, primera edición, FIME/UANL, 1991.
- [13] GEN, M., R. CHENG y L. LIN, *Network Models and Optimization: Multiobjective Genetic Algorithm Approach (Decision Engineering)*, primera edición, Springer, 2008.
- [14] GOLDBERG, D. E., *Genetic Algorithms in Search, Optimization, and Machine Learning*, Addison-Wesley Professional, January 1989.
- [15] HAUPT, R. L. y S. E. HAUPT, *Practical Genetic Algorithms*, segunda edición, Wiley-Interscience, 2004.
- [16] HOLLAND, J. H., *Adaptation in Natural and Artificial Systems*, segunda edición, MIT Press, Cambridge, MA, USA, 1992.
- [17] KAMANGAR, S. S. H., H. A. ABYANEH, F. RAZAVI y R. M. CHABANLOO, «Optimal Combined Overcurrent and Distance Relays Coordination Using a New Genetic Algorithm Method», *International Journal of Innovations In Energy Systems and Power*, **5**(1), págs. 17 – 23, apr. 2010.

-
- [18] LUNDQVIST, B., «100 years of relay protection, the Swedish ABB relay histor», *ABB Automation Products, Substation Automation Divisio*, 2005.
- [19] MASON, C. R., *The Art and Science of Protective Relaying*, primera edición, Wiley, Michigan University, 1956.
- [20] MELANIE, M., *An Introduction to Genetic Algorithms*, quinta edición, MIT Press, 1999.
- [21] PRICE, K. V. y R. M. S. ANDJOUNI A LAMPINEN, *Differential Evolution, A Practical Approach to Global Optimization*, primera edición, Springer, 2005.
- [22] ALSTOM (FIRM), *Network Protection and Automation Guide*, primera edición, ALSTOM, 2002.

ÍNDICE ALFABÉTICO

- Adaptabilidad, 17
- Algoritmos genéticos, 15
- Area de selección, 19
- Caso Base, 39
- Coordinación de protecciones, 9
- Corriente de arranque, 6
- Corriente de carga, 6
- Corriente de coordinación, 9
- Corriente de falla, 6
- Cromosoma, 15
- CTI, 10
- Curva de tiempo inverso, 6
- Curva Extremadamente Inversa (EI), 7
- Curva Moderadamente inversa (MI), 7
- Curva Muy Inversa (VI), 7
- Curvas convencionales, 7
- Curvas no convencionales, 27
- Error de Intervalo de Tiempo de Coordinación, 30
- Flexibilidad, 17
- Formulación matemática, 14
- Función de aptitud, 13
- Función de costo, 13
- Función de error, 13
- Función objetivo, 13
- Gen, 15
- Generación, 16
- Grado de libertad, 26
- IEEE, 1
- Mutación, 16
- Operadores genéticos, 16
- Optimización, 12
- Optimización dinámica, 14
- Optimización estática, 14
- Optimización multidimensional, 14
- Optimización restringida, 14
- Optimización unidimensional, 14
- Optimo global, 13
- Optimo local, 13
- Padres Elite, 36
- Palanca de tiempo, 7
- Población, 16
- Porcentaje por evaluación, 19
- Porcentaje por ranking, 20
- Principios de protección, 2

- Protección de respaldo, 10
- Protección de sobrecorriente, 6
- Protección principal, 10
- Prueba y error, 14
- Punto de cruce, 16

- Ranking, 20
- Relevador, 1
- Relevador de protección, 2
- Relevador direccional, 8
- Reproducción, 16
- Robustez, 17

- Selectividad relativa, 6
- Sencillez, 17
- Sistema de protecciones, 2

- Variables continuas, 15
- Variables discretas, 15

FICHA AUTOBIOGRÁFICA

Ing. Carlos Alberto Castillo Salazar

Candidato para el grado de Maestro en Ciencias de la Ingeniería Eléctrica
con especialidad en Sistemas Eléctricos de Potencia

Universidad Autónoma de Nuevo León

Facultad de Ingeniería Mecánica y Eléctrica

Tesis:

COORDINACIÓN DE RELEVADORES DE
SOBRECORRIENTE MEDIANTE ALGORITMOS DE
OPTIMIZACIÓN, UTILIZANDO CURVAS DE TIEMPO
NO CONVENCIONALES

Nací el 19 de octubre de 1987 en la ciudad de Monterrey, Nuevo León, México. Gracias a Dios, soy el cuarto hijo de Luis Javier Castillo Granados y Rosa Laura Salazar Macías (†), e hijo adoptivo de Alma Ofelia Chávez Chávez. Obtuve el título de Ingeniero Mecánico Electricista en octubre de 2009, luego de defender mi trabajo de tesis titulado ‘Optimización de costos de reemplazo en redes sensoras inalámbricas’ bajo la asesoría de la Dra. Elisa Schaeffer. Iniciando el año 2010 trabajé en la industria hasta ingresar en agosto del mismo año a realizar estudios de posgrado. Aprobé las materias cursadas, desde entonces a la fecha, asesorado por el Dr. Arturo Conde Enríquez, continué con la realización de mi trabajo de tesis con opción al grado de Maestro en Ciencias de la Ingeniería Eléctrica con orientación en Sistemas Eléctricos de Potencia.