

Desarrollo del algoritmo genético heurístico para la coordinación de protecciones**Development of the genetic heuristic algorithm for the coordination of protections**

SHIH, Meng Yen†*, LEZAMA-ZÁRRAGA, Francisco Román, CHAN-GONZALEZ, Jorge de Jesús y CHE-PUCH, José Gadiel

Universidad Autónoma de Campeche, Campus V, Predio s/n por Av. Humberto Lanz Cardenas y Unidad Habitacional Ecológica Ambiental, Col. Ex-Hacienda Kala, CP 24085, San Francisco de Campeche, Cam., México.

ID 1^{er} Autor: *Meng Yen, Shih* / **ORC ID:** 0000-0001-7475-6458, **CVU CONACYT ID:** 408617

ID 1^{er} Coautor: *Francisco Román, Lezama-Zárraga* / **ORC ID:** 0000-0003-3397-7881, **Researcher ID Thomson:** U-1229-2018, **CVU CONACYT ID:** 205493

ID 2^{do} Coautor: *Jorge de Jesus, Chan-Gonzalez* / **ORC ID:** 0000-0002-8638-1646

ID 3^{er} Coautor: *José Gadiel, Che-Puch* / **ORC ID:** 0000-0002-5779-9533

DOI: 10.35429/JEE.2020.12.4.1.9

Recibido Enero 10, 2020; Aceptado Junio 30, 2020

Resumen

La coordinación de relevadores de sobrecorriente es una tarea fácil cuando se trata de una línea de distribución radial. Sin embargo, cuando se complementa con unidad direccional para proteger a redes malladas, el problema se vuelve muy complejo. Este es debido a que el dispositivo de protección tiene que ofrecer operación primaria y respaldo para la misma línea o líneas múltiples utilizando el mismo ajuste de protección. Además, considerando dos parámetros como son el ajuste de la palanca de tiempo dial y ajuste de la corriente de arranque, hace que el problema de coordinación sea aún más complejo para ser realizado de forma manual. Por lo anteriormente expuesto, en este artículo, el estudio de la coordinación de protección es formulado como un problema de optimización para ser solucionado usando Algoritmo Genético heurístico. Este no solamente ahorra tiempo para el ingeniero de protección, también transfiere el burden a la computadora usando inteligencia artificial y asegura que los resultados sean más cercanos a lo óptimo.

Algoritmo genético, Optimización heurístico, Coordinación de relevador de sobre corriente direccional

Abstract

The coordination of overcurrent relays is an easy task when dealing with a radial distribution line. However, when directional units are in place to protect meshed networks, the problem becomes very complex. This is because the protection device must offer primary and backup operation for the same or multiple lines using the same protection setting. Moreover, considering two parameters namely the time dial setting and the current pickup setting make the coordination problem even more complex to be achieved manually. Therefore, in this article, the protection coordination study is formulated as an optimization problem to be solved using a heuristic Genetic Algorithm. This not only saves time for the protection engineer; it also transfers the burden to a computer using artificial intelligence and guarantee that the results are close to optimal

Genetic algorithm, Heuristic optimization, Directional overcurrent relay coordination

Citación: SHIH, Meng Yen, LEZAMA-ZÁRRAGA, Francisco Román, CHAN-GONZALEZ, Jorge de Jesús y CHE-PUCH, José Gadiel. Desarrollo del algoritmo genético heurístico para la coordinación de protecciones. Revista de Ingeniería Eléctrica. 2020. 4-12:1-9.

*Correspondencia al Autor (Correo Electrónico: smengyen@uacam.mx)

† Investigador contribuyendo como primer autor.

Introducción

Los dispositivos de protección son ampliamente utilizados en los diferentes niveles de voltajes en el sistema eléctrico de potencia: generación, transmisión, subtransmisión y distribución. Tienen como objetivo detectar y aislar la sección de la red eléctrica dañada, causada por diversos fenómenos tales como: relámpagos, vientos, nieve, sismos, explosiones, contactos por animales, contaminaciones, operaciones erróneas humanas, arcos eléctricos (Blackburn & Domin 2006, sección 1.1), evitando accidentes mayores y pérdidas de los equipos primarios costosos. Estos dispositivos necesitan ser ajustados para ofrecer protección primaria y respaldo para las líneas o elementos eléctricos (Gers & Holmes 2011, p.5-6).

El Relevador de Sobre Corriente (OCR) es un tipo de protección ampliamente usado en las redes de subtransmisión y distribución debido a su costo competitivo. Las corrientes de carga y de falla pueden circular hacia dentro o afuera de la zona de protección del relevador de sobre corriente dependiendo de las condiciones operativas y/o ubicación de fallas.

Por lo tanto, los Relevadores de Sobre Corriente Direccional (DOCR) son utilizados para discriminar si la falla se ubica dentro o afuera de la zona de protección (Gers & Holmes 2011, p.125).

El propósito de coordinar los DOCRs es encontrar ajustes que minimicen el tiempo de operación para fallas ubicados en la zona de protección y al mismo tiempo proporcionen una operación demorada con tiempo preestablecido como función respaldo para relevadores que se encuentra en zonas adyacentes (Blackburn & Domin 2006, sección 1.1).

Justificación

La coordinación de OCRs en una línea de distribución radial es bastante sencilla y puede realizarse en forma manual. Sin embargo, para redes malladas se requiere utilizar DOCR que puede discriminar la ubicación de la falla. Este incrementa la complejidad del trabajo de coordinación a menudo de que la red eléctrica es más grande y mallada (Gers & Holmes 2011, p.96).

Si se coordinan los DOCRs para una red mallada de forma manual, se puede ser muy complicado y tiempo consumido (Gers & Holmes 2011, p.96-97).

El realizar la coordinación de forma manual puede demorar días y en el peor caso no llegar al conjunto de ajustes que satisface todas las restricciones de cada dispositivo de protección para garantizar la coordinación entre sí. Dicho de otra manera, algunas líneas no dispondrán de la función de protección de respaldo de DOCRs. Por lo tanto, se desea desarrollar e implementar un Algoritmo Genético (GA) en Matlab para llevar a cabo el trabajo de alta complejidad.

Como han propuesto Urdaneta, et al (1996), ellos resolvieron el problema de coordinación de DOCRs usando programación lineal (p.1); Noghabi, et al (2010) proponen resolver el problema de coordinación de DOCRs empleando programación lineal considerando topologías múltiples (p.1); Sueiro, et al (2012) proponen el uso de la combinación de programación lineal con algoritmo evolutivo para el problema de coordinación (p.1); Amrae (2012) propone la implementación del algoritmo buscador para la optimización de los DOCRs (p.1); y Singh, et al (2013) proponen la coordinación óptima de DOCRs empleando la optimización basado en enseñanza y aprendizaje (p.1).

Los diferentes investigadores aspiran a aprovechar las capacidades de las computadoras para solucionar el problema de coordinación de protecciones.

Objetivo

Desarrollar e implementar un método heurístico GA para solucionar el problema de coordinación de DOCRs.

Hipótesis

Si se logra programar los códigos del método heurístico GA para solucionar el problema de coordinación de DOCRs en redes mallados, se espera que se puedan obtener mejores resultados, con cero violaciones de restricciones y en menos tiempo con respecto al que se emplea en la industria en forma manual o apoyado por software.

Modelado matemático del relevador de sobre corriente direccional

Los DOCRs funcionan de acuerdo con las curvas características de tiempo inverso. Las curvas de tiempo inverso operan en menos tiempo mientras que la magnitud de falla incrementa y operan con mayor tiempo cuando la magnitud de falla decreta. La ecuación 1 presenta el modelado de DOCR de tiempo inverso según el estándar IEEE C37.112-1996.

$$t = \left[\frac{A}{\left(\frac{I_{sc^{3\phi max}}}{I_p} \right)^n - 1} + B \right] * dial \quad (1)$$

Donde t es el tiempo de operación del relevador, $I_{sc^{3\phi max}}$ es la corriente de falla trifásica máxima, I_p es la corriente de arranque del relevador normalmente ajustado entre 1.4 hasta 2 veces la corriente de carga máxima, $dial$ es el ajuste de palanca de tiempo o familia de curvas, y A, B, n son los constantes del estándar IEEE.

Los constantes de IEEE de los relevadores están presentado en la Tabla 1. Estas son curvas convencionales: moderadamente inversa (MI), muy inversa (VI) y extremadamente inversa (EI).

Norma	Curva	A	B	n
IEEE	MI	0.0515	0.114	0.02
	VI	19.61	0.491	2
	EI	28.2	0.1267	2

Tabla 1 Constantes del Estándar IEEE

Fuente: IEEE Standard Inverse-Time Characteristic Equations for Overcurrent Relays, IEEE std C37.112-1996

Metodología de optimización del problema de coordinación usando algoritmo genético

El GA es una parte de la computación evolutiva; es un algoritmo de búsqueda adaptativa heurístico basado en ideas evolutivas de selección natural de genes.

El GA fue desarrollado por John Holland en 1975 que es una rama del cómputo evolutivo. Es una técnica de inteligencia artificial imitando y basando en la idea de “Selección Natural de los más Aptos” del Darwin. Tiene como objetivo de resolver problemas complejos que requiere optimización. Las etapas principales de GA se ilustran en la Figura 1.

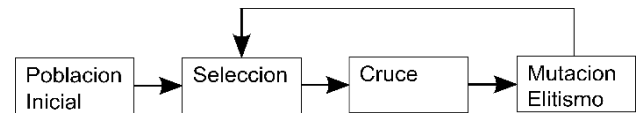


Figura 1 Las etapas principales del GA
Fuente: Elaboración propia

La población inicial se presenta en la ecuación 2 y sigue la regla de la ecuación 3:

$$P = \begin{bmatrix} dial_{(1,1)} & \dots & dial_{(1, NR)} & Ip_{(1, NR+1)} & \dots & Ip_{(1, NR+2)} \\ \vdots & \ddots & \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ dial_{(NC,1)} & \dots & dial_{(NC, NR)} & Ip_{(NC, NR+1)} & \dots & Ip_{(NC, NR+2)} \end{bmatrix} \quad (2)$$

$$P(p, q) = L_{inferior} + (L_{superior} - L_{inferior}) * P(p, q)_{rand} \quad (3)$$

Donde NR es el número de relevadores, NC es el número de cromosomas, $L_{inferior}$ es el límite inferior, $L_{superior}$ es el límite superior y $P(p, q)_{rand}$ es un número aleatoriamente generado.

En este artículo, la selección se basa principalmente en la rueda de ruleta donde se asigna una probabilidad a cada cromosoma según su aptitud. Los cromosomas con mejores aptitudes tendrán mayor probabilidad a ser elegido para reproducirse posteriormente. Este se presenta en ecuación 4:

$$p(x) = \frac{1}{\frac{f(x)}{\sum_1^{NC} f(x)}} \quad (4)$$

Donde $p(x)$ es la probabilidad del cromosoma “x”, $f(x)$ es la aptitud de cromosoma “x” y $\sum_1^{NC} f(x)$ es la sumatoria total de todas las aptitudes de la población.

La reproducción o el cruce en este artículo se basa en la recombinación aritmética simple que se presenta en la ecuación 5. Sólo los cromosomas padres seleccionados según la probabilidad, tendrán derecho a realizar el esquema de reproducción de algunas partes de sus genes.

$$P(x, y)_{G+1} = \frac{(P(x, y)_G + P(z, y)_G)}{2} \quad (5)$$

Donde $P(x,y)_{G+1}$ es el gen “y” del cromosoma “x” de la población nueva en formación, $P(x,y)_G$ es el gen “y” del cromosoma “x” de la población vieja y $P(z,y)_G$ es el gen “y” del cromosoma “z” de la población vieja.

La mutación de genes se realiza con el fin de proveer diversidad a la población actual y explorar diferentes posibilidades. Sin embargo, el elitismo ha sido empleado simultáneamente con la mutación en este artículo debido a que se observa que se obtiene mejores resultados. Éste se ejecuta una sola vez cuando se contabiliza que no se mejoran los resultados por ninguna vez en 10 generaciones consecutivos y se presenta en la ecuación 6:

$$P(x)_{G+1} = \begin{cases} P(U\%)_{G+1} = (B_C)_G \\ P(V\%)_{G+1} = \text{rand}(P(\text{lower}, \text{upper})) \end{cases} \quad (6)$$

Donde U y V son porcentajes que afecta a la población y $(B_C)_G$ es el mejor cromosoma de la presente población. El porcentaje de U realiza el elitismo y el porcentaje de V realiza la mutación. Es importante señalar que los cromosomas de elitismo también son candidatos para ser mutados según el porcentaje V .

En este trabajo, las generaciones de la población evolucionan manteniendo su tamaño original sin incrementarlo. La función de aptitud para evaluar si el cromosoma es buen o mal candidato para ser elegido padre y ejecutar la reproducción está dado en la ecuación 7. La función de aptitud propuesta consta de la sumatoria del número de violaciones de restricciones, los tiempos de operación primario y respaldo y los errores de Intervalo de Tiempo de Coordinación (CTI). Esta función de aptitud es la clave para determinar y comparar qué tan bueno es un cromosoma con respecto a los otros.

$$f(x) = \left(\frac{NV}{NCP}\right) + \left(\frac{\sum_{a=1}^{NCP} t_{pa}}{NCP}\right) * \alpha + \left(\frac{\sum_{b=1}^{NCP} t_{bb}}{NCP}\right) * \beta + \left(\sum_{L=1}^{NCP} E_{CTI_L}\right) * \delta \quad (7)$$

Donde α , β y δ son factores que incrementan o decremantan la influencia de cada subfunción de aptitud. NV es el número de violación de restricción de coordinación, NCP es el número de parejas de coordinación, t_{pa} es el tiempo de operación primaria del relevador a, t_{bb} es el tiempo de operación respaldo del relevador b, y E_{CTI_L} es el error de CTI de la L-ésima pareja de coordinación.

La coordinación de DOCRs se establece cuando se cumple el CTI entre el relevador primario y el respaldo. Se ilustra la idea de protección primario y respaldo en la Figura 2.

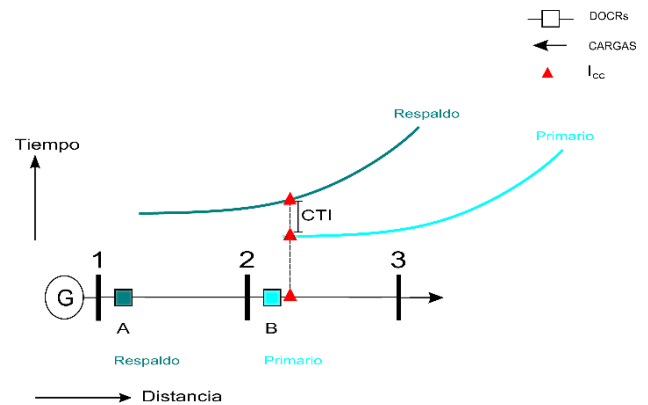


Figura 2 Protección primaria y respaldo en una línea radial de una sola fuente

Fuente: Elaboración propia

Se observa en la Figura 2 que el relevador B ofrece una protección primaria para la falla que se ubica entre los buses 2 y 3. Mientras el relevador A ofrece protección respaldo para la misma falla que se ubica entre los buses 2 y 3. Sin embargo, para evitar disparos simultáneos, el relevador de respaldo A está coordinado con el B de tal forma que se espera el CTI antes de entrar en operación. Esta coordinación de CTI tiene la intención de dejar al relevador primario B intentar liberar la falla y cuando por alguna razón no logra liberar la falla, el relevador de respaldo A entra en acción para liberar dicha falla después de esperar el CTI.

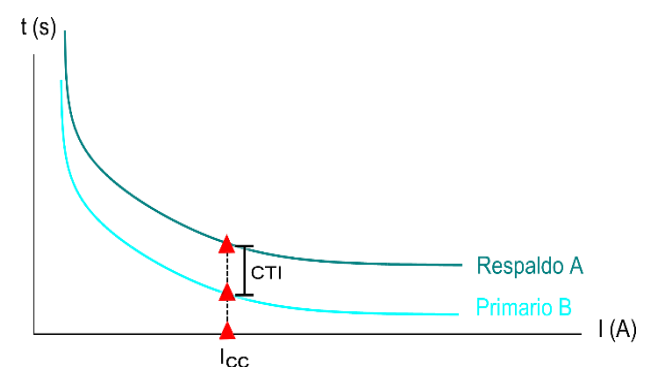


Figura 3 Concepto de protección primaria y respaldo con las curvas de tiempo inverso

Fuente: Elaboración propia

En la Figura 3 se presentan las curvas de tiempo inverso de los relevadores primario y respaldo. En un plano tiempo-corriente, el eje “y” representa el tiempo de operación en segundos mientras el eje “x” representa el amperio de corrientes de falla.

Esta curva normalmente se representa en hojas logarítmicas. La esencia de analizar la Figura 3 es entender que para alguna falla que se origine entre los buses 2 y 3 de la Figura 2, el relevador primario B debe ser el primero en entrar en operación. Sin embargo, cuando la falla persiste sin ser liberado por el relevador primario B, entonces el relevador respaldo A entra en operación para liberar la falla después del tiempo predefinido CTI. En este artículo, el CTI seleccionado es de 0.3 segundos.

Este concepto de coordinación mediante el uso de CTI es una restricción matemática que se puede ser presentado a través de la ecuación 8:

$$CTI_{real} = t_b - t_p \tag{8}$$

Donde t_b es el tiempo de operación del relevador de respaldo y t_p es el tiempo de operación del relevador primario. Pero para el proceso de optimización, se anexa la ecuación 9 como un indicador del error del CTI, la cual se utiliza en la evaluación de la función de aptitud.

$$CTI_{error} = CTI_{real} - CTI_{preestablecido} \tag{9}$$

Los límites físicos inferiores y superiores de los ajustes de los DOCRs también se representan como restricciones de optimización en ecuaciones 10 y 11:

$$dial_{min} \leq dial \leq dial_{max} \tag{10}$$

$$I_{pmin} \leq I_p \leq \min(I_{scmin}, I_{pmax}) \tag{11}$$

Donde $dial$ es el ajuste del DOCR entre el intervalo máximo $dial_{max}$ y mínimo $dial_{min}$. I_p es la corriente de arranque en los intervalos máximos I_{pmax} y mínimos I_{pmin} e I_{scmin} es la corriente de falla mínima.

El diagrama de flujo para la coordinación de DOCRs usando GA se presenta en la Figura 4.

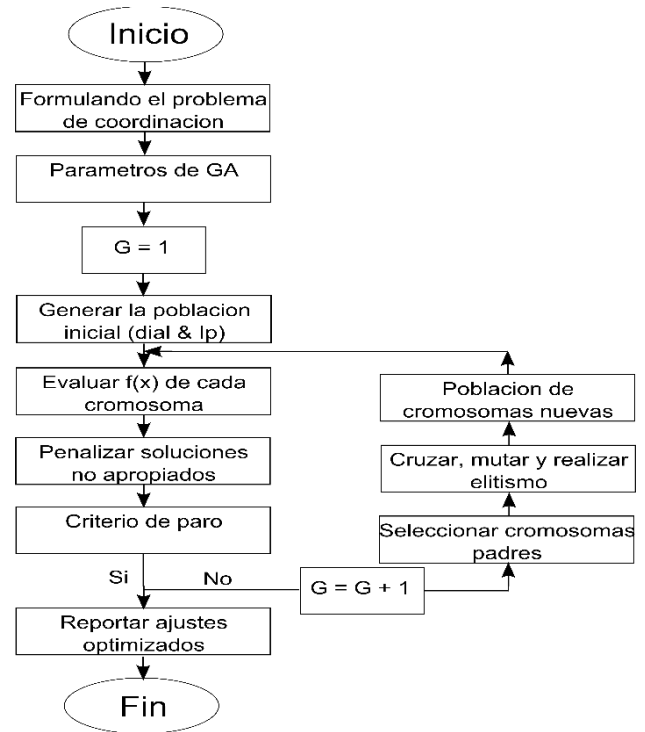


Figura 4 Diagrama de flujo de coordinación de DOCRs usando GA

Fuente: Elaboración propia

Los pasos para seguir para implementar un GA para la coordinación de DOCRs se presenta a continuación:

- Generar aleatoriamente la población inicial de “NC” cromosomas donde cada gen es una posible solución al problema.
- Calcular el tiempo de operación primario y respaldo de cada relevador de acuerdo con cada cromosoma.
- Evaluar la función de aptitud $f(x)$ de cada cromosoma “x” en la población.
- Crear una nueva población en cada iteración/generación:
 - Selección: elegir cromosomas padres de la población de acuerdo con su aptitud a través de la rueda de ruleta, rangos y elitismo.
 - Reproducción: usar probabilidad de cruce para formar cromosomas de hijos nuevos. Realizar cruce no-uniforme.
 - Mutación: usar un porcentaje de mutación para mutar genes de los cromosomas.

- Posición: colocar los resultados de reproducción, mutación y elitismo en la población nueva manteniendo el tamaño de población original.
- Ejecutar el algoritmo de nuevo usando la población nueva.
- Terminar el algoritmo si se satisface el criterio de paro. De lo contrario, ejecutar todos los pasos desde 2 a 5 hasta satisfacer el criterio de paro. El único criterio de paro en este estudio es el llegar a las dos mil iteraciones.

Datos de simulación y del sistema mallado

Se implementa el GA en el sistema mallado de 6 buses. Este sistema consta de 10 DOCRs de fase y 16 parejas de coordinación. Se presenta el sistema en la Figura 5.

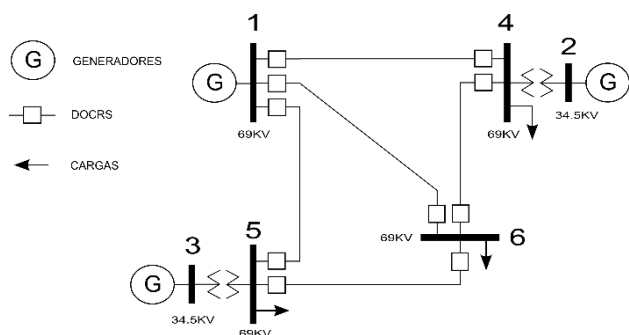


Figura 5 El sistema de 6 buses mallado

Fuente: Hadi Saadat, *Power system analysis*, McGraw-Hill, ISBN 0-07-561634-3, 1999.

Los nombres de los relevadores son asignados como una cadena de números de dos dígitos formados de tal forma que revela su ubicación.

Como por ejemplo el DOCR que está conectado en el bus 1 viendo hacia bus 4 se le asigna el nombre de [1 4].

El DOCR que está conectado en el bus 5 viendo hacia bus 1 se le asigna el nombre de [5 1] y así sucesivamente.

Los parámetros de líneas, resistencias, reactancias y admitancias en derivación se presentan en la Tabla 2 como R, X y 1/2B, respectivamente.

Bus	Bus	R	X	1/2 B
1	4	0.035	0.225	0.0065
1	5	0.025	0.105	0.0045
1	6	0.040	0.215	0.0055
2	4	0.000	0.035	0.0000
3	5	0.000	0.042	0.0000
4	6	0.028	0.125	0.0035
5	6	0.026	0.175	0.0300

Tabla 2 Parámetros de las líneas

Fuente: Hadi Saadat, *Power system analysis*, McGraw-Hill, ISBN 0-07-561634-3, 1999

Los parámetros de los generadores y las cargas se presentan en la Tabla 3. Se modificó levemente las cargas y generación con el fin de adecuar más a nivel de subtransmisión donde se emplea los DOCRs.

Bus	X'd	V	Generación		Carga		
			MW	Limites Mvar	MW	Mvar	
				Min	Max		
1	0.20	1.060					
2	0.15	1.040	50	0	40		
3	0.25	1.030	30	0	20		
4						100	70
5						30	5
6						20	5

Tabla 3 Parámetros de los generadores y las cargas levemente modificados

Fuente: Hadi Saadat, *Power system analysis*, McGraw-Hill, ISBN 0-07-561634-3, 1999

Los parámetros para ejecutar la optimización de coordinación de protecciones empleando GA se presentan en la Tabla 4.

Parámetros	GA
CTI	0.3
dial	[0.5:2.0]
Ip	[1.4:1.6]*Icarga
α, β, δ	2, 1, 2
Población/cromosomas	100
Iteración/generaciones	2,000

Tabla 4 Parámetros de optimización

Fuente: Elaboración propia

Resultados

En la Tabla 5, se presenta los tiempos primarios, respaldos, CTI, las corrientes de falla primaria y respaldo, y las parejas de coordinación de DOCRs.

Primario	Respaldo	GA			Primario Icc(A)	Respaldo Icc(A)
		tp(s)	tb(s)	CTI(s)		
4 6	1 4	0.59	1.47	0.88	7493	2338
1 5	4 1	0.90	2.15	1.25	7676	1900
1 6	4 1	0.52	2.10	1.59	8572	1921
5 6	1 5	0.55	1.08	0.52	6554	3676
1 4	5 1	0.42	1.52	1.10	7955	2363
1 6	5 1	0.52	1.45	0.93	8572	2508
6 4	1 6	0.95	1.30	0.35	4370	2127
6 5	1 6	0.75	1.22	0.47	5366	2231
1 4	6 1	0.42	2.53	2.11	7955	1451
1 5	6 1	0.90	2.06	1.17	7676	1633
6 1	4 6	0.62	1.17	0.55	5620	3186
6 5	4 6	0.75	1.21	0.45	5366	3104
4 1	6 4	0.43	1.96	1.54	7590	2433
6 1	5 6	0.62	1.14	0.52	5620	2405
6 4	5 6	0.95	1.26	0.31	4370	2216
5 1	6 5	1.04	1.35	0.32	5291	2413
Promedio		0.68	1.56	0.88	--	--

Tabla 5 Tiempos de operación primario, respaldo, CTI y las corrientes de falla de las parejas de coordinación
Fuente: Elaboración propia

Se observa que los tiempos primarios y respaldos son muy aceptables y el los CTIs revela que todas las parejas de protección están coordinadas ya que no se presenta ninguna violación de restricciones. El promedio del tiempo primario, respaldo y CTI del sistema de 6 buses en una corrida de simulación son de: 0.68, 1.56, 0.88 segundos respectivamente. También se presenta a continuación, en la Tabla 6, los ajustes de los DOCRs optimizados de la misma corrida de simulación. Se observa que el GA intenta satisfacer la coordinación y las restricciones a través de encontrar ajustes del parámetro dial mínimos. El uso de parámetro dial menores conlleva a obtener tiempos de operación más rápidos. De esta forma, liberando las posibles fallas en las líneas en el menor tiempo posible. Al mismo tiempo, el GA está programado para contemplar la optimización del parámetro de la corriente de arranque. La Figura 6 presenta la evolución de la convergencia de GA promediada para la coordinación de DOCRs en 100 simulaciones. Se observa que la función de aptitud va disminuyendo, ya que se trata de un problema de optimización, encaminada a la minimización.

DOCR	GA	
	dial	I_p
1 4	0.66	664
4 1	0.66	666
1 5	1.72	304
5 1	1.88	298
1 6	0.96	438
6 1	1.00	445
4 6	0.95	607
6 4	1.08	614
5 6	0.94	452
6 5	1.24	417

Tabla 6 Ajustes de dial y corriente de arranque para los relevadores de sobre corriente
Fuente: Elaboración propia

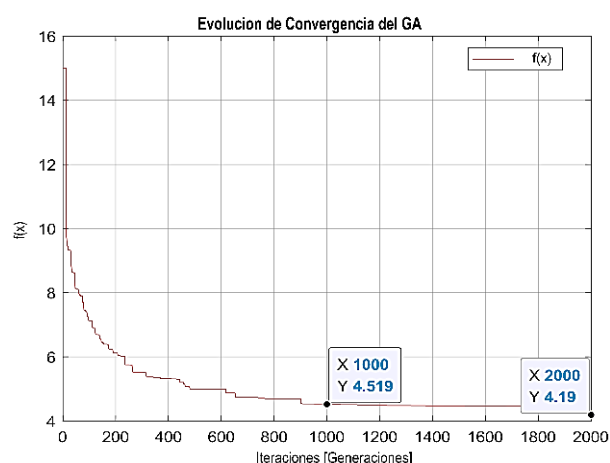


Figura 6 Convergencia del GA promediada para el sistema de 6 buses mallado en 100 corridas de simulaciones independientes
Fuente: Elaboración propia

También se observa que, a lo largo de las 2,000 iteraciones o generaciones, existen mejoras leves en cuanto al resultado después de las 1,000 iteraciones que promediaba la aptitud 4.519 a las mil iteraciones hasta 4.190 a dos mil iteraciones. Esto significa que realmente el problema de coordinación ya casi ha convergido aproximadamente a las 1,000 iteraciones. En otras palabras, el tiempo de ejecución del algoritmo para la optimización puede reducirse a la mitad si lo deseamos, estableciendo 1,000 como la máxima iteración de convergencia. Sin embargo, el límite de iteraciones ha sido establecido como 2,000 (valor de umbral) ya que el tiempo de ejecución es bastante rápido (sólo se requiere aproximadamente 2 minutos) con respecto a la forma manual y además puede haber una ligera mejora en los resultados.

A continuación, se presenta en la Tabla 7 los valores promedios y desviación estándar del GA en 100 corridas de simulaciones independientes. Cabe señalar que cada corrida inicia con una población aleatoria para evaluar la robustez y la capacidad de convergencia del GA.

	GA				
	f(x)	t(seg)	tp(seg)	tb(seg)	CTI(seg)
Max	5.12	127	0.81	1.70	0.89
Min	3.30	125	0.51	1.28	0.77
Promedio	4.19	127	0.63	1.50	0.87
SD	0.41	4.11	0.07	0.15	0.10

Tabla 7 Resultados máximos, mínimos, promedios y desviación estándar en 100 corridas de simulaciones independientes
Fuente: Elaboración propia

Se observa de la Tabla 6 que a pesar de iniciar con poblaciones aleatorias logra converger todas las simulaciones ya que tiene una desviación estándar (SD) de la función de aptitud de 0.41; es decir, la herramienta es muy confiable. Además, se observa que los valores máximos, mínimo y promediado de la función de aptitud están muy cercanos. Lo cual expresa que el GA no se ha perdido o no se ha presentado convergencias prematuras en las 100 búsquedas de las soluciones de satisfacer todas las restricciones (coordinación) del sistema.

Por otro lado, se observa que el GA ocupa aproximadamente 127 segundos con una desviación estándar de 4.11 segundos para ejecutar las 2 mil iteraciones. En otras palabras, se requiere solamente 2 minutos para encontrar resultados cercanos al óptimo. Esto habla bien de la herramienta ya que aparte de encontrar resultados con alta calidad, lo hace en un tiempo muy corto.

El resto de la Tabla 7 presenta los resultados promedios de los tiempos primarios, respaldos y CTIs. Los cuales se observa que son resultados muy prácticos.

Agradecimiento

Los autores agradecen el apoyo y el esfuerzo de la Universidad Autónoma de Campeche para que sus investigadores y estudiantes difundan los temas de investigación en los cuales están inmersos.

Conclusiones

El diseño y la programación del GA para la optimización de coordinación de DOCRs puede llevar meses, sin embargo, ofrece un resultado muy aceptable. Si un Ingeniero de Protecciones requiere coordinar un conjunto de DOCRs en un sistema eléctrico de potencia mallado, este puede optar por usar esta herramienta desarrollada, la cual puede encontrar los ajustes apropiados y solucionar el problema de coordinación de protecciones en minutos de tiempo con resultados cercanos al óptimo.

Si el Ingeniero coordina el mismo sistema de forma manual podrá tardar días o semanas dependiendo de la conectividad y complejidad y no necesariamente obtendrá resultados cercanos al óptimos o no necesariamente logrará coordinar todos los DOCRs (cumplir todas las restricciones). Con los resultados obtenidos se concluye que se ha cumplido el objetivo y la hipótesis es afirmativa. Los sistemas con DOCRs que requiere un estudio de coordinación de protecciones pueden ser: el mismo sistema en diferentes estaciones del año (diferente capacidad de generación-demanda); el sistema, pero con ciertos cambios topológicos debido a la naturaleza de la operación del sistema (por mantenimiento, por costos o por contingencias); o simplemente otro sistema nuevo donde se requiere realizar dicho estudio para ajustar las protecciones.

Referencias

Amraee T. (July 2012). Coordination of Directional Overcurrent Relays Using Seeker Algorithm. *IEEE Transactions on Power Delivery*, 27 (3), 1415-1422.

Blackburn J. L. & Domin T. J. (2006). *Protective relaying, principles and applications*. (3rd edition). CRC Press Taylor & Francis Group.

Gers J. M. & Holmes E. J. (2011). *Protection of Electricity Distribution Networks*. (3rd edition). IET.

IEEE Standard Inverse-Time Characteristic Equations for Overcurrent Relays, IEEE std C37.112-1996.

Noghabi A. S., Sadeh J. & Mashhadi H. R. (July 2010). Optimal coordination of directional overcurrent relays considering different network topologies using interval linear programming. *IEEE Transactions on Power Delivery*, 25 (3), 1348-1345.

Saadat H. (1999). *Power system analysis*. McGraw-Hill.

Singh M., Panigrahi B.K. & Abhyankar A.R. (2013). Optimal coordination of directional over-current relays using Teaching Learning-Based Optimization (TLBO) algorithm. *Elsevier International Journal of Electrical Power and Energy Systems*, 50, 33-41.

Sueiro J. A., Diaz-Dorado E., Miguez E. & Cidras J. (2012). Coordination of directional overcurrent relays using evolutionary algorithm and linear programming. *Elsevier International Journal of Electrical Power and Energy Systems*, 42, 299-305.

Urdaneta A. J., Restrepo H., Marquez S. & Sanchez J. (January 1996). Coordination of directional overcurrent relay timing using linear programming. *IEEE Transactions on Power Delivery*, 11 (1), 122-129.