

Reemplazo Óptimo en un Parque de Transformadores de Distribución Usando Algoritmos Genéticos con Programación en Matlab

P. Méndez †

V. Llivichuzhca ‡

† *Empresa Eléctrica Regional Centro Sur C.A*

‡ *Corporación Eléctrica del Ecuador CELEC E.P., Unidad de Negocio HIDROPAUTE*

Resumen - El presente trabajo analiza las capacidades de transformación y las demandas máximas y medias que son atendidas dentro de un parque de transformadores para determinar un programa de reemplazos y cambios con el objetivo de minimizar el costo operativo total el cual está sujeto a restricciones de orden técnico y económico. Para la solución se plantea el desarrollo de un algoritmo genético en el entorno de Matlab, el cual encuentre la cantidad óptima de estaciones a reemplazar por transformadores dentro del parque y por tanto la cantidad de estaciones a ser cambiadas por transformadores nuevos para lograr el más bajo costo operativo posible.

Palabras clave - Transformadores de distribución, Algoritmos genéticos, Capacidad instalada, Factor de carga, Reemplazo óptimo.

1. INTRODUCCIÓN

La demanda de energía eléctrica es una función que varía a lo largo del día y que su comportamiento en horizontes mayores de tiempo depende de numerosas variables como por ejemplo la estación del año, las características de las cargas de consumo, la región geográfica, los índices de crecimiento poblacional, económico, etc. Esta situación dificulta enormemente el predecir con suficiente precisión el dimensionamiento del equipamiento eléctrico que debe instalarse para satisfacer las necesidades energéticas de una población dentro de un horizonte temporal determinado.

El criterio para el dimensionamiento de los transformadores de distribución se basa en la proyección de una demanda máxima unitaria que crece casi linealmente en un horizonte de 10 años, sin embargo este método de proyección en muchos casos lleva a un sobredimensionamiento excesivo de la capacidad de transformación más aún considerando que la demanda máxima suele darse durante períodos pequeños de tiempo.

El presente estudio analiza la capacidad de transformación y los niveles actuales de un parque

de transformadores de distribución, con éstos datos iniciales y considerando una tasa de crecimiento lineal de la demanda, se determinan rápidamente cuales estaciones de transformación tienen un elevado grado de sobredimensionamiento, así como aquellas que se encuentran operando con un nivel de carga acorde a su capacidad.

El problema de determinar, dentro del grupo de transformadores sobredimensionados, cuáles pueden ser reubicados para atender eficientemente la demanda de cada estación así como el balance entre nuevas inversiones y transformadores que por restricciones de orden económico deben permanecer en operación con sus actuales condiciones de sobredimensionamiento, es modelado considerando los costos operativos actuales y de reemplazo de transformadores con el fin de lograr minimizar el costo operativo total del parque.

Para la resolución del problema, se plantea una metodología de optimización con el uso de Algoritmos Genéticos¹ desarrollado en la plataforma Matlab® para obtener las reubicaciones que se requiere en cada estación de transformación existente, en función de un análisis de costos de inversión y operación, siempre garantizando el suministro de la demanda.

2. FACTORES DE CARGA DE LOS TRANSFORMADORES

Es sabido que un transformador de distribución no soporta la misma carga a lo largo del tiempo, la demanda es un parámetro que depende de varios factores como por ejemplo la hora del día, el día de la semana, la época del año, la localidad o región a la cual este sirviendo, etc. En resumen la demanda dependerá de las costumbres y finalidad de uso que hagan de la energía eléctrica los clientes de la red de distribución.

Con base en lo anterior es posible inferir

¹ El algoritmo genético prototipo fue desarrollado en la plataforma Matlab® con la colaboración de los ingenieros L. Guillén, A. Peñaherrera, D. Zalamea, actualmente el algoritmo se encuentra en su etapa final de desarrollo.

que la capacidad del transformador debe poder cubrir la demanda en todo momento y por esto será indispensable estimar su grado de utilización a través de factores que relacionen la demanda máxima y media que se encuentra abasteciendo el transformador en un período de tiempo.

2.1. Factor de Carga (Fc)

Es la relación entre la demanda media y la demanda máxima en un período de tiempo (24 horas).

$$F_c = \frac{D_{med}}{D_{max}} \quad (1)$$

donde: D_{med} : Demanda media [KVA]
 D_{max} : Demanda máxima [KVA]

2.2. Factor de Utilización (FU)

Es la relación entre la demanda máxima y la capacidad nominal del transformador.

$$F_U = \frac{D_{max}}{C_{apn}} \quad (2)$$

donde: C_{apn} : Capacidad nominal [KVA].

2.3. Factor de cargabilidad media (FLA)

Es la relación entre la demanda media y la capacidad nominal del transformador.

$$F_{LA} = \frac{D_{med}}{C_{apn}} \quad (3)$$

3. PERDIDAS DE ENERGÍA EN TRANSFORMADORES DE DISTRIBUCIÓN

Las pérdidas de energía en los transformadores de distribución se originan en la potencia de pérdida en las dos partes básicas de esta máquina que son el núcleo magnético y los bobinados de cobre. La cantidad de potencia de pérdida depende de las características constructivas de la máquina, es por esta razón que los fabricantes suelen tabular los datos de pérdidas en catálogos para cada tipo de transformador.

Las pérdidas en vacío pueden considerarse prácticamente constantes para todas las temperaturas usuales de funcionamiento. Las pérdidas en el cobre son debidas al efecto Joule en los arrollamientos [3], [4], y son directamente proporcionales al cuadrado de la corriente que circula por los arrollamientos.

Las pérdidas de potencia se expresan de la siguiente forma:

$$P_p = P_{Fe} + P_{Cu(nominal)} * K^2 \quad (4)$$

donde: P_p : Pérdidas totales de potencia.

P_{Fe} : Pérdidas de potencia en vacío. [W]

P_{Cu} : Pérdidas de potencia en el cobre a capacidad nominal. [W]

K : Coeficiente de carga a una determinada potencia instantánea.

El coeficiente de carga queda determinado por:

$$K_i = \frac{P_i}{C_{apn}} \quad (5)$$

donde: P_i : carga instantánea [KVA]

Las pérdidas de energía se evalúan considerando el parámetro tiempo:

$$P_{ET} = T * (P_{Fe} + P_{Cu(nominal)} * K^2) \quad (6)$$

donde: P_{ET} : Perdidas de energía total [KVA]

K : Coeficiente de carga [KVA]

T : Periodo [horas]

4. MODELAMIENTO DEL PROBLEMA

La determinación de la potencia de las estaciones de transformación en nuestro país se rige por los diferentes procedimientos que cada Empresa de Distribución aplica, dichos procedimientos procuran que el transformador sea capaz de atender la demanda máxima proyectada a lo largo del tiempo, sin embargo la experiencia demuestra que la demanda máxima solamente se presenta en un corto período de tiempo durante el día, y más importante aún, las demandas proyectadas por lo general son muy superiores a las que efectivamente se registran, esto ha conducido a tener un elevado grado de sobredimensionamiento para este tipo de dispositivos.

Para la modelación del problema se han establecido las siguientes consideraciones y aspectos:

- Una misma tasa de crecimiento lineal de la demanda para todos los transformadores.
- Se analizan los costos operativos y de cambio o reemplazo de las unidades de transformación.
- Se analizan solamente transformadores monofásicos de las siguientes potencias: 3, 5, 10, 15, 25 y 37.5 KVA.

- Se desprecia el efecto de la variación de la temperatura sobre el funcionamiento de los transformadores.
- El periodo de vida útil de los transformadores considerado es de 10 años y se asume que todos los transformadores se encuentran en su año 1.

4.1. Planteamiento del problema

El problema a ser solucionado consiste en encontrar el mínimo costo de operación del parque de transformadores a ser analizado, cumpliendo las restricciones de orden técnico y económico que se impongan. Para ello los transformadores se clasifican en dos grupos principales:

- Aquellos que técnicamente se encuentran adecuadamente dimensionados y atienden eficientemente la demanda.
- Aquellos que presentan cierto grado de dimensionamiento excesivo para las condiciones de la demanda y que por tanto incurrir en costos operativos que pueden ser evitados.

Sobre la segunda clase de transformadores es que se debe encontrar la solución al problema para minimizar los costos operativos. Una vez que se tiene el número de transformadores que pertenecen a cada clase, el costo total de operación debe ser calculado para cada uno de los siguientes transformadores tipo:

Transformadores Tipo A (TrA): Son los pertenecientes a la primera clase de transformadores descrita en el párrafo anterior.

Transformadores Tipo B (TrB): Son aquellos pertenecientes a la segunda clase definida anteriormente pero que encontraron un transformador de reemplazo dentro dicho segmento que satisface eficientemente la demanda de la estación.

Transformadores Tipo C (TrC): Son aquellos transformadores pertenecientes a la segunda clase pero que no tienen un transformador de reemplazo dentro de este segmento. El proceso de solución del problema debe encontrar, dentro de este segmento, la cantidad óptima de transformadores a ser reemplazados por nuevas unidades de capacidad adecuada para suplir la demanda de la estación, cumpliendo la restricción de que el costo de inversión no exceda al costo de operación.

Transformadores Tipo D (TrD): Este tipo de transformador se deriva de los transformadores tipo C luego de que el proceso de búsqueda de solución

concluye con la cantidad óptima a ser reemplazada por transformadores nuevos, en otras palabras, los tipos D son aquellos a los cuales es más económico mantenerlos en operación a pesar de sus pérdidas que reemplazarlos por nuevas unidades.

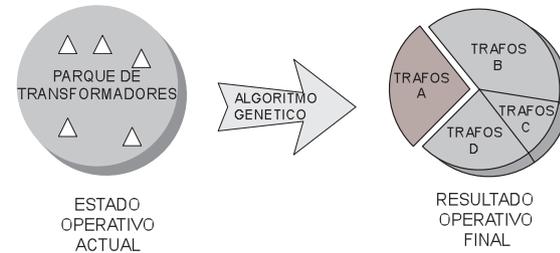


Figura 1: Representación del problema

4.2. Función de costos

La alternativa óptima de operación de un grupo de transformadores de distribución será aquella que minimice el costo total que el funcionamiento del parque de transformadores genere para brindar el suministro eléctrico en la zona, los componentes de este costo total son:

4.2.1. Costos operativos (C_{op})

Son los costos que representan las pérdidas de potencia y energía en los transformadores de distribución, debido a sus características constructivas, tanto en el núcleo de hierro como en los arrollamientos de cobre de media y baja tensión.

Estos costos tienen impacto directo sobre la Empresa de Distribución ya que se suman a los cargos de potencia y energía que se liquidan mensualmente por el servicio eléctrico que la Empresa compra en el mercado. La expresión de los costos operativos es:

$$C_{Op_{tr}} = \sum_{Na=1}^{10} \left[\sum_{j=1}^M \sum_{i=1}^N \left(C_{P_{P_{ji}}} + C_{P_{ET_{ji}}} \right) * A_{Na} \right] \quad (7)$$

donde: $tr = TrA, TrB, TrC, TrD$

N : Número de transformadores de cada tipo

M : Tipos de transformadores

$CP_{P_{ji}}$: Costo de pérdidas de potencia

$CP_{ET_{ji}}$: Costo de pérdidas de energía

A_{Na} : Anualización de costos a 10 años

4.2.2. Costos de inversión (C_{inv})

Representa la inversión inicial del proyecto para la sección de los transformadores nuevos tipo C, para el análisis se considera un valor

anualizado, considerando la vida útil de la unidad de transformación en 10 años, de esta forma se asigna la parte correspondiente de la inversión en cada año.

$$C_{Inv} = A * C_{in} \quad (8)$$

$$A = \left[\frac{I * (I + 1)^{Na}}{(I + 1)^{Na} - 1} \right] \quad (9)$$

donde: A: Anualidad
 I: Tasa de descuento
 Na: Numero de años
 C_m: Costo inicial de inversión

4.2.3. Costos de remplazo (C_{Rem})

Se refiere a los costos en los que se incurre al realizar la reubicación de los transformadores pertenecientes al tipo B descrito en párrafos anteriores, este costo incluye el desmontaje del transformador existente y el montaje del transformador de capacidad óptima en cada punto de transformación. Estos valores son establecidos en función de los costos que representa cada actividad.

Para el presente estudio estos costos han sido considerados como un costo promedio para todos los transformadores donde se incluye mano de obra y transporte.

$$C_{Rem} = C_{mo} + C_{tsp} \quad (10)$$

donde: C_{mo}: Costo de mano de obra
 C_{tsp}: Costo de transporte

4.2.4. Costo total

El costo total viene dado por la suma de los tres costos anteriores, es decir, por los costos operativos asociados a las pérdidas de potencia y energía, costos de remplazo (reubicación) y por el costo de inversión de los transformadores nuevos.

$$C_T = C_{OpTrA} + (C_{OpTrB} + C_{RemTrB}) + (C_{OpTrC} + C_{InvTrC}) + C_{OpTrD} \quad (11)$$

4.3. Restricciones del problema

Dentro del problema en análisis se consideran las siguientes restricciones:

- El costo de inversión tiene que ser menor que el costo operativo de los transformadores tipo C.
- La cantidad de transformadores a reubicar (TrB) tiene que ser mayor que la cantidad de transformadores que serán reemplazados por nuevas unidades (TrC).
- Los transformadores de remplazo se reubicaran considerando que tienen que suplir la demanda máxima requerida.
- El factor de cargabilidad de las estaciones de transformación tiene que estar entre 0.55 y 0.85.

$$C_{InvTrC} \leq C_{OpTrC} \quad (12)$$

$$TrB_j, TrC_j > D_{max_j} \quad (13)$$

$$TrB > TrC \quad (14)$$

$$0.55 \leq FLA \leq 0.85 \quad (15)$$

5. ALGORITMO GENÉTICO

Los métodos genéticos son algoritmos que se utilizan para la búsqueda y optimización de soluciones a problemas del mundo real, que basan su funcionamiento en el proceso genético de los organismos vivos.

Los principios postulados por Darwin (1859) indican que la selección natural y la supervivencia de los individuos, corresponden a los más fuertes o de aquellos que mejor se adaptan a nuevas condiciones, luego de prevalecer en la competencia de obtención de recursos, búsqueda de reproducción y como consecuencia se tendrá la propagación de los genes en los descendientes con mejores condiciones de adaptación a su entorno incluso mayor a sus predecesores.

Una analogía a lo descrito anteriormente es utilizada por los Algoritmos Genéticos en donde se establece aleatoriamente un grupo de posibles soluciones al problema, denominada como “población” [7]. Cada una de estas soluciones constituye un “individuo” o un “cromosoma”, al que se le asigna una puntuación de acuerdo a la solución que proporciona, siendo los de mayor puntuación los escogidos para la reproducción y así crear una nueva “población” que comparta alguna de sus características, especialmente las óptimas.

Las características mejoradas de los individuos pueden ser compartidas en toda una “generación” por todos los cruces que se presentan llegando a una solución óptima del problema.

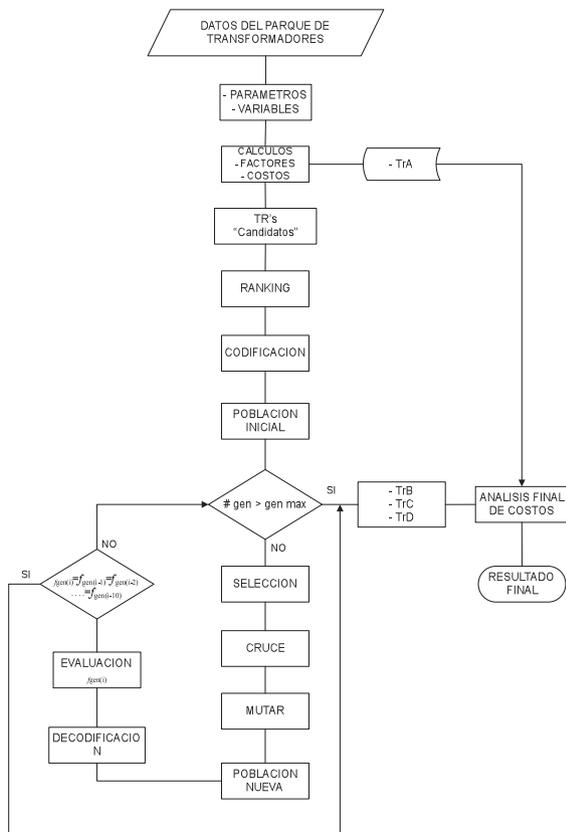


Figura 2: Diagrama de flujo del Algoritmo Genético

Dentro del alcance del presente estudio, se ha desarrollado un algoritmo prototipo en la plataforma Matlab para el reemplazo óptimo (reubicaciones) de unidades de transformación, el cual bien puede probarse en una empresa distribidora, realizando previamente los ajustes y análisis necesarios. En el esquema de la Fig. 2 se muestra el diagrama de flujo del algoritmo genético prototipo.

Inicialmente el algoritmo discrimina las unidades “mejores candidatas” para reemplazo en función del factor de cargabilidad, posteriormente realiza un ranking de mejores estaciones para reemplazo en base al mayor sobredimensionamiento con respecto a la demanda media que atiende dicha estación.

5.1. Representación del cromosoma

Un Algoritmo Genético requiere que cada solución, perteneciente a una población de soluciones, sea representada mediante una estructura que imite a la estructura de un cromosoma. Un cromosoma

es básicamente una secuencia de genes en la cual cada gen es la representación o codificación de un parámetro de una solución, en este caso se utilizó una codificación binaria.

La codificación correcta de las soluciones es una tarea clave para permitir que el Algoritmo Genético logre una buena resolución del problema [5], [7], [8].

La Fig. 3 presenta la codificación esquemática adoptada por el algoritmo para el análisis del problema, donde se indica que para cada estación de transformación existen seis tipos de transformadores para su remplazo, la longitud del cromosoma esta dado por el número de estaciones “candidatas” por los seis tipos de transformadores de cambio.

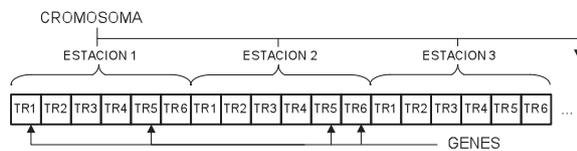


Figura 3: Representación del Cromosoma

5.2. Población inicial

La población inicial consiste de un grupo de cromosomas que representan las posibles soluciones del problema que está siendo considerado. La población inicial es generada de manera aleatoria siguiendo una distribución normal, en la cual se ha procurado que tenga un buen nivel de diversidad genética entre los cromosomas con probabilidad de 65% para reemplazo y 35% para no reemplazo en cada individuo de la población inicial.

5.3. Selección de los individuos

Para cada generación se debe realizar una selección de los individuos que tengan mejores características para realizar un cruce de sus genes y pasarlos a la siguiente generación. La selección de los padres puede ser de forma randómica (al azar) conocida como selección por Torneo o de acuerdo a una proporcionalidad de la función de evaluación (función *fitness*) o selección por Rueda de Ruleta [7], [8], [9].

Otras maneras para escoger a los padres pueden ser la selección dinámica o estática por rangos establecidos. En el algoritmo prototipo se selecciona a los individuos con una combinación de selección por rueda por ruleta y selección elitista.

5.4. Cruce

Esta operación consiste en el cruce (*crossover*) de los genes de los padres para establecer la “herencia” genética de la siguiente generación. El procedimiento establecido para el algoritmo prototipo considera una conservación del 80% de los genes de un padre y un intercambio del 20% para así generar un nuevo individuo (hijo).

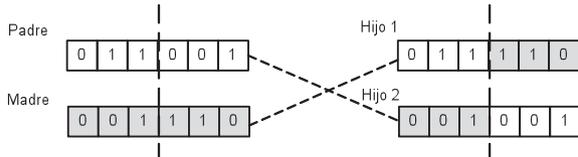


Figura 4: Cruce de Cromosomas

5.5. Mutación

La mutación comprende la selección de los individuos que serán sometidos al cambio aleatorio de uno de los genes de su cromosoma, la mutación también puede ser establecida sistemáticamente como las modificaciones que se presentan en el entorno para la búsqueda de la solución del problema planteado. La mutación puede llevar a resultados positivos o negativos en relación con la resolución del problema. Para el análisis que nos compete se ha utilizado una tasa de mutación de acuerdo al criterio de Schaffer & Col [9].

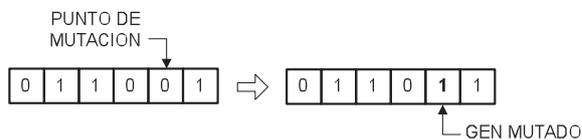


Figura 5: Mutación de un Cromosoma de 6 genes

5.6. Función de Evaluación

La función de evaluación o fitness (*fgen*) se encarga de evaluar la calidad de la solución representada por un cromosoma y de asignarle un puntaje o valor de fitness en función de su calidad. La calidad de una solución se refiere a cuán buena es esta última para resolver el problema que se está tratando.

Durante la evaluación de un cromosoma, este último es decodificado con el objetivo de obtener una serie de parámetros a partir de los cuales se determina una solución. Dentro del objetivo principal se considera para el algoritmo genético la minimización de la función de costos total.

En la Fig. 6 se presenta el comportamiento de la función fitness del algoritmo desarrollado para un ejemplo de 2000 transformadores.

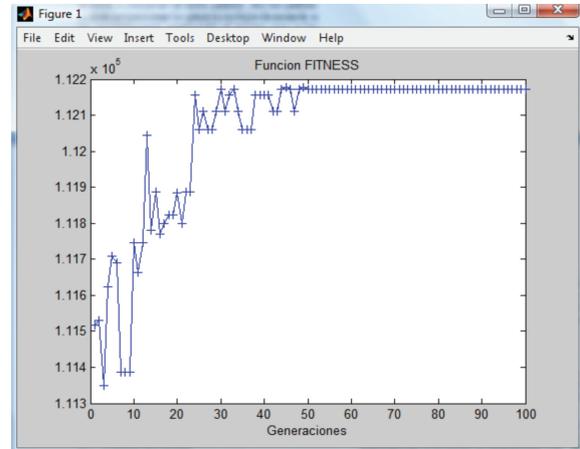


Figura 6: Función fitness de un parque de 2000 transformadores

5.7. Criterio de Parada

El proceso se detiene cuando uno de los siguientes criterios se satisfacen: si una probable solución no mejora en un determinado número de generaciones (10 para el caso de estudio) o a su vez cuando el algoritmo ha cumplido el máximo de generaciones previamente determinadas por el usuario.

6. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

- Del análisis con un grupo de transformadores, se encontraron los cambios que se deben realizar para optimizar el uso del parque de transformación así como también el remplazo (reubicaciones) de las estaciones. De esta forma se logra un mejor uso de los recursos disponibles evitando inversiones adicionales y disminuyendo la capacidad excesivamente sobredimensionada en dicha etapa.
- La aplicación de los algoritmos genéticos dentro de un proceso de búsqueda y además cumpliendo con ciertas condiciones o restricciones, permite hallar soluciones óptimas cuando se deben realizar múltiples comparaciones dentro del proceso o análisis.
- El regulador del sector eléctrico debería realizar un estudio que actualice y estandarice la forma de determinar las demandas unitarias proyectadas, la cual considere las particularidades de cada región y se evite el excesivo sobredimensionamiento que actualmente se presenta.
- Los resultados del algoritmo mostraron una convergencia prematura del algoritmo genético al inicio del desarrollo, esto se está resolviendo con la aplicación de las técnicas de aptitud específicamente el método de

Normalización Lineal, el cual en primera instancia ayudo a reducir el dominio por algunos cromosomas.

- Se espera que el algoritmo se ejecute en un caso práctico y real de una empresa distribuidora, esto ayudara a calibrar de mejor manera el modelo y brindará un mejor performance del mismo.
- Para posteriores investigaciones se propone que el algoritmo prototipo deba incluir otros factores dentro del análisis, tales como: la distancia entre transformadores a reubicar, el crecimiento de la demanda de manera no lineal y la inclusión de los diferentes tipos de transformadores trifásicos.

AGRADECIMIENTOS

Agradecemos la colaboración de los Ingenieros: Luis Guillén, Agustín Peñaherrera y Diego Zalamea, los cuales formaron parte del grupo de trabajo para el desarrollo del algoritmo prototipo, el proyecto formó parte en el módulo de “Negocio del Transporte” de la Maestría en Sistemas Eléctricos de Potencia en la Universidad de Cuenca.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] J. Moreno, R. Moreno, S. Mocarquer, H. Rudnick. “Determinación de un Parque Óptimo de Transformadores para una Empresa Modelo de Distribución”. IEEE.
- [2] Francois Maurice Montagnon Casanova, Hugh Rudnick Van Wyngard. (1999) “Planificación de la Expansión de Sistemas de Distribución Vía Algoritmos Genéticos”. Tesis de Ingeniero Civil de Industrias con Mención en Electricidad. Santiago de Chile.
- [3] Luis Alberto Ochoa, Esteban Albornoz. “Dimensionamiento de Estaciones de Transformación de Media Tensión/Baja Tensión Basada en Programación Dinámica”. XIX Seminario de Distribución y Comercialización de Energía Eléctrica. ECUACIER, Ecuador.
- [4] H. Lee Willis, *Power Distribution Planning Reference Book*, Marcel Dekker, 1997, USA.
- [5] Miguel Leiva Gómez (2001) “Localización óptima de condensadores en un sistema de distribución eléctrico vía algoritmos genéticos” Tesis de Ingeniero Civil de Industrias con Diploma en Ingeniería Eléctrica. Santiago de Chile.
- [6] Luis Alberto Ochoa, Esteban Albornoz. “Optimización de las Inversiones de Energía en Alimentadores Primarios, Basada en la Estandarización de un Conjunto Óptimo de Conductores”. XXI Seminario de Distribución y Comercialización de Energía Eléctrica. ECUACIER.
- [7] D. Goldberg, *Genetic Algorithms in Search, Optimization and Machine Learning*, Addison-Wesley 1989.
- [8] Koza, John R., *Genetic programming: on the programming of computers by means of natural selection*, Cambridge, MA: MIT Press, 1998.
- [9] J.D. Schaffer, R.A. Caruna, L.J. Eshelman, R. Das (1989). “A study of control parameters affecting online performance of genetic algorithms for function optimization.” J.D. Schaffer (ed.), *Proceedings of the Third International Conference on Genetic Algorithms*, Morgan Kaufmann, 51-60.



Pablo Alejandro Méndez S.- Nació en Cuenca en 1979. Recibió su título de Ingeniero Eléctrico de la Universidad Politécnica Salesiana en 2004. Se encuentra desarrollando su tesis de Maestría en Sistemas Eléctricos de Potencia en la Universidad de Cuenca, sus áreas de interés e investigación están relacionadas con la operación económica de sistemas de potencia, regulación del sector eléctrico, distribución de energía eléctrica y mercados de electricidad. Actualmente labora en la Dirección de Comercialización de la Empresa Eléctrica Regional Centro Sur dentro del área de Mercado Eléctrico y Grandes Clientes.



Vicente Alejandro Llivichuzhca P.- Nació en Cuenca en 1980. Recibió su título de Ingeniero Eléctrico de la Universidad Politécnica Salesiana en 2006. Se encuentra desarrollando su tesis de Maestría en Sistemas Eléctricos de Potencia en la Universidad de Cuenca, y sus áreas de interés se encuentran relacionadas con la operación económica, planificación con procesos de optimización, operación de centrales eléctricas. Actualmente labora en la Unidad de Negocio Hidropauta de CELEC EP.