



UNIVERSIDAD DE CUENCA

Facultad de Ingeniería

Carrera de Ingeniería Eléctrica

Planeamiento de la expansión del sistema de transmisión considerando indicadores de confiabilidad y nivel de emisiones del sistema de generación usando el modelo AC

Trabajo de titulación previo  
a la obtención del título de  
Ingeniero Eléctrico

Modalidad: Artículo Académico

AUTORES:

Santiago Israel Bautista Pambi

CI:1105631657

santisra95@gmail.com

Francisco Javier Jiménez Caiza

CI: 1721542734

francisco.jimenez0406@gmail.com

DIRECTOR:

Ing. Santiago Patricio Torres Contreras

CI:0102448958

**Cuenca, Ecuador**

29-octubre-2021



## **Resumen:**

El presente trabajo propone implementar en la Planificación de la Expansión del Sistema de Transmisión (PET) indicadores de confiabilidad y señales para reducir las emisiones de Gases de Efecto Invernadero (GEI) producidas por la generación a base de combustibles fósiles. El objetivo es obtener planes de expansión del sistema de transmisión confiables a la vez que se disminuyen las emisiones de GEI. Para dar solución al problema planteado se implementa el algoritmo NSGA II el cual permite resolver problemas multiobjetivo. Los resultados se han obtenido usando el sistema de prueba de 6 nodos de Garver.

**Palabras Clave:** Confiabilidad. Emisiones. Expansión. NSGA II. Planeamiento. Transmisión.



**Abstract:**

This paper proposes to implement in the Transmission System Expansion Planning (TEP) reliability indicators and signals to reduce Greenhouse Gases (GHG) emissions produced by fossil fuel generation. The objective is to obtain reliable transmission system expansion plans while reducing GHG emissions. In order to solve the problem, the NSGA II algorithm is implemented, which allows solving multi-objective problems. The results have been obtained using Garver's 6-node test system.

**Keywords:** Reliability. Emissions. Expansion. NSGA II. Planning Transmission



## Cláusula de licencia y autorización para publicación en el Repositorio Institucional

---

Santiago Israel Bautista Pambi, en calidad de autor y titular de los derechos morales y patrimoniales del trabajo de titulación "Planeamiento de la expansión del sistema de transmisión considerando indicadores de confiabilidad y nivel de emisiones del sistema de generación usando el modelo AC", de conformidad con el Art. 114 del CÓDIGO ORGÁNICO DE LA ECONOMÍA SOCIAL DE LOS CONOCIMIENTOS, CREATIVIDAD E INNOVACIÓN reconozco a favor de la Universidad de Cuenca una licencia gratuita, intransferible y no exclusiva para el uso no comercial de la obra, con fines estrictamente académicos.

Asimismo, autorizo a la Universidad de Cuenca para que realice la publicación de este trabajo de titulación en el repositorio institucional, de conformidad a lo dispuesto en el Art. 144 de la Ley Orgánica de Educación Superior

Cuenca, 29 de octubre del 2021

Santiago Israel Bautista Pambi

C.I: 1105631657



## Cláusula de licencia y autorización para publicación en el Repositorio Institucional

---

Francisco Javier Jiménez Caiza, en calidad de autor y titular de los derechos morales y patrimoniales del trabajo de titulación “Planeamiento de la expansión del sistema de transmisión considerando indicadores de confiabilidad y nivel de emisiones del sistema de generación usando el modelo AC”, de conformidad con el Art. 114 del CÓDIGO ORGÁNICO DE LA ECONOMÍA SOCIAL DE LOS CONOCIMIENTOS, CREATIVIDAD E INNOVACION reconozco a favor de la Universidad de Cuenca una licencia gratuita, intransferible y no exclusiva para el uso no comercial de la obra, con fines estrictamente académicos.

Asimismo, autorizo a la Universidad de Cuenca para que realice la publicación de este trabajo de titulación en el repositorio institucional, de conformidad a lo dispuesto en el Art. 144 de la Ley Orgánica de Educación Superior

Cuenca, 29 de octubre del 2021

---

Francisco Javier Jiménez Caiza

C.I: 1721542734



## Cláusula de Propiedad Intelectual

---

Santiago Israel Bautista Pambi, autor del trabajo de titulación **“Planeamiento de la expansión del sistema de transmisión considerando indicadores de confiabilidad y nivel de emisiones del sistema de generación usando el modelo AC”** certifico que todas las ideas, opiniones y contenidos expuestos en la presente investigación son de exclusiva responsabilidad de su autor.

Cuenca, 29 de octubre del 2021

---

Santiago Israel Bautista Pambi

C.I: 1105631657



## Cláusula de Propiedad Intelectual

---

Francisco Javier Jiménez Caiza, autor del trabajo de titulación **“Planeamiento de la expansión del sistema de transmisión considerando indicadores de confiabilidad y nivel de emisiones del sistema de generación usando el modelo AC”** certifico que todas las ideas, opiniones y contenidos expuestos en la presente investigación son de exclusiva responsabilidad de su autor.

Cuenca, 29 de octubre del 2021

---

Francisco Javier Jiménez Caiza

C.I: 1721542734





## I. INTRODUCCIÓN

El principal objetivo del sistema eléctrico es suministrar energía eléctrica a los consumidores en las mejores condiciones operativas, económicas y ambientales; definir dónde, cuándo y qué refuerzos se deben colocar en la red eléctrica para asegurar un nivel adecuado de suministro de energía a los clientes, teniendo en cuenta el crecimiento de la carga y las nuevas capacidades de generación.

Dentro de estas condiciones, los estudios de planificación de la expansión de los sistemas de transmisión (PET), brindan una solución a este problema, al tiempo que se minimizan los costos de inversión, operación e interrupción [1][2].

La confiabilidad en el problema PET implica cumplir estándares de calidad y continuidad del servicio impuestos por la entidad reguladora. Esto es uno de los criterios de mayor importancia en la operación de un sistema eléctrico para obtener una competitividad en el mercado eléctrico[3]; sin embargo, tener una red más confiable generalmente requiere mayores costos de inversión, por lo que el problema conlleva a tener un conflicto entre el costo de inversión y una confiabilidad óptima[4].

Los diferentes índices de confiabilidad han sido utilizados en varios para investigar el PET, como la pérdida de carga esperada (LOLE) [5][9], la probabilidad de pérdida de carga (LOLP) [6], el coste de pérdida de carga (LOLC) [7], energía no suministrada (EENS) [8][12], entre otros. Estos indicadores de carga utilizan criterios probabilísticos de confiabilidad, de los cuales LOLE y EENS son índices de confiabilidad comunes y se los obtiene fácilmente de una curva de duración de carga (LDC)[3].

Generalmente, en el problema del PET la confiabilidad se suele considerar como una restricción [9], o como un objetivo adicional[10]. En [11], al colocar restricciones a la demanda, provoca que las capacidades de las líneas superen las cargas en un perfil de carga ficticio. En [12][13] se trabajan con criterios determinísticos de confiabilidad, como lo son: potencia no suministrada (PNS), energía no suministrada (ENS) y costo de interrupción. Estos últimos serán los utilizados para este estudio.

Por otro lado, el consumo de combustibles fósiles en centrales térmicas para la producción de energía eléctrica, genera varios contaminantes que son expulsados a la atmósfera [13][14]. En la planificación del PET, las emisiones del CO<sub>2</sub>, han sido consideradas de varias formas en diferentes estudios, como un coste adicional en la función objetivo[14], como un inventario de emisiones permitidas en las restricciones [15], en otros estudios se tomó en cuenta el carbono resultante de la fabricación y construcción de la línea de transmisión [16] y la maximización de fuentes bajas en carbono [17].

Para dar solución al problema planteado se requiere implementar algoritmos de solución multiobjetivo, los cuales manejan funciones que pueden tener objetivos en conflicto como es el caso de la confiabilidad y el nivel de emisiones. En este trabajo se propone resolver el problema PET, con las consideraciones precedentes, usando el algoritmo NSGA II, que junto con MATPOWER 6.0 nos permiten obtener las soluciones y datos eléctricos relacionadas del PET.

## II. PLANEAMIENTO DE LA EXPANSIÓN DEL SISTEMA DE TRANSMISIÓN

El planeamiento del sistema de transmisión, tiene como objetivo optimizar la mayor cantidad de recursos, siendo principalmente el económico el mayor criterio de optimización.

El objetivo es obtener costos de inversión, operación, al más bajo costo, cumpliendo con criterios de calidad y confiabilidad, garantizando servicios energéticos para la proyección de una demanda futura [18].

Estos criterios de optimización son comunes en todos los casos de PET, ya que el sistema eléctrico de potencia debe cumplir criterios técnicos relacionados a las limitaciones físicas de sus componentes; como lo pueden ser los límites de transmisión de los circuitos, límites de potencia activa y reactiva de las unidades de generación, perfiles de voltaje, desviación angular y pérdidas del sistema, entre otras.

Bajo estas condiciones la primera Función Objetivo (FO) y común a los dos problemas planteados, está relacionada al costo de implementación de las líneas de transmisión entre los nodos existentes o proyectados. La segunda FO está relacionada a la PNS inherente a la topología propuesta por el PET; cabe señalar que energía y costos de interrupción serán proporcionales a este indicador. Por último, la tercera FO está relacionada a las emisiones de CO<sub>2</sub> del sistema de generación.

## III. CONFIABILIDAD EN SISTEMAS ELÉCTRICOS.

Para simplificar la comprensión de los sistemas eléctricos, éstos se dividen en zonas funcionales: generación, transmisión y distribución, lo que viabiliza de mejor manera la operación y la planificación [19]. En ocasiones, es esencial analizar la interacción entre dichas zonas, por lo que ha sido necesaria la creación de “Niveles Jerárquicos”.



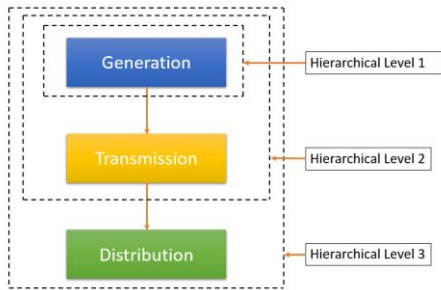


Fig. 1 Niveles jerárquicos para sistemas eléctricos [19]

A medida que el nivel jerárquico se eleva, se incorporan más zonas de estudio, por ende, la operación, y sobre todo la planificación se dificulta al agrupar más elementos del sistema.

Los elementos que componen el sistema eléctrico, no son fiables al 100%, esto quiere decir que no funcionan con éxito todo el tiempo, por lo que cada elemento puede estar disponible o no disponible.

Dentro de la disponibilidad, el elemento puede encontrarse en servicio (conectado a la red), o fuera de servicio (desconectado de la red). Estos dos estados pueden alternarse por mantenimiento, falla o por no requerirse su operación en el SEP.

Dentro de la no disponibilidad de los elementos, estas pueden ser planeadas o forzadas. Las planeadas son aquellas que están debidamente programadas, para un mantenimiento o reemplazo. Las interrupciones forzadas son aquellas que ocurren debido a una falla, siendo estas las interrupciones más complejas y severas, por cuanto éstas son el factor de suma importancia dentro de la planificación y operación del Sistema Eléctrico de Potencia (SEP) [20].

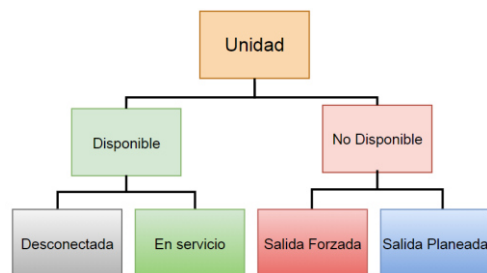


Fig. 2 Estados probables de los elementos del SEP [20]

### A. Confiabilidad

La confiabilidad comprende toda la capacidad del Sistema Eléctrico de Potencia (SEP) en suministrar energía eléctrica en todos los puntos de carga del sistema dentro de los criterios admisibles y en las magnitudes requeridas. Es por tal razón que la NERC (North American Electric Reliability Corporation) define a la confiabilidad como “el grado en que el Sistema Eléctrico de Potencia suministra energía a los usuarios, satisfaciendo normas vigentes y en el tiempo determinado” [21][22].

### B. Índices de Confiabilidad

Los índices de confiabilidad utilizados en este trabajo determinan la gravedad en términos de carga interrumpida, al dejar de lado los problemas del sistema explicados previamente, este índice denota únicamente en términos de reducción de carga o carga no suministrada.

Estableciendo que los índices de la confiabilidad fundamentales son la frecuencia, duración y reducción de carga, podemos definir una serie de índices de confiabilidad [23].

- Frecuencia de carga reducida:
- Horas de Carga reducida
- Potencia no Suministrada
- Energía no Suministrada

Estos indicadores están estrechamente relacionados, pues son proporcionales entre sí, en este trabajo se considerará principalmente la potencia no suministrada (PNS). Este indicador junto los costos de implementación serán las dos primeras funciones objetivo sobre las cuales se ejecutará el algoritmo de solución.

### IV. EMISIONES AMBIENTALES Y SU INFLUENCIA EN EL PET

Las emisiones de Gases de Efecto Invernadero (GEI) son uno de los principales causantes de la crisis climática a nivel global ya que estas han sido en grandes cantidades y durante mucho tiempo, por lo que es importante tener presente estas consideraciones en el PET para minimizar dichas emisiones y contribuir activamente el desarrollo sostenible de la sociedad humana [24].

El término “contaminación atmosférica” tiene diferentes definiciones, aunque todas a la presencia de sustancias nocivas, sean éstas orgánicas o producidas por el hombre, las cuales arrojen a la atmosfera gas, polvo o de otro tipo, produciendo en la atmósfera concentraciones diferentes a la natural, pudiendo llegar a provocar daño, ya sea a la salud de la población o a diferentes ecosistemas [25][26].

Entre los contaminantes que se pueden identificar son: el monóxido de carbono, el dióxido de carbono, óxidos de nitrógeno, óxidos de azufre, partículas sólidas suspendidas, hidrocarburos no combustiónados [13].

Sin duda una de las mayores fuentes de emisiones de CO<sub>2</sub>, es el área energética, alrededor de 78-80% del CO<sub>2</sub> que se emite al año en el planeta es originado por la quema de combustibles fósiles en la generación de energía eléctrica y procesos industriales [27]. Por lo tanto, una planificación adecuada es primordial para lograr reducir las emisiones.

En este estudio sugiere una solución mediante optimización multiobjetivo, por lo que se busca minimizar las emisiones de CO<sub>2</sub> del sistema de generación que varían por las diferentes topologías del sistema de transmisión.



## V. FORMULACIÓN

Los modelos matemáticos utilizados en este trabajo resultan en dos problemas de optimización independientes basados en el modelo AC. En el primer caso se utiliza Costos de inversión y PNS y en el segundo caso se utiliza Costos de inversión y Emisiones de CO<sub>2</sub>.

## A. Formulación Problema costo-confiabilidad

Este primer par de funciones objetivo son las relacionadas a la optimización de costos y minimización de PNS como se muestra en (1) y (2) respectivamente.

$$\min C = \sum_{(i,j) \in \Omega} C_{ij} * n_{ij} [MDD] \quad (1)$$

$$\min PNS = \sum_0 PNS_k [MW] \quad (2)$$

B. Formulación Problema costo-Emisiones CO<sub>2</sub>

La segunda pareja de funciones objetivo está relacionadas a la optimización de recursos económicos y a la minimización de emisiones de CO<sub>2</sub> del sistema de generación como se muestra en (3) y (4) respectivamente.

$$\min C = \sum_{(i,j) \in \Omega} C_{ij} * n_{ij} [MDD] \quad (3)$$

$$\min eCO_2 = \sum_{i \in \Omega} P_{Gk} * CO_{2k} \left[ \frac{\text{ton}(CO_2)}{MWh} \right] \quad (4)$$

Sujeto a:

$$n_{ij} \leq \bar{n}_{ij} \quad (5)$$

Donde,  $C$  es la función objetivo de minimización de costos de inversión de la topología del sistema de transmisión propuesto,  $C_{ij}$  es el costo del circuito en el tramo  $i$ - $j$ ,  $n_{ij}$  es el número de circuitos en el tramo  $i$ - $j$ ,  $\bar{n}_{ij}$  es el máximo número de circuitos en el tramo  $i$ - $j$ ,  $PNS$  es la función objetivo asociada a la potencia no suministrada del sistema,  $PNS_k$  es la potencia no suministrada en la barra  $k$ ,  $eCO_2$  es la función objetivo relacionada a las emisiones de CO<sub>2</sub> del sistema de generación,  $P_{Gk}$  es la potencia generada en la barra  $k$  y  $CO_{2k}$  son las emisiones de CO<sub>2</sub> asociadas a la barra  $k$  como se muestra en la TABLA V. La restricción formulada en (5) se aplica a los dos problemas.

## C. Formulación Flujo de Potencia Óptima

El problema eléctrico operacional tiene las restricciones inherentes de optimización de flujos de potencia (OPF por sus siglas en inglés). En este trabajo se ha considerado que los costos de generación y PNS son lineales e iguales entre las diferentes unidades tanto reales como ficticias. Los costos de generación

de las unidades reales son mucho menores que el costo de generación de las unidades ficticias con el fin de obtener resultados de acuerdo con el estudio de interés. La función objetivo y restricciones de este apartado se muestran a continuación.

$$\min op = \sum (r_{Pk} * \alpha_G + r_{Qk} * \alpha_Q + C_{op}) \quad (6)$$

Sujeto a:

$$P(V, \theta) - P_G + P_D - r_P = 0 \quad (7)$$

$$Q(V, \theta) - Q_G + Q_D - r_Q = 0 \quad (8)$$

$$\underline{P}_G \leq P_G \leq \overline{P}_G \quad (9)$$

$$\underline{Q}_G \leq Q_G \leq \overline{Q}_G \quad (10)$$

$$\underline{r}_P \leq r_P \leq \overline{r}_P \quad (11)$$

$$\underline{r}_Q \leq r_Q \leq \overline{r}_Q \quad (12)$$

$$\underline{V} \leq V \leq \overline{V} \quad (13)$$

$$S_{ij} \leq \overline{S} \quad (14)$$

$$S_{ji} \leq \overline{S} \quad (15)$$

$PNS_k$  y  $r_{Pk}$  guardan una estrecha relación como se muestra en (16).  $C_{op}$  es el costo de operación del SEP por hora, como se describe en (17).

$$PNS_k = r_{Pk} \quad (16)$$

$$C_{op} = \sum_k (\beta_k * P_{Gk} + \gamma_k * Q_{Gk}) * CF_k \quad (17)$$

Donde  $\alpha_G$  es el costo de generación de potencia activa de las unidades ficticias, en este trabajo  $\alpha_G$  lineal;  $\alpha_Q$  es el costo de generación de potencia reactiva de las unidades ficticias, en este trabajo  $\alpha_Q$  es nulo,  $r_{Qk}$  es la potencia reactiva no suministrada. En (17),  $\beta_k$  y  $\gamma_k$  son los costos de generación de potencia activa y reactiva en la barra  $k$  respectivamente; en este trabajo  $\gamma_k$  es cero,  $P_{Gk}$  y  $Q_{Gk}$  es la potencia activa generada y la potencia reactiva generada en la barra  $k$  respectivamente,  $CF_k$  es la capacidad de generación en el nodo  $k$ . (7) y (8) representan el balance de potencias en los nodos donde  $P_G$  es la potencia activa generada,  $P_D$  potencia activa demandada,  $r_P$  potencia activa no suministrada,  $P(V, \theta)$  es el flujo potencia activa (16),  $Q_G$  la potencia reactiva generada,  $Q_D$  la potencia reactiva demandada,  $r_Q$  es la potencia reactiva no suministrada y  $Q(V, \theta)$  es el flujo de potencia reactiva (17). (9) y (10) representan los límites de operación de las unidades de generación, donde  $\underline{P}_G$ ,  $\underline{Q}_G$  y  $\overline{P}_G$ ,  $\overline{Q}_G$  son límites mínimos y máximos de potencia activa y reactiva de las unidades de generación existentes. En (11) y (12) se muestra las restricciones de carga activa y reactiva de los generadores

artificiales, donde  $\underline{r}_p$  es la mínima potencia activa,  $\overline{r}_p$  la máxima potencia activa,  $\underline{r}_Q$  la mínima potencia reactiva,  $\overline{r}_Q$  la máxima potencia reactiva de los generadores ficticios. En este artículo,  $r_p^m$  se los considera directamente como PNS (16); por tal motivo se configura este parámetro en valores superiores a la carga total de sistema, ya que es de interés conocer la PNS asociada a cada topología del sistema de transmisión. Si bien la mínima potencia activa y reactiva no suministrada en la práctica carece de sentido, es importante configurar estos parámetros adecuadamente, ya que toman el papel de compensadores de potencia y por ende cambian los parámetros de tensión y flujos de potencia en las barras. En (13) se muestra el límite inferior y superior de los niveles de tensión en cada barra. La entidad reguladora del SEP es quien impone estos valores, los más recomendables son del  $\pm 5\%$  donde  $\underline{V}$  y  $\overline{V}$  son el nivel mínimo y máximo de tensión en la barra. Finalmente, en (14) y (15) representan las restricciones de cargabilidad de las líneas de transmisión donde  $S_{ij}$ ,  $S_{ji}$  y  $\bar{S}$  son la potencia aparente transmitida del nodo  $i$  al  $j$ , del nodo  $j$  al  $i$  y el límite de cargabilidad de la línea de transmisión respectivamente.

## VI. ALGORITMO DE SOLUCIÓN: NSGA II

Cuando el problema a optimizarse tiene más de una función objetivo, se debe considerar decisiones multicriterio; es decir cuando se obtiene una solución óptima para un objetivo, ésta puede o no ser la mejor para el resto de restricciones, por lo que es necesario buscar una solución en conjunto que satisfaga de forma óptima todo el problema [28].

Un problema multiobjetivo se representa de la siguiente manera:

$$\begin{aligned}
 &\text{Optimizar} \\
 &\min/\max: f_m(x), m = 1, 2, \dots, M \\
 &\text{Sujeto a:} \\
 &g_j(x) \geq 0, \quad j = 1, 2, \dots, J \\
 &h_k(x) \geq 0, \quad k = 1, 2, \dots, K \\
 &x_j^l \leq x \leq x_j^u, \quad i = 1, 2, \dots, n
 \end{aligned} \tag{18}$$

Para resolver el problema MOP planteado en (18), se debe introducir el concepto de dominancia, el cual nos permite clasificar las soluciones encontradas, basándose en los  $M$  objetivos del problema [29].

Se dice que una solución  $x^{(1)}$  dominada a otra solución  $x^{(2)}$ , si cumple las siguientes condiciones:

1. La solución  $x^{(1)}$  no es peor que  $x^{(2)}$  en todos los objetivos.
2. La solución  $x^{(1)}$  es estrictamente mejor que  $x^{(2)}$  en por lo menos un objetivo.

Si una de estas condiciones no se cumple, entonces la solución  $x^{(1)}$  no domina a la solución  $x^{(2)}$

Cuando en el análisis de dominancia entre dos soluciones, no cumple la primera condición para ninguna de las dos soluciones, se declara que las soluciones son no-dominadas. Al tener un numero finito de soluciones, encontraremos que un grupo de soluciones son no dominadas entre sí, es decir estas soluciones dominan al resto de soluciones que no pertenezcan a dicho grupo.

Al tener un conjunto de soluciones  $P$ , el conjunto de soluciones no dominadas  $P'$  está conformado por las soluciones que no son dominadas por ningún elemento del conjunto  $P$ , este conjunto se llama frente de Pareto. Cuando el conjunto  $P$  es el espacio de búsqueda, el conjunto no dominado  $P'$  resultante se denomina frente óptimo de Pareto [28].

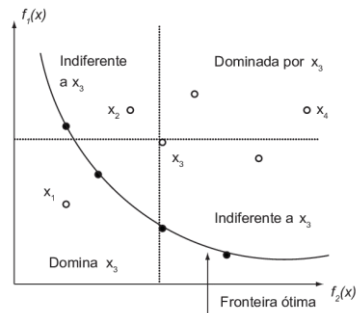


Fig. 3 Dominancia de soluciones encontradas

NSGA-II es uno de los algoritmos genéticos de optimización multiobjetivo más reconocidos actualmente, ya que cuenta con tres características fundamentales, un enfoque de clasificación rápido no dominado, un procedimiento de estimación de distancia rápido (*crowding distance*) y un operador de comparación simple [30].

El pseudocódigo del Algoritmo NSGA II es el siguiente.

Algoritmo NSGA II (G(N,E),s,T)

### Paso 1. Generación de la Población Inicial

#### Inicio

**Para** (cada  $t \in T$ ) haga

**Mientras que** (exista una ruta del nodo  $s$  a nodo  $t$ )

haga

Conjunto\_Rutas  $\leftarrow$  Ruta desde  $s$  hasta  $t$ ;

**Fin Mientras Que**

**Fin Para**

**Paso 2. Generar** aleatoriamente  $P_0$

**Paso 3. Hacer ordenamiento** rápido no dominado de  $P_0$

**Paso 4. Aplicar los operadores de selección, cruce y**

**mutación** para generar una población hija  $Q_0$

Hacer  $t \leftarrow 1$

Hacer  $R_t \leftarrow \emptyset$

## Paso 5. Bucle Iterativo

**Mientras Que**  $t < g_{max}$  y  $Cont\_Convergencia < g_{max}$

**Hacer**  $R_t \leftarrow P_t \cup Q_t$

Calcular el número de saltos y el retardo de los miembros  $R_t$

**F β Ordenamiento rápido no Dominado (R)**

**Mientras que**  $(|P_{t+1}| < N)$  hacer

Calcular Distancia Crowding ( $F_i$ )

$P_{t+1} \rightarrow P_{t+1} \cup F_i$

**Fin Mientras Que**

**Ordenar**  $P_{t+1}$  en forma descendente, utilizando el operador  $> \gamma$

**Escoger** los N primeros elementos de  $P_{t+1}$

**Generar**  $Q_{t+1}$ , aplicando los operadores de selección, cruce y mutación sobre  $P_{t+1}$

Hacer  $t \leftarrow t + 1$

**Fin Mientras Que**

**Fin** [31].

El procedimiento que el algoritmo NSGA-II realiza, tiene una serie de pasos:

### 1. Población

Se crea un vector de referencia, conforme las condiciones iniciales que se tiene en el problema; en base a este vector de referencia, se establecen de manera aleatoria N elementos de distintas configuraciones, esta es la población inicial que se ingresa en los parámetros del algoritmo.

Al ordenar estos elementos en función de su nivel de dominancia, el proceso elitista compara los resultados obtenidos en población actual con la población anterior, por lo que en cada iteración ésta se acerca al frente óptimo de Pareto.

Los individuos de la población pugnan entre ellos, con el fin de clasificarse conforme a su rango de no dominancia, donde mediante operaciones evolutivas crean un nuevo grupo de descendientes, que se dividen en frentes de Pareto [32].

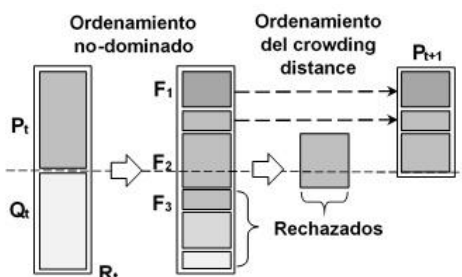


Fig. 4 Proceso de ordenamiento de la población

Para evitar tener aglomeraciones de resultados en un mismo punto, el algoritmo asigna a cada individuo de la población su rango y una distancia de hacinamiento (crowding distance), de

esta manera se alcanza una mejor distribución de las soluciones en el espacio.

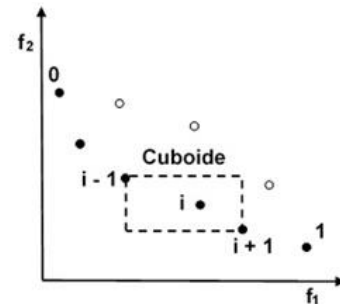


Fig. 5 Cálculo del Crowding Distance

### 2. Cruce

El cruce ocurre al tomar aleatoriamente dos individuos de la población (padres), a partir de estos se crean individuos (Hijos), los cuales tendrán características de ambos.

Padre [1 1 1 0 0 0 1 1 1] [0 0 0 1 1 1 0 0 0]

Madre [0 0 0 1 1 1 0 0 0] [1 1 1 0 0 0 1 1 1]

Hijo 1 [1 1 1 0 0 0 1 1 1] [1 1 1 0 0 0 1 1 1]

Hijo 2 [0 0 0 1 1 1 0 0 0] [0 0 0 1 1 1 0 0 0]

### 3. Mutación

La mutación consiste en alterar la cadena o cromosoma, para esto se cambia un bit de 0 a 1 o viceversa de un individuo elegido al azar. Este proceso ocurre después de cada cruce.

[1 0 1 0 0 1 1 0 1 0 1 0 1 0 1 0] [0 0 1 1 1 0 1]



[1 0 1 0 0 1 1 0 1 0 1 0 1 0 1 0] [1 0 1 1 1 0 1]

### 4. Criterio de Parada

El proceso de búsqueda debe seguirse ejecutando mientras exista una evolución de la población. Por lo tanto, el procedimiento acaba cuando se alcanza un número preestablecido de nuevas generaciones sin evoluciones o se llega al número máximo de iteraciones preestablecido [33].

### 5. Proceso de Selección en cada iteración

Al final de cada iteración se escogen las soluciones que tienen un menor rango de dominancia hasta lograr tener una población de igual tamaño, volviéndose a repetir el proceso de cruce y mutación hasta crear una descendencia de tamaño N [30][31].



## VII. RESULTADOS Y CASOS DE ESTUDIO

El sistema de Garver es muy utilizado para presentar los resultados obtenidos sobre PET, este sistema consta de 6 barras, 15 circuitos o líneas candidatas, 760 MW y 152 de MVar de demanda, potencia base de 100MVA, 1100 MW de generación máxima. En Tabla I podemos observar los parámetros principales del sistema de transmisión de dicho sistema. Si se requiere más información del sistema se puede encontrar en [34].

TABLA I

Datos de líneas de transmisión sistema Garver [34]

Línea	r	x	Límite de transmisión	Costo	Tipo
1-2	0.040	0.400	100	40	Fija
1-3	0.038	0.380	100	38	Candidata
1-4	0.060	0.600	80	60	Fija
1-5	0.020	0.200	100	20	Fija
1-6	0.068	0.680	70	68	Candidata
2-3	0.020	0.200	100	20	Fija
2-4	0.040	0.400	100	40	Fija
2-5	0.031	0.310	100	31	Candidata
2-6	0.030	0.300	100	30	Candidata
3-4	0.059	0.590	82	59	Candidata
3-5	0.020	0.200	100	20	Fija
3-6	0.048	0.480	100	48	Candidata
4-5	0.063	0.630	100	63	Candidata
4-6	0.030	0.300	100	30	Candidata

Los datos utilizados para la ejecución de NSGA II se muestran en la TABLA II.

TABLA II  
Datos de NSGA II

Caso de estudio	Garver
Población inicial	30
Generaciones	30
Circuitos máximos entre barras	5

Todos los datos mostrados anteriormente son utilizados tanto para evaluación de confiabilidad como para evaluación de emisiones de CO<sub>2</sub>.

#### A. Caso 1: Evaluación de confiabilidad

Los resultados obtenidos relacionados a costo de implementación y confiabilidad (PNS) se muestran en la TABLA III. En Figura (6) podemos ver estos datos que conforman el frente de Pareto de la solución al primer problema.

Como podemos observar en TABLA III y Figura (6), a medida que los costos de implementación del sistema de transmisión propuesto disminuyen, la PNS aumenta. Los costos disminuyen debido a que en cada iteración la población muta, es decir, se eliminan circuitos entre las barras, lo que permite optimizar este apartado. A la vez que disminuyen los costos de implementación del sistema de transmisión, como es de esperarse, incrementa la PNS; esto se debe a que el SEP pierde capacidad de transmisión de potencia entre las barras relacionadas a la generación y las barras relacionadas a la carga.

La solución del problema usa partículas con la información de las FO, el algoritmo busca las mejores soluciones posibles, lo

que se conoce como óptimo de Pareto; esto permite usar la información de las mejores partículas para su mutación y cruce, creando así una nueva generación de partículas mejores a la anterior.

El algoritmo muestra como soluciones a todas las partículas dominantes, lo que permite al profesional especializado en PET, identificar cuál de ellas es la que se ajusta más a sus necesidades particulares. Es importante recordar que en este trabajo no se ha tomado en cuenta un límite de PNS, sin embargo, para estudios comerciales, este apartado marcará una diferencia importante entre los resultados aquí mostrados y los deseados.

El indicador de PNS se puede limitar en cada una de las barras del SEP, esto es útil cuando hay cargas sensibles asociadas a las mismas. Esta limitación permite manejar diferentes índices de confiabilidad dependiendo de la carga que maneja cada barra, siendo las más sensibles las relacionadas al sector de la salud, industrial y comercial.

Al realizar estos ajustes es necesario configurar adecuadamente la distancia de hacinamiento, ya que las soluciones estarán mucho más cerca las unas de las otras.

La solución uno, dos y tres muestran una PNS de cero, que es lo ideal en un SEP, siendo la solución dos la recomendada a implementar, puesto que permite perder una línea de transmisión y aun así mantener un índice de confiabilidad excelente.

TABLA III

Resultados obtenidos del estudio de confiabilidad

Solución	Potencia no suministrada [MW]	Costo [M\$]
1	1.2298e-07	515
2	7.2297e-07	476
3	7.5019e-07	456
4	30.5054	416
5	47.4844	408
6	49.7007	368
7	65.0347	360
8	76.7884	340
9	77.8230	328
10	93.0338	320
11	93.9919	300
12	134.7641	280
13	135.7585	260
14	283.4403	250
15	283.5327	230



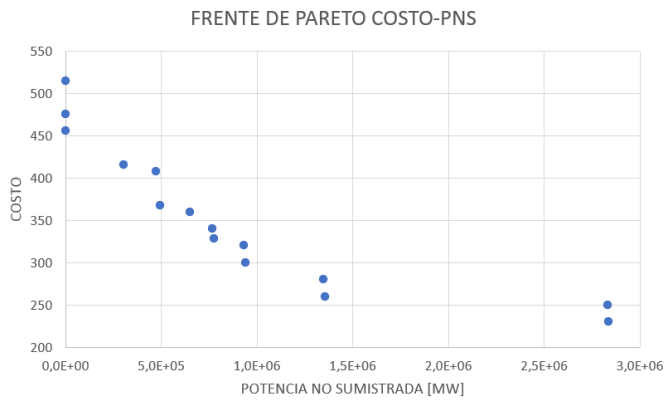


Fig. 6 Frente de Pareto Costo - PNS

En Tabla IV podemos identificar la topología relacionada a cada solución propuesta. Como podemos observar, existen 15 soluciones al problema planteado, cada una con los valores correspondientes a las FO descritas anteriormente en (1), (2) y (4).

TABLA IV  
Soluciones óptimas Costos – Potencia no suministrada

Solución #	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15
Potencia no suministrada [MW]	1.2298e-07	7.2297e-07	7.5019e-07	30.5054	47.4844	49.7007	65.0347	76.7884	77.8230	93.0338	93.9919	134.7641	135.7585	283.4403	283.5327
Costo [M\$]	515	476	456	416	408	368	360	340	328	320	300	280	260	250	230
Línea 1-2	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
Línea 1-3	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Línea 1-4	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
Línea 1-5	2	3	2	2	1	1	2	1	1	2	1	2	1	2	1
Línea 1-6	2	2	2	2	1	1	0	0	1	0	0	0	0	0	0
Línea 2-3	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
Línea 2-4	2	2	2	1	3	2	3	3	1	2	2	1	1	1	1
Línea 2-5	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Línea 2-6	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Línea 3-4	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Línea 3-5	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
Línea 3-6	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Línea 4-5	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Línea 4-6	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	1	1
Línea 5-6	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0

B. Caso 2: Evaluación de emisiones de CO<sub>2</sub>

TABLA V  
Emisiones de CO<sub>2</sub> por tipo de combustible [13].

La TABLA V contiene los datos relacionados a las emisiones de CO<sub>2</sub> de las unidades de generación por MWh dependiendo del tipo de combustible que esta quema para su operación.

ENERGÉTICO	Tm/MWh
Fuel oil	0.266743
Diesel oil	0.251687
Nafta	0.000251
Crudo	0.260296
Residuos	0.281998
Gas natural	0.178735
GLP	0.240789
Bagazo de caña	0.349423

Para el apartado de la solución COSTOS – EMISIONES DE CO<sub>2</sub> los resultados no son tan diversos como en el anterior caso, ya que estas emisiones dependen en gran medida de la carga de cada barra. Estos resultados podemos observar en la TABLA VI con su respectivo frente de Pareto en Figura (7).

Los resultados obtenidos del estudio de emisiones de CO<sub>2</sub> del sistema de generación no muestran variaciones considerables de emisiones entre las diferentes topologías propuestas. Las emisiones dependen principalmente de la carga del SEP y por lo tanto directamente del sistema de generación. Aunque estos resultados no son alentadores, la topología del sistema de transmisión muestra un impacto en las emisiones de CO<sub>2</sub> del SEP.

De forma similar al anterior caso, existen varias soluciones al problema planteado. Uno de los factores que contribuye al incremento de las emisiones de CO<sub>2</sub> son las pérdidas por efecto Joule. A medida que se retiran circuitos o líneas de transmisión entre las barras, la carga en las líneas de la topología que se mantiene en la siguiente iteración aumenta; por lo tanto, se incrementan las pérdidas en el sistema de transmisión.

Si bien el apartado de confiabilidad y emisiones de CO<sub>2</sub> son problemas diferentes, sería interesante desarrollar una formulación y metodología de solución para integrar estas consideraciones conjuntamente.

Otra posible ampliación de este estudio es relacionar las emisiones de CO<sub>2</sub> con energía generada en la vida útil del SEP, para conocer las emisiones totales de las diferentes topologías y a su vez considerar su participación en los mercados de carbono. Al tratarse de periodos superiores a los 30 años, la diferencia de emisiones de CO<sub>2</sub> entre las diferentes topologías puede representar una participación importante en mercados de carbono.

TABLA VI

Resultados obtenidos del estudio de emisiones de CO<sub>2</sub>.

Solución #	CO <sub>2</sub> [Tm/MWh]	Costo [MDD]
1	202.5626	1606
2	202.5635	1558
3	202.5750	1498
4	202.5875	1381
5	202.6090	1290
6	202.6094	1250
7	202.6750	1161
8	202.7596	1069
9	202.8473	980
10	202.8563	912
11	202.8781	852
12	202.9195	762
13	203.2059	702
14	203.2880	612
15	203.5778	569
16	204.3790	519

FRENTE DE PARETO COSTO-CO<sub>2</sub>

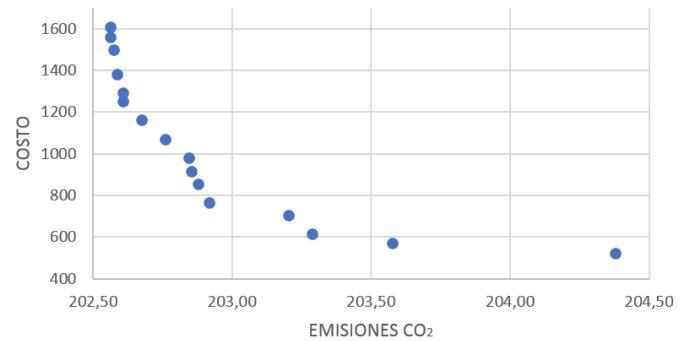


Fig. 7 Frente de Pareto Costo – CO<sub>2</sub>

En TABLA VII podemos observar la topología correspondiente a cada solución propuesta. En este caso de estudio es necesario configurar una distancia de hacinamiento adecuada, ya que la variación de los resultados de la FO (4) es muy pequeña; en los ensayos realizados se presentó un importante hacinamiento alrededor de una solución dominante.



TABLA VII  
Soluciones óptimas Costos – Emisiones de CO2

Solución #	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16
CO2 [Ton/MWh]	202.5626	202.5635	202.5750	202.5875	202.6090	202.6094	202.6750	202.7596	202.8473	202.8563	202.8781	202.9195	203.2059	203.2880	203.5778	204.37906
Costo [M\$]	1606	1558	1498	1381	1290	1250	1161	1069	980	912	852	762	702	612	569	519
Línea 1-2	4	4	4	4	3	3	3	3	1	1	1	1	1	1	1	1
Línea 1-3	4	4	4	3	3	3	3	3	0	0	0	0	0	0	0	0
Línea 1-4	3	3	2	3	2	2	2	2	2	2	1	1	1	1	1	1
Línea 1-5	3	3	3	3	3	3	3	3	1	1	1	1	1	1	1	1
Línea 1-6	3	3	3	2	2	2	1	2	1	0	0	0	0	0	0	0
Línea 2-3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	1	1
Línea 2-4	2	2	2	1	2	1	2	1	1	1	1	1	1	1	1	1
Línea 2-5	2	2	2	1	0	0	0	0	3	3	3	2	3	2	0	0
Línea 2-6	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	2
Línea 3-4	3	3	3	3	3	3	3	2	3	3	3	2	2	1	2	2
Línea 3-5	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	2
Línea 3-6	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Línea 4-5	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Línea 4-6	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	2	2	2	2
Línea 5-6	3	3	3	3	3	3	2	1	2	2	2	2	1	1	1	1

### VIII. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

La solución del PET considerando el indicador de confiabilidad PNS presentado en este trabajo, al ser multiobjetivo, tiene la ventaja de que se puede obtener los valores de las funciones objetivo para diferentes topologías, lo que permite al planificador conocer diferentes escenarios sin la necesidad de correr varias veces el programa. Esta característica es de especial importancia ya que permite conocer el comportamiento del SEP frente a diferentes contingencias sin necesidad de realizar un estudio específico.

Las emisiones de CO2 en el SEP son debidas, en su inmensa mayoría, al sistema de generación. Si bien la topología del sistema de transmisión influye en las emisiones de CO2, este impacto no es significativo. Si es de mayor interés este apartado, se debe realizar un estudio económico relacionado a la vida útil de la infraestructura del SEP, ya que, a largo plazo, estas emisiones se acumulan, llegando a ser interesante su participación en mercados de carbono.

Para los dos estudios realizados se recomienda ampliar su alcance con planificación dinámica en un horizonte comparable con la vida útil de la infraestructura del SEP. Si bien en la actualidad estos estudios demandan mucha capacidad de cómputo, en un futuro se contará con mejores herramientas computacionales.

La solución del PET mediante planteamiento multiobjetivo permite conocer el comportamiento del SEP en diferentes escenarios a la vez, presentando siempre las soluciones óptimas a cada FO. Los estudios de interés pueden abarcar pero no limitarse al campo energético, social o incluso estético, ya que, en diferentes ubicaciones geográficas estos impactos pueden ser determinantes al momento de implementar una solución

### IX. BIBLIOGRAFÍA

- [1] Billinton R, Salvaderi L, McCalley JD, Chao H, Seitz Th, Allan RN, et al. Reliability issues in today's electric power utility environment. IEEE Trans Power Syst 1997;12(4):1708–14
- [2] Chowdhury AA, Koval DO. Value-based system facility planning. IEEE Power Energy Mag 2004;2(5):58–67
- [3] Hemmati R, Hooshmand RA, Khodabakhshian A (2013) Comprehensive review of generation and transmission expansion planning. IET Gener Transm Distrib 7(9):955–964
- [4] T.A.M. Sharaf and G.J. Berg, "Reliability optimization for Transmission Expansion Planning", IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems, Vol. PAS-101, No. 7 July 1982
- [5] Shalash NA, Bin Ahmad AZ (2014) Agents for fuzzy indices of reliability power system with uncertainty using Monte Carlo algorithm. In: Proceedings of the IEEE 8th international power engineering and optimization conference (PEOCO'14), Langkawi, 24–25 Mar 2014, pp 258–264
- [6] Benidris M, Mitra J (2014) Reliability and sensitivity analysis of composite power systems under emission constraints. IEEE Trans Power Syst 29(1):404–412

- [7] da Silva AML, Rezende LS, Manso LAF et al (2010) Transmission expansion planning: A discussion on reliability and “N-1” security criteria. In: Proceedings of the IEEE 11th international conference on probabilistic methods applied to power systems (PMAPS’10), Singapore, 14–17 Jun 2010, pp 244–251
- [8] Aghaei J, Amjady N, Baharvandi A et al (2014) Generation and transmission expansion planning: MILP-based probabilistic model. *IEEE Trans Power Syst* 29(4):1592–1601
- [9] da Rocha MC, Saraivab JT (2012) A multiyear Dynamic transmission expansion planning model using a discrete based EPSO approach. *Electr Power Syst Res* 93:83–92
- [10] Orfanos GA, Georgilakis PS, Hatziaargyriou ND (2013) Transmission expansion planning of systems with increasing wind power integration. *IEEE Trans Power Syst* 28(2):1355–1362
- [11] Shortle J, Rebennack S, Glover FW (2014) Transmission capacity expansion for minimizing blackout probabilities. *IEEE Trans Power Syst* 29(1):43–52
- [12] Leite da Silva AM, Manso LAF, Resende LC, Rezende LS. Tabu search applied to transmission expansion planning considering losses and interruption costs. In: 10th International conference on probabilistic methods applied to power systems, PMAPS; 2008
- [13] P. A. Morales, A. M. Valladarez, “Determinación de las emisiones de contaminantes atmosféricos producidas por centrales térmicas en el Ecuador en el periodo 2002-2010”, Universidad de Cuenca, 2012
- [14] Karaki SH, Chaaban FB, Al-Nakhl N, Tarhini KA. Power generation expansion planning with environmental consideration for Lebanon. *Int J Electr Power Energy Syst* 2002;24:611–9
- [15] Chang MS. A scenario-based mixed integer linear programming model for composite power system expansion planning with greenhouse gas emission controls. *Clean Energy Environ Policy* 2014;16:1001–14.
- [16] Sadegheih A. A novel formulation of carbon emissions costs for optimal design configuration of system transmission planning. *Renew Energy* 2010;35:1091–7
- [17] Lu S, Wu Y, Lou S, Yin X. A model for power system transmission network expansion planning under low-carbon economy. *IEEE Power and Energy Society General Meeting*; 2013
- [18] LI, Chengxin; CHEN, Guo; LIU, Junyong (2014). A new method of enhancing reliability for transmission expansion planning. *Journal of Modern Power Systems and Clean Energy*, 2(4), 341–349. doi:10.1007/s40565-014-0080-0
- [19] R. Billinton and R. N. Allan, *Reliability Evaluation of Power Systems*, 2nd ed., Springer, Ed., Aug. 1996.
- [20] Kounis, Leo (2020). Reliability and Maintenance - An Overview of Cases. *Reliability Evaluation of Power Systems*. ,10.5772/intechopen.77493(Chapter 8), -. doi:10.5772/intechopen.85571
- [21] CIGRE WG 38.03, “Power system reliability analysis application guide,” 1987, vol. 38.
- [22] EPRI, “Strategic Insights on Security, Quality, Reliability, and Availability,” in 1008566, 2005.
- [23] K. Debnath; L. Goel (1995). Power system planning — a reliability perspective., 34(3), 179–185. doi:10.1016/0378 7796(95)00976-x
- [24] Secretary of state for trade and industry UK. Our energy future – creating a low carbon economy; 2003. p. 1–20
- [25] U.S. Environmental Protection Agency. Terms of Environment: Glossary, Abbreviations and Acronyms 2007. Available from: <https://www.epa.gov/nscep>
- [26] World Health Organization (2006). Air Quality Guidelines, Global Update 2005. Available: [https://www.euro.who.int/data/assets/pdf\\_file/0005/78638/E90038.pdf](https://www.euro.who.int/data/assets/pdf_file/0005/78638/E90038.pdf)
- [27] Sánchez Barboza, L., Lucena Mogollón, M. G., & Vásquez Stanescu, C. (2018). Emisiones de mercurio por uso de las lámparas fluorescentes compactas y por generación de energía eléctrica a base de combustibles fósiles. *REVISTA CIENTÍFICA ECOCIENCIA*, 4(5), 1–18. <https://doi.org/10.21855/ecociencia.45.51>
- [28] C. A. Correa Florez, R. A. Bolaños y A. C. Molina , «Algoritmo multiobjetivo NSGA-II aplicado al problema de la mochila.» *Scientia et Technica* Año XIV, nº 39, pp. 206 - 211, 2008.
- [29] Eckart Zitzler and Lothar Thiele, “Multiobjective Evolutionary Algorithms: A Comparative Case Study and the Strength Pareto Approach”, *IEEE Transactions on Evolutionary Computation*, Vol. 3, No. 4, november 1999
- [30] K. Deb, A. Pratap, S. Agarwal y T. Meyarivan, «A Fast and Elitist Multiobjective Genetic Algorithm: NSGA - II.» *IEEE TRANSACTIONS ON EVOLUTIONARY COMPUTATION*, vol. 6, nº 2, pp. 182 -197, 2002.
- [31] Claudia M Subía P. “DESARROLLO DE UNA GUÍA METODOLÓGICA SOBRE COMPUTACIÓN EVOLUTIVA Y ALGORITMOS GENÉTICOS, PARA LA OPTIMIZACIÓN EVOLUTIVA MULTIOBJETIVO”. Quito, 2014.
- [32] C. A. Coello Coello, G. B. Lamont y D. A. Van Veldhuizen, *Evolutionary Algorithms for Solving Multi - Objective Problems*, USA: IlliGAL, 2002.
- [33] Stalin F. Banegas D., Tatiana M. Proaño B. “Operación óptima del Sistema de Subtransmisión de la Empresa Eléctrica Regional CENTROSUR C.A en base a la confiabilidad”. Cuenca, 2021.
- [34] Nestor G. Cabrera, L.Fernando Fuerte y Guillermo G. Alcaraz. “Planeamiento de la Expansión de la transmisión con reforzamiento de la red a partir de la evaluación de confiabilidad”. *Scientia et Technica*, Vol 20, No. 2, junio 2015