



UNIVERSIDAD DE CUENCA
Facultad de Ingeniería
Carrera de Ingeniería Eléctrica

“Impacto de la generación distribuida en el planeamiento de la expansión de los sistemas de transmisión”

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

Autor: Nelson Esteban Matute Alvarado

C.I. 010545870-7

Director: Dr.- Ing. Santiago Patricio Torres Contreras

C.I. 010244895-8

Cuenca - Ecuador

2018



RESUMEN

El Planeamiento de la Expansión de los Sistemas de Transmisión (PET) consiste en determinar la topología óptima de la red de transmisión para satisfacer la demanda eléctrica proyectada en un determinado horizonte de tiempo. El plan óptimo se obtiene minimizando los costos de inversión de infraestructura de transmisión y cumpliendo todos los requerimientos técnicos del sistema eléctrico. Actualmente, el avance tecnológico ha reducido notablemente los costos de inversión de Generación Distribuida (GD), lo que permite que este nuevo enfoque sea una alternativa al enfoque tradicional de generación centralizada. La incidencia de GD en el sistema eléctrico podría evitar la adición de nuevos circuitos de transmisión, lo cual significa el poder diferir las inversiones en el sistema representando un posible ahorro económico. Este trabajo estudia el impacto económico de la GD en el PET considerando un planeamiento estático a largo plazo y usando el modelo matemático AC. El PET, usando el modelo AC, corresponde a un problema de programación no lineal entera mixta (PNLEM), el cual será resuelto mediante la meta-heurística que mejor desempeño presente, entre ellas: Búsqueda Tabú (TS, siglas en inglés) y Algoritmo de Cardumen de Peces Artificiales (AFSA, siglas en inglés), aplicado los sistemas de prueba de Garver de 6 barras e IEEE de 24 barras. La GD será modelada como la suma de cada tipo de tecnología de generación a pequeña escala concentrada en la barra de distribución.

Palabras clave: Algoritmo de cardumen de peces artificiales, Búsqueda Tabú, Generación distribuida, Modelo AC, Planeamiento de la expansión, Sistemas de energía eléctrica, Transmisión.



ABSTRACT

The Transmission System Expansion Planning (TEP) consists of determining the optimal topology of the transmission network which goal is to satisfy the electrical demand projected in a certain time horizon. The optimal plan is obtained by minimizing the investment costs of transmission infrastructure and fulfilling all the technical requirements of the electrical system. Currently, technological developments have significantly reduced the investment costs of Distributed Generation (DG), which allows this new approach to be an alternative to the traditional approach of centralized generation. The incidence of GD in the electrical system could avoid the addition of new transmission circuits, which, in turn, could help to defer investments in the electrical system representing a possible saving. This work studies the economic impact of DG on TEP considering a long-term static planning (10 years) and using the mathematical AC model. The TEP, using the AC model, corresponds to a non-linear mixed-integer programming (MINLP) problem which is solved by the meta-heuristic that presents the best performance: Tabu Search (TS) and Artificial Fish Swarm Algorithm (AFSA). The results are obtained using Garver 6 - buses and IEEE 24 - buses test systems. DG is modeled as the summation of each type of small-scale generation technology concentrated in the distribution node.

Key words: AC model, Artificial fish swarm algorithm, Distributed generation, Electric power systems, Expansion planning, Tabu search, Transmission.



Tabla de contenido

CAPÍTULO 1.....	16
INTRODUCCIÓN	16
Justificación	19
Alcance.....	19
Objetivos General	20
Objetivos específicos	20
Contenido	21
CAPÍTULO 2.....	22
PLANEAMIENTO DE LA EXPANSIÓN DEL SISTEMA DE TRANSMISIÓN DE ENERGÍA ELÉCTRICA Y GENERACIÓN DISTRIBUIDA.	22
2.1 SISTEMA ELÉCTRICO DE POTENCIA	22
2.1.1 Estructura de un Sistema de Potencia	22
2.1.2 Planeamiento del Sistema Eléctrico de Potencia	23
2.1.3 Planeamiento de los Sistemas de Transmisión vs. Distribución.....	27
2.2 GENERACIÓN DISTRIBUÍDA (GD)	33
2.2.1 Historia de la Generación Distribuida [12] [13]	33
2.2.2 Concepto de la generación distribuida.	34
2.2.3 Generación Distribuida de Energías Renovables: Costos Estimados de Inversión.....	36
2.2.4 Impacto de la GD en el SEP	38
2.2.5 Estado del arte del impacto de la GD en el PET	38
CAPÍTULO 3.....	40
FORMULACIÓN MATEMÁTICA	40
3.1 Modelo de Transportes, Híbrido No Lineal, Híbrido Lineal	40
3.2 Generadores Artificiales (GA)	42
3.3 Modelo DC	43
3.4 Modelo AC	44
3.4.1 Modelo matemático	44



CAPÍTULO 4.....	51
IMPLEMENTACIÓN DEL PROBLEMA	51
4.1 Notación	51
4.2 Búsqueda Tabú (TS) [5] [36].....	52
4.3 Algoritmo de Cardumen de Peces Artificiales (AFSA) [5]	54
4.3.1 Comportamiento Aleatorio	56
4.3.2 Comportamiento Persecución.....	57
4.3.3 Comportamiento Cardumen.....	58
4.3.4 Comportamiento Búsqueda	58
4.3.5 Comportamiento Saltarín	59
4.3.6 Resumen de AFSA	60
4.4 Implementación de TS y AFSA en el PET.....	62
4.4.1 Cargar los datos del SEP a resolver	62
4.4.2 Configuración de parámetros generales	63
4.4.3 Ajuste de parámetros de sintonización de TS y AFSA	63
4.4.4 Creación de la población inicial	64
4.4.5 Evaluación de la población inicial	66
4.4.6 Proceso de optimización de cada meta-heurística.....	66
4.4.7 Evaluación del criterio de parada.....	68
4.4.8 Evaluación de la nueva población.....	68
4.4.9 Diagramas de flujo.....	68
CAPÍTULO 5.....	71
PRUEBAS Y RESULTADOS.....	71
5.1 Sistemas de prueba	71
5.1.1 Sistema Garver de 6 barras.....	71
5.1.2 Sistema IEEE de 24 barras.....	71
5.2 Comparación entre meta-heurísticas TS y AFSA	71
5.3 Pruebas.....	76
5.4 PET sin GD	77



5.4.1	Sistema Garver de 6 nodos sin GD (Garver_sin_GD).....	77
5.4.2	Sistema IEEE de 24 nodos sin GD (IEEE24_sin_GD)	79
5.5	PET con GD	81
5.5.1	Sistema Garver de 6 nodos con GD	81
5.5.2	Sistema IEEE de 24 nodos con GD	92
CAPÍTULO 6		101
CONCLUSIONES		101
6.1	Conclusiones	101
6.2	Trabajos futuros.....	102
ANEXOS		104
Anexo A		104
A.1	Datos del Sistema Garver de 6 barras.....	104
A.2	Datos de GD del Sistema Garver de 6 barras con GD en las barras 2, 4 y 5	105
A.3	Datos de GD del Sistema Garver de 6 barras con GD en todas las barras con demanda de potencia activa	105
Anexo B		106
B.1	Datos del Sistema IEEE de 24 barras.....	106
B.2	Datos de GD del Sistema IEEE de 24 barras con GD en todas las barras con demanda de potencia activa	108



Lista de figuras

Figura 2.1 Planeamiento del Sistema Eléctrico de Potencia	24
Figura 3.1 Esquema de un sistema eléctrico de potencia con la presencia de generadores distribuidos (GD) en el Sistema de Distribución.....	49
Figura 3.2 Sistema eléctrico de potencia que considera GD concentrada en la barra del Sistema de Distribución.....	50
Figura 4.1 Diagrama de flujo de la implementación de la meta-heurística Búsqueda Tabú en el Planeamiento de la Expansión de los Sistemas de Transmisión	69
Figura 4.2 Diagrama de flujo de la implementación de la meta-heurística Algoritmo de Cardumen de Peces Artificiales el Planeamiento de la Expansión de los Sistemas de Transmisión	70
Figura 5.1 Proceso de optimización del algoritmo TS considerando 10 experimentos (exp) y 100 iteraciones.....	74
Figura 5.2 Proceso de optimización del algoritmo AFSA considerando 10 experimentos (exp) y 100 iteraciones.....	75
Figura 5.3 Proceso de convergencia del mejor experimento de AFSA en el Sistema Garver de 6 barras sin considerar la presencia de GD.	79
Figura 5.4 Proceso de convergencia del mejor experimento de AFSA en el Sistema IEEE de 24 barras sin considerar la presencia de GD.	81
Figura 5.5 Proceso de convergencia del mejor experimento de AFSA en el escenario Garver_GD_1.	84
Figura 5.6 Proceso de convergencia del mejor experimento de AFSA en el escenario Garver_GD_2.	86
Figura 5.7 Proceso de convergencia del mejor experimento de AFSA en el escenario Garver_GD_3.	88
Figura 5.8 Variación del costo total (Ctotal) y del PET (Inv. PET) en función del decremento del costo de inversión de GD (Inv. GD). Reducción de 0%, 50% y 75% en los escenarios Garver_GD_1, Garver_GD_2 y Garver_GD_3 respectivamente.	89



Figura 5.9 Proceso de convergencia del mejor experimento de AFSA en el escenario Garver_GD_4.	91
Figura 5.10 Proceso de convergencia del mejor experimento de AFSA en el escenario IEEE_GD_1	94
Figura 5.11 Proceso de convergencia del mejor experimento de AFSA en el escenario IEEE24_GD_2.	96
Figura 5.12 Proceso de convergencia del mejor experimento de AFSA en el escenario IEEE24_GD_3	98
Figura 5.13 Variación del costo total (Ctotal) y del PET (Inv. PET) en función del decremento del costo de inversión de GD (Inv. GD). Reducción de 0%, 50% y 75% en los escenarios IEEE24_GD_1, IEEE24_GD_2 y IEEE24_GD_3 respectivamente.....	99



Lista de tablas

Tabla 2.1 Costos estimados de inversión de generación distribuida de energía renovable.	37
Tabla 5.1 Desempeño de TS en el escenario de comparación de las técnicas meta-heurísticas.	73
Tabla 5.2 Parámetros de sintonización de AFSA en el sistema Garver de 6 barras considerando el escenario de comparación de las técnicas meta-heurísticas.	74
Tabla 5.3 Desempeño de AFSA en el escenario de comparación de las técnicas meta-heurísticas.	75
Tabla 5.4 Parámetros de sintonización de AFSA para los escenarios del Sistema Garver de 6 nodos.	77
Tabla 5.5 Parámetros de sintonización de AFSA para los escenarios del Sistema IEEE de 24 nodos.	77
Tabla 5.6 Desempeño de AFSA en el Sistema Garver sin límite de reactivos y sin considerar la presencia de GD.	78
Tabla 5.7 Costos del PET del Sistema Garver sin límite de reactivos y sin considerar la presencia de GD.	78
Tabla 5.8 Desempeño de AFSA en el Sistema IEEE de 24 barras sin límite de reactivos y sin considerar la presencia de GD.	80
Tabla 5.9 Costos del PET del Sistema IEEE de 24 barras sin límite de reactivos y sin considerar la presencia de GD.	80
Tabla 5.10 Costos del PET del escenario Garver_GD_1 sin límite de reactivos...	82
Tabla 5.11 Costos de inversión y potencia óptima de GD del escenario Garver_GD_1 sin límite de reactivos.	83
Tabla 5.12 Costo total de la función objetivo del escenario Garver_GD_1 sin límite de reactivos.	83
Tabla 5.13 Costos del PET del escenario Garver_GD_2 sin límite de reactivos...	85



Tabla 5.14 Costos de inversión y potencia óptima de GD del escenario Garver_GD_2 sin límite de reactivos.....	85
Tabla 5.15 Costo total de la función objetivo del escenario Garver_GD_2 sin límite de reactivos.....	85
Tabla 5.16 Costos del PET del escenario Garver_GD_3 sin límite de reactivos...	87
Tabla 5.17 Costos de inversión y potencia óptima de GD del escenario Garver_GD_3 sin límite de reactivos.....	87
Tabla 5.18 Costo total de la función objetivo del escenario Garver_GD_3 sin límite de reactivos.....	87
Tabla 5.19 Costos del PET del escenario Garver_GD_4 sin límite de reactivos...	90
Tabla 5.20 Costos de inversión y potencia óptima de GD del escenario Garver_GD_4 sin límite de reactivos.....	90
Tabla 5.21 Costo total de la función objetivo del escenario Garver_GD_3 sin límite de reactivos.....	91
Tabla 5.22 Resumen comparativo de los escenarios del Sistema Garver todos sin límites de reactivos.	92
Tabla 5.23 Costos de inversión y potencia óptima de GD del escenario IEEE24_GD_1 sin límite de reactivos.	93
Tabla 5.24 Costo total de la función objetivo del escenario IEEE24_GD_1 sin límite de reactivos.....	93
Tabla 5.25 Costos de inversión y potencia óptima de GD del escenario IEEE24_GD_2 sin límite de reactivos.	95
Tabla 5.26 Costo total de la función objetivo del escenario IEEE24_GD_2 sin límite de reactivos.....	95
Tabla 5.27 Costos de inversión y potencia óptima de GD del escenario IEEE24_GD_3 sin límite de reactivos.	97
Tabla 5.28 Costo total de la función objetivo del escenario IEEE24_GD_3 sin límite de reactivos.....	97



Tabla 5.29 Resumen comparativo de los escenarios del Sistema IEEE de 24 barras todos sin límites de reactivos. 100



Lista de Algoritmos

Algoritmo 4.1 Búsqueda Tabú (TS) básico.....	53
Algoritmo 4.2 Comportamiento aleatorio del AFSA.	57
Algoritmo 4.3 Comportamiento saltarín del AFSA.	60
Algoritmo 4.4 Algoritmo de Cardumen de Peces Artificiales para minimizar una función n-dimensional $f(x)$, donde x_i es la i-ésima solución candidata.	61
Algoritmo 4.5 Creación de soluciones iniciales.....	66



Cláusula de licencia y autorización para publicación en el Repositorio Institucional

Nelson Esteban Matute Alvarado en calidad de autor y titular de los derechos morales y patrimoniales del trabajo de titulación "Impacto de la generación distribuida en el planeamiento de la expansión de los sistemas de transmisión", 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, 15 de agosto de 2018

Nelson Matute A.

Nelson Esteban Matute Alvarado

C.I: 010545870-7



Cláusula de Propiedad Intelectual

Nelson Esteban Matute Alvarado, autor del trabajo de titulación "Impacto de la generación distribuida en el planeamiento de la expansión de los sistemas de transmisión", certifico que todas las ideas, opiniones y contenidos expuestos en la presente investigación son de exclusiva responsabilidad de su autor.

Cuenca, 15 de agosto de 2018

Nelson Matute A.

Nelson Esteban Matute Alvarado

C.I: 010545870-7



Dedicatoria

A mi querida abuela Lui QEPD y a la vida.



Agradecimientos

A mis padres Nelson y María por brindarme su apoyo incondicional que fue y será primordial para el logro de mis éxitos.

De igual manera, quiero agradecer a todos los maestros, ya que con sus enseñanzas guiaron y expandieron mi conocimiento en este hermoso y extenso universo del saber.



CAPÍTULO 1

INTRODUCCIÓN

Un sistema eléctrico de potencia (SEP) tiene como objetivo brindar un suministro de energía eléctrica considerando aspectos como confiabilidad, calidad de la energía, mínimo impacto ambiental y menor costo posible. Un SEP se divide en tres etapas o subsistemas: Generación, Transmisión y Distribución.

La etapa de generación tiene como objetivo convertir a energía eléctrica algún otro tipo de energía primaria (química, cinética, nuclear, lumínica, etc.) con el objetivo de satisfacer la demanda eléctrica.

La función de la etapa de transmisión es transportar la energía eléctrica desde las centrales de generación hasta los diferentes centros de consumo, con la ayuda de transformadores elevadores (subestaciones elevadoras) y líneas (sistema aéreo) o cables (sistema subterráneo).

La última etapa del SEP es el sistema de distribución que se encarga de “repartir” la energía transportada desde las plantas de generación hacia los diferentes usuarios satisfaciendo así la demanda eléctrica. Esta energía es transformada desde niveles de voltaje de transmisión a niveles de distribución (menores voltajes) mediante subestaciones reductoras.

De esta forma, las diferentes etapas del SEP cumplen el objetivo principal de abastecer la demanda de energía eléctrica requerida producto de un proceso de optimización técnico, económico y ambiental.

Debido al continuo crecimiento de la demanda eléctrica es necesario planear también la expansión en los diferentes elementos del SEP con el fin de satisfacerla en las mejores condiciones.

El horizonte de tiempo del planeamiento se define en función del tipo de acción requerida para el funcionamiento óptimo del SEP, y se lo clasifica en horizontes de Corto (1 día a 5 años), Mediano (5 a 10 años) y Largo plazo (10 a 15 años) [1], aunque esto depende de las condiciones y regulaciones de cada país. El pronóstico a largo plazo comprende actividades de inversión (expansión) de infraestructura para las diferentes etapas del sistema eléctrico de potencia.

También se puede clasificar al planeamiento del sistema en Estático y Dinámico. Un planeamiento estático resuelve el problema para un único horizonte de tiempo respondiendo preguntas como: ¿qué elementos se deben adicionar? ¿dónde se debe adicionar infraestructura?, ¿cuántos elementos se deben instalar?, sin considerar el tiempo como una variable de decisión. Por otra parte, un planeamiento dinámico responde además a la pregunta de ¿cuándo sería necesario llevar a cabo los diferentes cambios en la infraestructura del SEP dentro del horizonte de estudio?, es decir, el tiempo es una variable influyente en la toma de decisiones [2].

El presente trabajo estudia el problema del planeamiento estático de la expansión de los sistemas de transmisión a largo plazo, buscando resolver óptimamente las siguientes preguntas: ¿cuántos circuitos se debe adicionar al sistema?, ¿en dónde debe ocurrir estas inversiones?

Los factores influyentes en la resolución del problema de planeamiento de expansión de los sistemas de transmisión (PET) son: la topología de red (SEP) existente, el pronóstico de carga (demanda eléctrica), el plan de expansión del sistema de generación (PEG) y el plan de expansión de las subestaciones eléctricas (PES).

Normalmente, el agente planeador del SEP (en generación y transmisión) no toma en cuenta que sucede en el caso de la penetración de Generación Distribuida (GD) en el sistema de distribución. Las nuevas tecnologías referentes a la generación a pequeña escala cercanos a los centros de consumo (generación

distribuida) podrían aportar energía eléctrica a la red de distribución, influyendo directamente en el PET [3].

El incremento de GD en los sistemas de distribución podría hacer que no sea necesario transportar demasiada potencia activa (y/o reactiva) a la carga por medio del sistema de transmisión, lo cual haría que no sea necesario invertir en la construcción de nuevos circuitos de transmisión y se puedan diferir estas inversiones. Por lo tanto, es de interés para el agente de planeamiento del sistema de transmisión analizar cómo afecta en los planes de expansión del sistema de transmisión la inclusión en los sistemas de distribución de determinadas cantidades de generación distribuida.

Por otro lado, existen varios modelos para realizar el planeamiento de la expansión de un sistema eléctrico de transmisión entre los más importantes: modelo de corriente alterna (AC), modelo de corriente continua (DC), híbrido lineal, híbrido no lineal, modelo de transporte. Este trabajo tratará el modelo AC, siendo de interés debido a las ventajas que presenta frente a los diferentes modelos: incluye la potencia reactiva en el PET, permite un análisis completo de las pérdidas de potencia por transmisión, etc. El modelo AC resulta en un planeamiento más realista que usando el modelo DC.

El problema de planeamiento de la expansión de los sistemas de transmisión usando el modelo AC [4] es muy complejo y resulta en un problema combinatorial, no-lineal, no-convexo, entero mixto. Para resolver el problema, las técnicas meta-heurísticas han mostrado, en ciertos casos, ser más eficientes que otros métodos de optimización en la resolución del problema de planeamiento [5] [6] [7]. Este trabajo, considerará dos técnicas meta-heurísticas para la resolución del modelo matemático:

1. Búsqueda de Tabú (TS, siglas en inglés).
2. Algoritmo de Cardumen de Peces Artificiales (AFSA, siglas en inglés).



Los resultados de una meta-heurística en general, dependen del problema a resolver. Por lo tanto, en el presente trabajo se seleccionará la técnica que mejor se adapte al problema.

Justificación

El PET tiene como objetivo determinar el plan óptimo a nivel de transmisión que satisfaga una demanda eléctrica proyectada a largo plazo y que cumpla con todos los requerimientos técnicos, económicos y ambientales a los que se encuentra ligado. Actualmente, la continua reducción de los costos relacionados a la GD, hacen que este nuevo enfoque sea bastante atractivo para los agentes planeadores del sistema eléctrico. Esto debido a los posibles beneficios que podría representar el impacto de la GD en el PET, como es: reducción de pérdidas de transmisión, prórroga de la expansión de la infraestructura de los sistemas de transmisión, reducción o descarto de adición de circuitos de transmisión.

En función del modelo del sector eléctrico, este trabajo puede contribuir tanto para un sector verticalmente integrado (mercado eléctrico centralizado) como para un mercado eléctrico libre. En un mercado centralizado el agente planificador podría elegir cuanto invertir en infraestructura de transmisión o en GD. Por otra parte, en un mercado eléctrico libre, la transmisora podría incentivar la inversión de GD en el sistema de distribución con el objetivo de evitar o aplazar la expansión del sistema de transmisión.

Alcance

Considerando la posibilidad de que la GD impacte en el PET evitando la adición de circuitos de transmisión, surge la propuesta de este trabajo: estudiar el impacto económico de la Generación Distribuida en el Planeamiento de la Expansión de los Sistemas de Transmisión. Para ello, se aplicará las técnicas meta-heurísticas: Algoritmo de Cardumen de Peces Artificiales (AFSA) y Búsqueda de Tabú. Posteriormente, se seleccionará la técnica que mejor se adapte a la

resolución de un PET estático a largo plazo (10 años) representado mediante el modelo AC y que, adicionalmente considera el aporte de la GD.

Los datos necesarios para resolver el PET: topología inicial del sistema, pronóstico del crecimiento de la demanda, planeamiento de generación (considerando GD), planeamiento de subestaciones, costos de la adición de circuitos de transmisión; se asumen conocidos.

Las técnicas meta-heurísticas se implementarán en el software MATLAB, y conjuntamente con el paquete MATPOWER se resolverá optimizar el flujo óptimo de potencia. Se considerarán los siguientes sistemas de prueba: sistema Garver de 6 nodos y sistema IEEE de 24 nodos; en los que adicionalmente se incluirán nuevos generadores referentes a la GD.

Objetivos General

Establecer el impacto de la Generación Distribuida en el Planeamiento de la Expansión de los Sistemas de Transmisión, considerando un PET estático a largo plazo usando el modelo AC, usando el algoritmo de optimización que mejor se adapte al problema; para lo cual, se propusieron las meta-heurísticas: AFSA y Búsqueda Tabú.

Objetivos específicos

- Considerar en el problema de planeamiento de la expansión el impacto de la generación distribuida.
- Usar el modelo AC del SEP y la meta-heurística que mejor se adapte al problema, entre ellas: Búsqueda Tabú y Algoritmo de Cardumen de Peces Artificiales, para resolver el problema del Planeamiento de la Expansión de los Sistemas de Transmisión considerando penetración de GD.



- Usar el modelo AC del SEP y la técnica de optimización meta-heurística Búsqueda de Tabú para resolver el problema del Planeamiento de la Expansión de los Sistemas de Transmisión considerando penetración de GD.

Contenido

El capítulo 1 trata la descripción del problema, el alcance, y los objetivos que se persiguen con este proyecto técnico. En el capítulo 2 se estudia el problema de planeamiento, iniciando con un enfoque más general que es el planeamiento del sistema eléctrico de potencia hasta el tema de interés que es el planeamiento de la expansión de los sistemas de transmisión. En ese mismo capítulo se revisa la teoría del impacto de la generación distribuida en el TEP y el estado del arte. El capítulo 3 estudia la formulación matemática aplicada en la resolución del problema de del PET, en especial del modelo matemático de flujos de carga AC. La descripción de la implementación de los algoritmos de optimización para la solución al problema del PET mediante las técnicas AFSA y Búsqueda de Tabú se presentan en el capítulo 4. Por otra parte, en el capítulo 5 se analiza los resultados obtenidos usando los algoritmos y se comparan usando diferentes escenarios en la resolución del problema del PET. Por último, en el capítulo 6 se presentan las conclusiones y recomendaciones de trabajos futuros.

CAPÍTULO 2

PLANEAMIENTO DE LA EXPANSIÓN DEL SISTEMA DE TRANSMISIÓN DE ENERGÍA ELÉCTRICA Y GENERACIÓN DISTRIBUIDA.

2.1 SISTEMA ELÉCTRICO DE POTENCIA

Un Sistema Eléctrico de Potencia (SEP) está compuesto por un sinnúmero de elementos, entre los principales y más importantes tenemos [8]:

- Instalaciones de Generación
 - Centralizadas
 - Distribuidas (nuevo enfoque)
- Instalaciones de Transmisión
 - Subestaciones (S/E)
 - Redes: líneas (sistema aéreo), cables (sistema subterráneo)
- Instalaciones de Distribución
 - Cargas

2.1.1 Estructura de un Sistema de Potencia

En un SEP, las cargas y generadores se distribuyen por todo el sistema (especialmente la carga). La generación corresponde a todo elemento que aporte energía eléctrica al SEP. En la actualidad, existen dos tipos de generación: Centralizada y Distribuida. La primera, corresponde a todas las centrales de gran potencia que por lo general se encuentran lejos de los consumidores. La segunda hace referencia a la generación a pequeña escala que reside cerca de los consumidores (pudiendo o no, conectarse directamente a la red de distribución). Independientemente del tipo de generación, su objetivo es satisfacer la demanda eléctrica, la cual puede ir desde una pequeña vivienda hasta un gran centro industrial.



Para transportar la energía desde los centros de generación hasta los consumidores, es necesario elevar notablemente el voltaje con el objetivo de reducir las pérdidas por efecto Joule. Esto se logra con transformadores de potencia que están presentes en las subestaciones elevadoras. Debido a que la energía no puede ser entregada a voltajes muy elevados, antes de llegar a los consumidores se transforma nuevamente mediante subestaciones reductoras y transformadores de distribución, y de esta forma se suministra en niveles seguros para su determinado uso. La clasificación de los niveles de voltaje según la etapa del SEP es:

- Transmisión (230kV o mayores)
- Sub-Transmisión (69 – 169kV)
- Distribución (35kV – 240/120V)

2.1.2 Planeamiento del Sistema Eléctrico de Potencia

Teniendo en cuenta la complejidad y el comportamiento dinámico del SEP, es necesario realizar análisis para la toma de decisiones en el futuro. El planeamiento del SEP busca satisfacer la demanda futura optimizando recursos técnicos, económicos y ambientales. Para ello, el pronóstico de la demanda es importante siendo el punto de partida del planeamiento, y para el cual existen varios métodos de predicción de la demanda eléctrica.

En el planeamiento es necesario definir dos parámetros: (i) horizonte de tiempo y (ii) tipo de planeamiento. El primero se clasifica en corto, mediano y largo plazo; y depende de la actividad a realizar en el SEP (operación, mantenimiento, expansión). El segundo hace referencia al alcance del planeamiento y se clasifica en estático y dinámico. El planeamiento estático responde a las preguntas *¿dónde?*, *¿qué?* y *¿cuánto?*; mientras que el dinámico responde además *¿cuándo?* son necesarios tales requerimientos del sistema.

Por otra parte, en base a los subsistemas del SEP existe: Planeamiento de la Generación, Planeamiento de las Subestaciones, Planeamiento de los Sistemas de Transmisión y Planeamiento de la Distribución. Se debería realizar el planeamiento del SEP en el orden mencionado, para un sistema verticalmente integrado como el ecuatoriano. Para realizar el PET es necesario conocer los resultados del planeamiento de la expansión de la generación y de las subestaciones.

Un esquema gráfico del Planeamiento del Sistema Eléctrico de Potencia se muestra en la Figura 2.1.

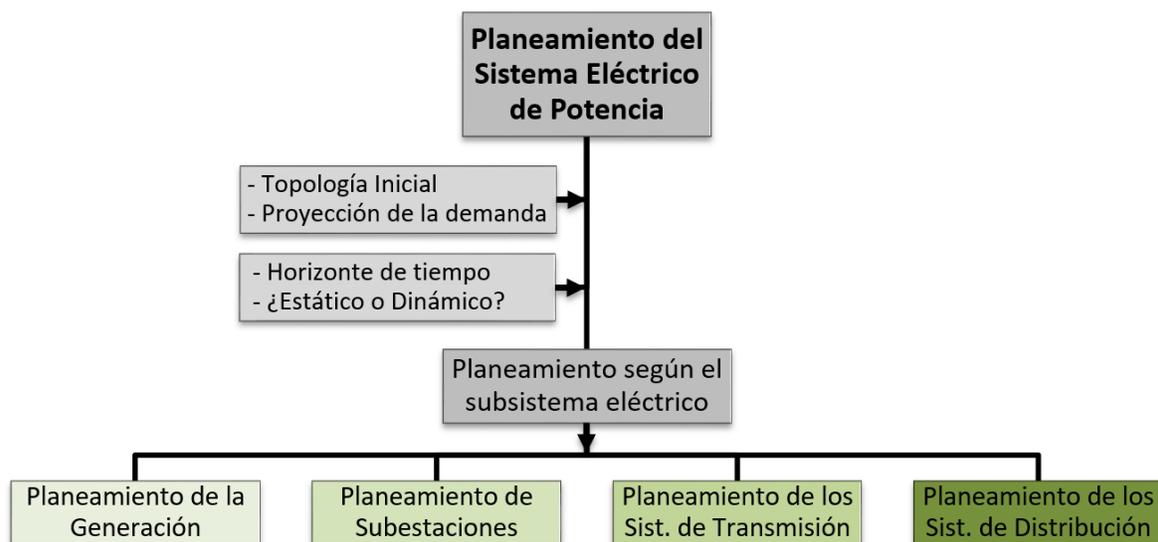


Figura 2.1 Planeamiento del Sistema Eléctrico de Potencia

2.1.2.1 Topología Inicial

La topología inicial del sistema conjuntamente con los elementos que lo conforman, presentan la información primordial para empezar el estudio del planeamiento del sistema eléctrico de potencia.

La topología inicial es el “mapa” de red del sistema eléctrico, en donde se indica las conexiones entre nodos (barras) del sistema. En base a la topología, un



sistema eléctrico se puede clasificar en: configuración de red (sistemas de transmisión), configuración en anillo (sistemas de transmisión y sub-transmisión) y configuración radial (generalmente sistemas de distribución).

2.1.2.2 Pronóstico de la demanda

Dada la topología inicial del sistema eléctrico, el primer paso crucial para cualquier estudio de planeamiento es pronosticar la demanda pico futura, esto es: “predecir” el consumo para un predeterminado período (horizonte) partiendo de la demanda actual [1], [9]. Dicho período, se define según el horizonte de tiempo del planeamiento a realizar. Por lo tanto, se considera un pronóstico de la demanda pico a corto, mediano y largo plazo según sea el caso de estudio.

Existen varios factores influyentes en el pronóstico de la demanda eléctrica según el horizonte de tiempo establecido. Estos factores presentan un alto grado de incertidumbre influyendo notablemente en los resultados obtenidos de acuerdo al método aplicado. De manera breve se citan los siguientes: condiciones climáticas, tarifas, hábitos de consumo, época del año, PIB, tasa de crecimiento poblacional, etc.

Para este trabajo se considera un horizonte de tiempo a largo plazo (10 años) lo cual corresponde a un planeamiento de la expansión.

2.1.2.3 Horizonte de tiempo

El horizonte de tiempo del planeamiento dependerá de la actividad a realizar en el SEP. A su vez, los lapsos considerados en cada horizonte son referenciales y dependerá de la política, organización y comportamiento del sistema en cada país.

- **Corto Plazo:**

Período comprendido desde 1 día hasta 5 años. Se considera cuando se va a realizar un planeamiento operativo: selección y despacho de unidades generadoras, reserva rodante, entrada y salida de unidades, y programas de mantenimiento.

- **Mediano Plazo:**

Considera un período de 5 a 10 años. El horizonte de mediano plazo es útil para: preparación de programas operativos y de mantenimiento, planeación financiera, determinación de tarifas energéticas.

- **Largo Plazo:**

Planeamiento que se encuentra en el período de 10 a 15 años. Se considera cuando se quiere realizar la “expansión” del sistema de potencia, es decir, es aplicado al planeamiento de inversiones en generación, transmisión, subestaciones, distribución.

Por otra parte, se usa también para el desarrollo de la infraestructura de suministro de combustible primario para las unidades térmicas de generación [1].

2.1.2.4 Estático vs. Dinámico

Teniendo un horizonte de tiempo preestablecido, se puede clasificar el planeamiento según el tratamiento del problema en dicho horizonte. En efecto, al planeamiento se lo puede tratar estática o dinámicamente [2], [10].

Por ejemplo, sea un problema de planeamiento considerando un horizonte de tiempo de 10 años en el período 2018-2028. Esto conlleva a tener 11 condiciones de carga pico (considerando intervalos de 1 año) a ser analizadas año tras año debido a la relación secuencial entre los intervalos.



El planeamiento estático trata al problema en una única etapa, es decir, considera todo el período de estudio sin analizar la relación entre los diferentes intervalos. De esta forma resuelve el problema de planeamiento respondiendo *dónde* y *cuántos* equipos deben ser instalados para el año 2028.

Por otra parte, el planeamiento dinámico considera el tiempo como una variable de decisión más. Asimismo, estudia la relación entre los intervalos de tiempo considerando las 11 condiciones de carga simultáneamente en la resolución del problema de planeamiento. El planeamiento dinámico es conocido también como multi-etapa y que, adicionalmente a las soluciones que devuelve el planeamiento estático, resuelve el problema respondiendo *cuándo* deben ser instalados tales equipos en el lapso del 2018 hasta el 2028.

Los resultados del planeamiento estático pueden llegar a ser poco prácticos debido a que la solución para el período considerado no debería ser independiente de los años subsecuentes. Para solucionar este problema, los resultados obtenidos en cada etapa de manera estática se incluyen como punto de partida en la etapa siguiente de manera secuencial hasta satisfacer el horizonte de tiempo. Esto se conoce como planeamiento cuasi-estático, cuasi-dinámico, semi-estático o semi-dinámico. El modelo matemático del planeamiento dinámico es más eficaz que el cuasi-dinámico.

2.1.3 Planeamiento de los Sistemas de Transmisión vs. Distribución

Generalmente, la topología de los sistemas de transmisión y sub-transmisión representa sistemas mallados, mientras que los sistemas de distribución presentan una topología radial. Esta y varias características relativas a los sistemas de distribución, conlleva a que tales sistemas sean estudiados independientemente a pesar de que también presentan similitudes respecto a los sistemas de transmisión (cables/líneas, subestaciones).



Uno de los problemas en la resolución del planeamiento de los sistemas de distribución es la no convergencia del método aplicado. Por lo general esto ocurre en sistemas con topología radial como es el caso de los sistemas de distribución.

Debido a que el enfoque de este trabajo es el planeamiento de la expansión, a largo plazo, de los sistemas de transmisión, el planeamiento de la expansión de los subsistemas restantes del SEP se describirá brevemente.

2.1.3.1 Planeamiento de la Expansión de la Generación

Una vez conocida la demanda pico futura (pronóstico de carga), el siguiente paso es determinar los requerimientos necesarios para satisfacer esa demanda. Este proceso es conocido como planeamiento de la generación y busca solucionar problemas que van desde el despacho económico de unidades de generación (corto plazo) hasta la implementación de nuevas unidades de generación (largo plazo: planeamiento de la expansión). El planeamiento de la generación busca responder preguntas como:

- *¿Qué tipos de plantas se debe instalar según el tipo de tecnología? (térmica, gas, nuclear, energías renovables)*
- *¿En dónde se deben instalar? (centralizada o distribuida a lo largo de varios nodos)*
- *¿De qué capacidad deben ser esas plantas de generación? (capacidad instalada)*
- *¿En caso de la salida de servicio de alguna planta, es necesario prever generación extra para cubrir situaciones de contingencia? Si ese es el caso se debe responder: ¿Dónde?, ¿Qué tipo? ¿Cómo?*



2.1.3.2 Planeamiento de la Expansión de Subestaciones

La energía generada debe ser transportada desde las plantas de generación hasta los consumidores, esto es posible gracias a transformadores de potencia que se encuentran en las subestaciones (S/E) elevadoras y reductoras. La principal función de una subestación de transformación es modificar el voltaje a niveles de los sistemas de transmisión y/o distribución.

El planeamiento de la expansión de las subestaciones se encarga de determinar si es necesario la expansión de las S/E existentes o la instalación de nuevas, siendo una tarea compleja debido a varios factores que se deben considerar, tales como:

- Las restricciones de la red aguas arriba que alimenta las subestaciones.
- Las restricciones de la red aguas abajo a través de la cual las subestaciones suministran energía a las cargas.
- Las restricciones inherentes a factores de la propia subestación.

2.1.3.3 Planeamiento de la Expansión de los Sistemas de Transmisión

Para realizar el planeamiento de la expansión del sistema de transmisión se asume conocido el pronóstico de carga, el plan de la expansión de la generación y el plan de la expansión de subestaciones. El horizonte a largo plazo del planeamiento del sistema de transmisión corresponde la resolución de la adición y/o ampliación de nuevos circuitos de transmisión con el objetivo de transportar la energía generada, de forma eficiente, confiable, minimizando el costo de inversión e impacto ambiental.

Ya sea un sistema de transmisión aéreo (líneas) y/o subterráneo (cables) el PET busca encontrar el trazado óptimo de los circuitos desde la etapa de generación hasta la etapa de distribución considerando una serie de restricciones tales como:

- Balance entre generación y carga
- Magnitudes de voltaje dentro de los límites permisibles (caída de voltaje)
- Límites de capacidad de las plantas generadoras
- Máxima capacidad de corriente de líneas/cables de transmisión (límite térmico)
- Número máximo de líneas/cables por circuito.

El planeamiento de la expansión del sistema de distribución es el último paso del planeamiento del SEP y está fuera del alcance de esta tesis. Los modelos, métodos de solución referentes al problema del PET se revisan de manera general en los siguientes puntos.

2.1.3.4 Modelos Matemáticos

El PET consiste en un problema de optimización de energía eléctrica y que para su solución es necesario establecer un modelo matemático y posteriormente una técnica de solución. En la vida real, el problema del PET consiste en un SEP con una topología de transmisión actual (inicial), para el cual se requiere encontrar en plan óptimo de expansión (adición de infraestructura del sistema de transmisión) para un horizonte de tiempo definido (≥ 10 años). De esta manera, se espera que el SEP de potencia opere adecuadamente para la demanda proyectada [1].

Se sabe que la demanda eléctrica puede ser activa como reactiva, por lo cual el modelo del PET ideal para garantizar la operación adecuada del SEP sería el modelo de flujo de carga AC (modelo AC). Este modelo es el más exacto en la representación del problema del PET; sin embargo, su resolución es compleja y presenta dificultad en los sistemas no conexos (sistemas con barras aisladas), como es el caso del PET. Matemáticamente, la representación del PET usando el modelo AC, lo clasifica como un problema de programación no lineal entero mixto (PNLEM); no lineal debido a la formulación del modelo AC, y entero mixto en función de los valores enteros y reales que pueden tomar las variables.

Por otra parte, existen también modelos simplificados: modelo de transportes, modelo de flujo de carga DC (modelo DC), modelo híbrido. El modelo de transporte es el modelo más sencillo, y sugiere que solo se debe satisfacer la primera ley de Kirchhoff sin tener en cuenta la segunda. De esta manera, el modelo de transportes es un modelo lineal del PET. En cambio, el modelo DC si considera la ecuación no lineal referente a la segunda ley de Kirchhoff, por lo cual es un modelo no lineal en la representación del PET. Por último, el modelo híbrido es una mezcla de los dos modelos anteriores y tiene una representación lineal y otra no lineal.

En resumen, el planeamiento de la expansión de los sistemas de transmisión es un problema combinatorial de naturaleza no conexa, no convexo, lineal o no lineal (dependiendo del modelo que se use), con variables enteras (número de circuitos adicionales) y continuas (voltajes y ángulos, por ejemplo).

2.1.3.5 Métodos de Solución [11]

Generalmente los métodos que han sido usados para resolver el problema del PET son: métodos de optimización matemática, métodos heurísticos y métodos meta-heurísticos, los cuales son revisados a continuación:

- **Métodos de Optimización Matemáticos**

Los métodos de optimización matemática buscan una solución óptima (plan óptimo) utilizando un procedimiento de cálculo que puede resolver la formulación matemática del problema del planeamiento. Estos modelos representan al PET como una función objetivo, sujeto a un conjunto de restricciones. Las restricciones modelan criterios técnicos, económicos y de confiabilidad involucrados en la expansión del SEP.

Existen muchos métodos de optimización matemática, algunos de los más utilizados son: programación lineal, programación no lineal, programación dinámica, descomposición de benders, método de branch-bound, etc.

Las ventajas de los métodos matemáticos son: (1) la solución óptima obtenida suele ser precisa y el tiempo de resolución es relativamente corto, cuando el modelo matemático es convexo; (2) presentan una convergencia adecuada.

Por otra parte, las principales desventajas son: (1) dificultad en obtener una solución de buena calidad cuando el modelo es no-convexo, (2) la explosión combinatorial, en sistemas de gran tamaño, hacen que el tiempo de cálculo represente aún un desafío, (3) la inclusión de nuevas restricciones o variables al modelo pueden dificultar su convergencia.

▪ **Métodos Heurísticos**

Los métodos heurísticos son considerados como una alternativa a los métodos matemáticos de optimización. Estos métodos permiten generar, evaluar y seleccionar opciones de expansión paso a paso. Para ello, los métodos heurísticos realizan búsquedas locales con la ayuda de reglas y/o análisis de sensibilidad lógicos o empíricos (reglas heurísticas). Estas reglas se usan para generar y clasificar las opciones durante la búsqueda. El proceso heurístico es llevado a cabo hasta que el algoritmo que genera los planes (topologías) ya no pueda encontrar una mejor topología considerando los criterios de evaluación previamente establecidos.

Los métodos heurísticos son capaces de encontrar buenas soluciones factibles (atractivas desde el punto de vista económico) con un pequeño esfuerzo computacional. Sin embargo, (desde un enfoque matemático) estos métodos no garantizan de manera absoluta alcanzar el mejor plan de expansión, es decir, el óptimo global del problema.

▪ **Métodos Meta-heurísticos**

Este tipo de métodos pueden proporcionar soluciones de alta calidad en sistemas de pequeña y mediana escala en un tiempo de cálculo relativamente corto. Tradicionalmente, las meta-heurísticas se dividen en dos categorías: Inteligencia de Enjambre (SI, siglas en inglés) y algoritmos evolutivos (EA, siglas en inglés). Por otro lado, existen otras meta-heurísticas que usan otros procedimientos, por ejemplo, métodos de búsqueda local como es el caso de la meta-heurística Búsqueda Tabú (TS, siglas en inglés).

En la literatura se puede encontrar una gran cantidad de métodos meta-heurísticos, algunos de ellos son: algoritmos genéticos (GA), optimización de enjambre de partículas (PSO), algoritmo de cardumen de peces artificiales (AFSA), redes neuronales artificiales (ANN), entre otros.

La principal ventaja de las meta-heurísticas es que son bastante simples y fáciles de usar. En contraste, sus desventajas son: (1) no garantizan obtener la solución óptima; (2) gran posibilidad de estancarse en los mínimos locales en lugar de los globales.

2.2 GENERACIÓN DISTRIBUÍDA (GD)

2.2.1 Historia de la Generación Distribuida [12] [13]

El concepto de generación distribuida no es nuevo. La comercialización de la energía eléctrica se introdujo como una alternativa a las fuentes de energía tradicional (vapor, hidráulica, calentamiento y enfriamiento directo, luz) las cuales se producían cerca de la demanda.

La aplicación de la energía eléctrica en la iluminación marcó la tendencia definitiva al uso de la electricidad debido a las ventajas que presentaba frente a las energías tradicionales. Por ejemplo, la lámpara de gas fue sustituida por la lámpara

de arco eléctrico (un sistema autónomo situado directamente en las instalaciones de los usuarios).

Inicialmente, las empresas de energía eléctrica eran aisladas entre sí y satisfacían la demanda de sus usuarios con generación distribuida. Estas empresas empezaron a interconectarse debido a los beneficios: compartimiento de la demanda pico, mayor confiabilidad de servicio, mayor robustez del sistema, etc. Por otra parte, el cambio del paradigma energético de distribuido a centralizado (conocido como paradigma tradicional) se debió a temas como: economía de escala; crecimiento de la demanda; mayor eficiencia de las grandes centrales; reserva rodante en planta centralizada era menor que reserva en planta de igual potencia, pero distribuida; reducción de pérdidas de transmisión al usar redes de alto voltaje y gran capacidad; etc.

Últimamente, el avance tecnológico de las diferentes tecnologías de generación a pequeña escala y los cambios en las reformas del sector eléctrico (desregulación), permiten el cambio del paradigma tradicional (grandes centrales colocadas lejos de los consumidores) a un nuevo paradigma, en donde, los sistemas de generación distribuida y sus impactos son contemplados en el sistema eléctrico de potencia.

2.2.2 Concepto de la generación distribuida.

Actualmente, no existe una definición global de la GD. Varios organismos y actores adoptan definiciones similares, pero discrepan en ciertos aspectos. Las diferencias en la concepción de la GD se deben a que existen varios factores involucrados en su definición: tecnologías empleadas (renovables, no renovables); límite de potencia instalada; conexión a la red (nivel de voltaje, aislado o conectado); etc. [14].



Algunas de las definiciones más importantes de la GD, según agencias mundialmente reconocidas, son las siguientes [14]:

- A. *DPCA (Distribution Power Coalition of America)*: cualquier tecnología de generación a pequeña escala que proporciona electricidad en puntos más cercanos al consumidor que la generación centralizada y que se puede conectar directamente al consumidor o a la red de transporte o distribución [14].
- B. *International Council on Large Electric Systems (CIGRE)*: La generación distribuida es [15]:
- No centralmente planificada.
 - Hoy en día, no centralmente despachada.
 - Usualmente conectada a la red de distribución.
 - Más pequeño que 50 o 100 MW.
- C. *Agencia Internacional de la Energía (IEA, International Energy Agency)*: La GD consiste en plantas de generación que atienden al consumidor en el sitio, o brindan soporte a una red de distribución y se conectan a la misma a nivel de voltaje de distribución. Las tecnologías generalmente incluyen motores, pequeñas turbinas (incluidas micro), pilas de combustible y energía solar fotovoltaica. Generalmente, no incluyen la energía eólica, ya que la mayoría de energía eólica se produce en grandes parques eólicos construidos específicamente para ese propósito en lugar de cumplir con un requerimiento de energía en el sitio [16].
- D. *Departamento de energía de los Estados Unidos (DOE, U.S. Department of Energy)*: La generación distribuida (pequeños generadores de electricidad modulares ubicados cerca de la carga del cliente) puede permitir que las empresas aplacen o eliminen costos de inversión en repotenciación de los sistemas de transmisión y distribución, y provee a los clientes un suministro

de energía de mejor calidad, más confiable y con medioambiente más limpio. La DOE establece que los pequeños generadores modulares de generación de energía varían en tamaño y capacidad desde unos pocos kilovatios hasta 50 MW. Estos comprenden una variedad de tecnologías, tanto del lado de la oferta como de la demanda, que pueden ubicarse en el lugar donde se utiliza la energía o cerca de ella [16].

- E. *IEEE*: GD es la generación de electricidad por plantas generadoras suficientemente pequeñas en comparación con las grandes centrales de generación, las cuales se puedan conectar a casi cualquier punto de un SEP. Es un subconjunto del sistema de distribución [3].

La literatura ofrece muchas más definiciones de la generación distribuida, las mismas que pueden ser revisadas en [16], [17].

Esta tesis adoptará la definición de la DOE con las siguientes particularidades: (1) las tecnologías de generación empleadas serán únicamente de energía renovable (ER), exclusivamente: solar fotovoltaica, eólica, biomasa de calor y potencia (CHP); y (2) el límite máximo de potencia instalada será de 50MW.

De esta forma, se estudia el impacto económico de la GD en el PET; analizando si efectivamente el aporte de la GD evita la adición de nuevos circuitos de transmisión, lo que reflejaría un ahorro en la inversión de la expansión del sistema eléctrico.

2.2.3 Generación Distribuida de Energías Renovables: Costos Estimados de Inversión

En base a que la definición de GD adoptada en este trabajo fue el de la DOE; los costos referenciales de inversión de las tecnologías ER (con el enfoque de GD), fueron tomados de la literatura [18] del Laboratorio Nacional de Energías

Renovables (NREL, National Renewable Energy Laboratory), considerando que forma parte del Departamento de Energía de los Estados Unidos (DOE).

Los costos de instalación de las tecnologías de energía renovable se muestran en la Tabla 2.1 con un límite de potencia instalada de 10MW; sin embargo, considerando el límite de potencia instalada de GD de este trabajo, tales costos se expanden hasta llegar a los 50MW. Es importante señalar que por temas de economía de escala (40MW de diferencia) estos costos podrían llegar a ser menores.

Tabla 2.1 Costos estimados de inversión de generación distribuida de energía renovable.

Tipo de Tecnología	Rango de Potencia	Costo medio de instalación (USD/kW)	Vida útil
Solar Fotovoltaica	<10kW	3,897	33
	10-100kW	3,463	33
	100-1000kW	2,493	33
	1-10MW	2,025	33
Eólica	<10kW	7,645	14
	10-100kW	6,118	19
	100-1000kW	3,751	16
	1-10MW	2,346	20
Biomasa CHP*	**	5,792	28
* El costo unitario por kilovatio hace referencia al generador eléctrico, no a la capacidad de calor de la caldera.			
** El límite de potencia instalada define el generador eléctrico conjuntamente con la capacidad de la caldera.			

El análisis completo de la estimación de los costos mostrados en la Tabla 2.1 está desarrollado en [18].

2.2.4 Impacto de la GD en el SEP

El impacto de la GD en el SEP se lo puede clasificar en dos grupos: (1) impacto técnico y (2) impacto no técnico.

El primer grupo estudia la respuesta en régimen estacionario y dinámico del SEP debido a la presencia de GD. Generalmente se estudian los siguientes aspectos: pérdidas de potencia, calidad de suministro (forma de onda, confiabilidad, flicker), control de voltaje, estabilidad de voltaje, equilibrio generación-demanda, estabilidad transitoria, potencia de cortocircuito, operación del sistema, protecciones [19], [20].

El segundo grupo estudia el impacto en el SEP desde un enfoque económico y/o ambiental. El enfoque económico esencialmente estudia el impacto de la GD en las inversiones del sistema de distribución: impacto en redes existentes (repotenciación), impacto en el planeamiento de nuevas redes [19] [21].

2.2.5 Estado del arte del impacto de la GD en el PET

Actualmente, la literatura referente al impacto de la GD en el PET es bastante escasa. La mayor parte de investigaciones (técnicas como económicas) se han centrado en el impacto de la presencia de GD a nivel de distribución.

H. Willis y W. Scott (Willis and Scott, 2000); G. Welch (Welch, 2000) conciernen en lo siguiente: la ventaja de la GD a la hora de evaluar su potencial para prorrogar o evitar inversiones están en el hecho de que este tipo de generación puede ubicarse cerca de los lugares de consumo [19].

La GD puede aplazar potencialmente las inversiones en la infraestructura de transmisión y distribución. Pocos estudios (Borenstein, 2008; Kahn, 2008; Beach, 2008) han investigado cuán significativo puede ser el efecto del aplazamiento de la inversión en los sistemas de transmisión y distribución. Además, los estudios

existentes generalmente ignoran las restricciones técnicas del sistema, que esencialmente tienen un gran impacto en los resultados de sus estudios [22].

En [22] y [23] se considera el PET como un problema de optimización multi-objetivo, en donde a más de buscar el mínimo plan de expansión del sistema de transmisión, se estudian aspectos como: minimización del costo total de generación del sistema [22], flexibilidad del PET considerando incertidumbre en la expansión de la generación, carga, y variables de mercado eléctrico [23]. Los resultados en [22] y [23] muestran el potencial de la GD para reducir los costos de inversión del PET.

En [24] se considera un PET estático usando el modelo de corriente continua DC. Los resultados obtenidos con la integración de GD indican que a medida que el nivel de penetración de GD aumenta, el costo total de inversión y las pérdidas en las líneas de la red de transmisión disminuyen.

En [25] se propone un modelo probabilístico multi-objetivo para el PET, el cual considera programas de respuesta de demanda (PRD). Los resultados indicaron que la adición de incertidumbres aumentaría los costos de inversión, los mismos que pueden reducirse con la conexión de GD y con el uso de PRD.

Este trabajo estudia el impacto de la GD en el PET considerando un planeamiento estático y haciendo uso del modelo AC debido a la exactitud que presenta en la representación del sistema eléctrico. Para su resolución se propone dos técnicas meta-heurísticas en función del desempeño en la resolución del PET. El modelo matemático y los métodos de solución propuestos se describirán en los siguientes capítulos.

CAPÍTULO 3

FORMULACIÓN MATEMÁTICA

3.1 Modelo de Transportes, Híbrido No Lineal, Híbrido Lineal

El modelo de transportes es un modelo simplificado del modelo DC, mientras que el modelo híbrido es una combinación del modelo de transportes y características del modelo DC [10], en efecto solucionar el problema de planeamiento de los sistemas de transmisión usando estos modelos podría resultar en planes de expansión muy alejados de la realidad. Sin embargo, estos modelos pueden ser útiles cuando se requiere tener una visión general del problema, ya que pueden ser resueltos por técnicas más sencillas en comparación con el modelo AC.

En base a las limitaciones que presentan los modelos de transportes e híbrido, en este trabajo son estudiados brevemente desde una perspectiva teórica sin considerar la formulación matemática.

- **Modelo de Transportes:**

Fue el primer modelo de la representación del problema del PET. Este modelo fue propuesto por L. Garver en [26] buscando una alternativa a la dificultad que presentaba resolver el problema del PET usando el modelo de flujo de carga AC (modelo no lineal complejo) debido a las técnicas de optimización disponibles en aquel entonces [27].

Básicamente, el modelo de transportes es una simplificación lineal del modelo DC, el cual solo cumple la primera ley de Kirchhoff sin considerar la segunda, es decir, considera la conservación de flujos de potencia en los nodos o barras del sistema sin tener en cuenta las caídas de voltaje producidas por la impedancia de las líneas de transmisión.

El no considerar las impedancias de las líneas permite que este modelo presente una gran capacidad de convergencia (flexibilidad) en sistemas aislados. Por otra parte, este modelo lineal es una representación poco adecuada del problema del PET, el cual puede resultar en soluciones poco prácticas respecto al óptimo del modelo DC.

- **Modelo Híbrido No Lineal:**

El modelo Híbrido No Lineal propuesto en [28] es una combinación del modelo DC y el modelo de transportes. Esta combinación busca conseguir un modelo más completo, el cual aprovecha la principal ventaja del modelo de transportes (convergencia en redes altamente aisladas) y mejora su solución permitiendo encontrar soluciones más cercanas al óptimo según el modelo DC.

Este modelo define que los caminos del sistema eléctrico en donde previamente existan circuitos (líneas/cables) en la configuración base (SEP inicial) deben cumplir las dos leyes de Kirchhoff (características del modelo DC), mientras que los caminos adicionales en el proceso de planeamiento, en donde no existan circuitos en la configuración base, deben satisfacer únicamente la primera ley de Kirchhoff (característica del modelo de transportes). Finalmente, la primera ley de Kirchhoff se cumple en todas las barras del sistema y la segunda ley de Kirchhoff se cumple solo en los lazos (mallas) existentes en la configuración base [1].

El modelo de transportes es un modelo matemático lineal, mientras que el modelo DC es no lineal en consecuencia de la no linealidad que presenta la segunda ley de Kirchhoff. En efecto, es así como surge la no linealidad de este modelo híbrido, el mismo que presenta una complejidad casi equivalente al modelo DC.

- **Modelo Híbrido Lineal:**

En base a la no linealidad del modelo anterior, surge una alternativa lineal del modelo híbrido con el objetivo de resolver el problema del PET de forma más simple.



Para esto, en el modelo híbrido lineal los circuitos existentes en el sistema de la configuración base debe satisfacer las dos leyes de Kirchhoff, mientras que los circuitos adicionados en el proceso de planeamiento solamente deben cumplir la primera ley de Kirchhoff (existan o no circuitos en la configuración inicial). En otras palabras, en el modelo híbrido lineal el PET de un SEP como dos sistemas superpuestos; por una parte, se encuentra el sistema inicial (configuración base) en donde se deben satisfacer las dos leyes de Kirchhoff; y, por otra parte, se encuentran los nuevos circuitos adicionados que deben cumplir exclusivamente la primera ley de Kirchhoff.

3.2 Generadores Artificiales (GA)

En los modelos referentes al PET es conveniente usar generadores artificiales (inexistentes en la realidad) en las barras de carga del sistema eléctrico con el objetivo de garantizar la convergencia de los métodos de solución usados para resolver este problema. Los GA compensan la falta de generación de potencia activa y reactiva con el objetivo de satisfacer las restricciones del problema cuando los generadores reales existentes del sistema no pueden abastecer la demanda eléctrica cumpliendo todas las restricciones del problema.

Matemáticamente, los generadores artificiales son representados por variables en el problema de optimización, lo cual podría parecer que el modelo original (sin GA) se convierte en un modelo más complejo. Sin embargo, estos generadores facilitan la resolución del problema usando cierto tipo de algoritmos [1].

Evidentemente, para que una solución del modelo con GA sea factible, la potencia activa y reactiva generada artificialmente tiene que ser igual a cero. De tal modo que los generadores reales existentes en el sistema eléctrico puedan satisfacer la demanda eléctrica cumpliendo todas las restricciones ligadas al problema de planeamiento.

Por otra parte, los generadores artificiales ayudan a identificar un déficit de potencia activa y un déficit o exceso de potencia reactiva (únicamente cuando se emplea el modelo AC) en las barras de carga. Por ejemplo, si existe generación artificial de potencia reactiva indica que se requiere compensación inductiva (en el caso de exceso de reactivos) o capacitiva (en el caso de déficit de reactivos) ya sea para mejorar el perfil de voltaje o para satisfacer la demanda de potencia reactiva en ese nodo. En el caso de generación de potencia activa simplemente indica que los generadores reales existentes no pueden satisfacer la demanda proyectada clasificando la solución del problema como no factible. Dicho de otro modo, la generación artificial de potencia activa y/o reactiva puede ser visto como un recorte de carga o demanda eléctrica del sistema debido a que la generación no satisface la demanda cumpliendo los requerimientos técnicos del problema.

3.3 Modelo DC

El modelo DC es una generalización del modelo de flujo de carga DC, el cual esta considerablemente desarrollado en [9]. A su vez, este modelo es una simplificación del modelo AC en el cual las ecuaciones referentes al flujo de potencia del modelo AC se linealizan asumiendo las siguientes consideraciones: (1) la magnitud de voltaje en los nodos del sistema se mantiene constante; y (2) la diferencia entre ángulos de voltaje entre nodos es tan pequeña que se aproxima a cero. Como resultado a estas consideraciones, se obtiene el modelo DC que no considera la potencia reactiva y las pérdidas de transmisión [29].

El modelo DC busca satisfacer las dos leyes de Kirchhoff, en donde, todas las barras (nodos) del sistema deben cumplir la primera ley de Kirchhoff (LCK) y todos los lazos existentes deben cumplir la segunda ley de Kirchhoff (LVK). El objetivo de satisfacer estas dos leyes es garantizar la convergencia del método en la solución del PET cumpliendo la ley de conservación de la energía y las restricciones técnicas del SEP. En base a su naturaleza, matemáticamente se lo

clasifica como un problema de programación no lineal entero mixto (PNLEM). No lineal debido a la restricción de la segunda ley de Kirchhoff y entero mixto debido a que contiene variables continuas y enteras, por ejemplo, ángulos de voltaje y número de líneas por circuito respectivamente.

3.4 Modelo AC

Tradicionalmente, el problema del PET se lo ha venido resolviendo usando el modelo DC [30], [31], [32]. Sin embargo, varias investigaciones muestran que los costos de inversión obtenidos con el modelo DC resultan distantes a los obtenidos con el modelo AC [33]. De esta forma, el modelo AC [34], [35] resulta en un modelo más exacto en la resolución del problema del PET que los modelos estudiados anteriormente.

El modelo AC presenta varias ventajas frente a los modelos simplificados que estudian el problema del PET [35]: (1) considera la potencia reactiva en el problema del PET lo que podría implicar un menor número de circuitos adicionales; (2) permite incluir un análisis completo de pérdidas de potencia; (3) posibilita la integración de otros componentes como dispositivos FACTS; y (4) expande el análisis del problema incluyendo estudios como estabilidad de voltaje.

En contraste, al ser un modelo más complejo presenta las siguientes desventajas: (a) matemáticamente representa un PNLEM más complejo que el modelo DC; (b) requiere una técnica de optimización eficiente para su resolución; y (c) muestra dificultad al ser aplicado en sistemas de gran escala.

3.4.1 Modelo matemático

El modelo AC aplicado al problema del PET (función objetivo y restricciones) se presenta a continuación:

$$\min v = \sum_{(k,l) \in \Omega} c_{kl} n_{kl} + w + C_{invGD} \quad (3.1)$$

$$w = \sum_{k \in \Gamma_1} \alpha_1 r_{Pk} + \alpha_2 r_{Qk} \quad (3.2)$$

$$C_{invGD} = c_{invk} \sum_{k \in \Gamma_2} P_{instGDk} \quad (3.3)$$

s. a.

$$P(V, \theta) - P_G + P_D - r_P = 0 \quad (3.4)$$

$$Q(V, \theta) - Q_G + Q_D - r_Q = 0 \quad (3.5)$$

$$\underline{P}_G \leq P_G \leq \bar{P}_G \quad (3.6)$$

$$\underline{Q}_G \leq Q_G \leq \bar{Q}_G \quad (3.7)$$

$$\underline{r}_P \leq r_P \leq \bar{r}_P \quad (3.8)$$

$$\underline{r}_Q \leq r_Q \leq \bar{r}_Q \quad (3.9)$$

$$\underline{P}_{GD} \leq P_{GD} \leq \bar{P}_{GD} \quad (3.10)$$

$$\underline{Q}_{GD} \leq Q_{GD} \leq \bar{Q}_{GD} \quad (3.11)$$

$$\underline{V} \leq V \leq \bar{V} \quad (3.12)$$

$$S^{desde} \leq \bar{S} \quad (3.13)$$

$$S^{hasta} \leq \bar{S} \quad (3.14)$$

$$0 \leq n_{ij} \leq \bar{n}_{ij} \quad (3.15)$$

$$n_{ij} \text{ entero}$$

$$\theta_k, \theta_l \text{ irrestrictos}$$

Dónde:

- v: Inversión de la expansión del sistema de transmisión.
- c_{kl} : Costo de la adición de un circuito (línea/cable) desde la barra k hasta la barra l.
- n_{kl} : Número de circuitos adicionados entre las barras k – l.



w :	Costo de recorte de carga de potencia activa y reactiva.
C_{invGD} :	Costo total de inversión de Generación Distribuida [US\$].
Ω :	Conjunto de todos los derechos de transmisión (franja de servidumbre).
α_1 :	Coficiente de penalización debido a la contribución de potencia activa los generadores artificiales.
r_{Pk} :	Generación artificial de potencia activa en la barra k.
α_2 :	Coficiente de penalización debido a la contribución de potencia reactiva de los generadores artificiales.
r_{Qk} :	Generación artificial de potencia reactiva en la barra k.
Γ_1 :	Conjunto de todas las barras k en donde existe demanda eléctrica.
C_{invk} :	Costo de inversión de potencia instalada de los generadores distribuidos en la barra k [US\$/kW].
$P_{instGDk}$:	Potencia instalada de generación distribuida en la barra k.
P_{GD} :	Generación distribuida de potencia activa en la barra k.
Γ_2 :	Conjunto de todas las barras k en donde existe generación distribuida.
$P(V, \theta)$:	Vector de flujo de potencia activa de las barras del sistema.
P_G :	Vector de generación de potencia activa.
P_D :	Vector de demanda de potencia activa.
r_P :	Vector de generación artificial de potencia activa.
$Q(V, \theta)$:	Vector de flujo de potencia reactiva de las barras del sistema.



Q_G :	Vector de generación de potencia reactiva.
Q_D :	Vector de demanda de potencia reactiva.
r_Q :	Vector de generación artificial de potencia reactiva.
\underline{P}_G :	Vector de mínima capacidad de generación de potencia activa en las barras de generación.
\bar{P}_G :	Vector de máxima capacidad de generación de potencia activa en las barras de generación.
\underline{Q}_G :	Vector de mínima capacidad de generación de potencia reactiva en las barras de generación.
\bar{Q}_G :	Vector de máxima capacidad de generación de potencia reactiva en las barras de generación.
\underline{r}_P :	Vector de mínima capacidad de generación artificial de potencia activa en todas las barras $\in \Gamma_1$.
\bar{r}_P :	Vector de máxima capacidad de generación artificial de potencia activa en todas las barras $\in \Gamma_1$.
\underline{r}_Q :	Vector de mínima capacidad de generación artificial de potencia reactiva en todas las barras $\in \Gamma_1$.
\bar{r}_Q :	Vector de máxima capacidad de generación artificial de potencia reactiva en todas las barras $\in \Gamma_1$.
\underline{P}_{GD} :	Vector de mínima capacidad de generación distribuida de potencia activa en todas las barras $\in \Gamma_2$.
P_{GD} :	Vector de Generación Distribuida de potencia activa.
\bar{P}_{GD} :	Vector de máxima capacidad de generación distribuida de potencia activa en todas las barras $\in \Gamma_2$.
\underline{Q}_{GD} :	Vector de mínima capacidad de generación distribuida de potencia reactiva en todas las barras $\in \Gamma_2$.
Q_{GD} :	Vector de Generación Distribuida de potencia reactiva.

\bar{Q}_{GD} :	Vector de máxima capacidad de generación distribuida de potencia reactiva en todas las barras $\in \Gamma_2$.
\underline{V} :	Vector de mínima magnitud de voltaje en las barras del sistema.
V :	Vector de magnitudes de voltaje de las barras del sistema.
\bar{V} :	Vector de máxima magnitud de voltaje en las barras del sistema.
S^{desde} :	Vector de potencia aparente que sale del nodo.
\bar{S} :	Vector de límite máximo de potencia aparente de las líneas/cables de transmisión.
S^{hasta} :	Vector de potencia aparente que llega al nodo.
\bar{n}_{ij} :	Vector de máximo número de líneas/cables permitido por circuito en el camino $i - j$.

Las ecuaciones (3.4) y (3.5) representan el balance de potencia activa y reactiva respectivamente. Los elementos que conforman los vectores de potencia activa $P(V, \theta)$ y reactiva $Q(V, \theta)$ se calculan mediante las ecuaciones no lineales (3.16) y (3.17). M representa el conjunto de todas las barras del sistema.

$$P_k(V, \theta) = V_k \sum_{l \in M} V_l [G_{kl} \cos \theta_{kl} + B_{kl} \sin \theta_{kl}] \quad (3.16)$$

$$Q_k(V, \theta) = V_k \sum_{l \in M} V_l [G_{kl} \sin \theta_{kl} - B_{kl} \cos \theta_{kl}] \quad (3.17)$$

Los elementos G_{kl} y B_{kl} que conforman la matriz de admitancias de barra (Y_{bus}) pueden ser cálculos con el método presentado en [33].

Por otra parte, las inecuaciones (3.14) y (3.15) modelan el límite máximo de potencia (MVA) que puede ser transmitido por las líneas/cables para los diferentes caminos del SEP. Para el cálculo de la potencia transmitida entre dos barras del

SEP (k, l) se debe tener en cuenta que el flujo de potencia es bidireccional (k-l, l-k). Por lo cual, los términos S^{desde} y S^{hasta} en (3.14) y (3.15) se determinan según las ecuaciones (3.18) y (3.19) respectivamente.

$$S_{kl}^{desde} = \sqrt{(P_{kl}^{desde})^2 + (Q_{kl}^{desde})^2} \quad (3.18)$$

$$S_{kl}^{hasta} = \sqrt{(P_{kl}^{hasta})^2 + (Q_{kl}^{hasta})^2} \quad (3.19)$$

De igual manera, el método para calcular los términos P_{kl} y Q_{kl} se puede encontrar según [33] o en cualquier texto básico de sistemas eléctricos de potencia.

3.4.1.1 Modelación matemática de la GD en el SEP

En la Figura 3.1 se muestra un SEP con la presencia de varios generadores distribuidos en el sistema de distribución. Para el estudio del impacto de la GD en el PET es necesario considerar todos los generadores distribuidos concentrados (tal como se realiza con la carga) en la barra de distribución (barra 4). Los términos GC, GD y C hacen referencia a generación centralizada, generación distribuida y carga respectivamente.

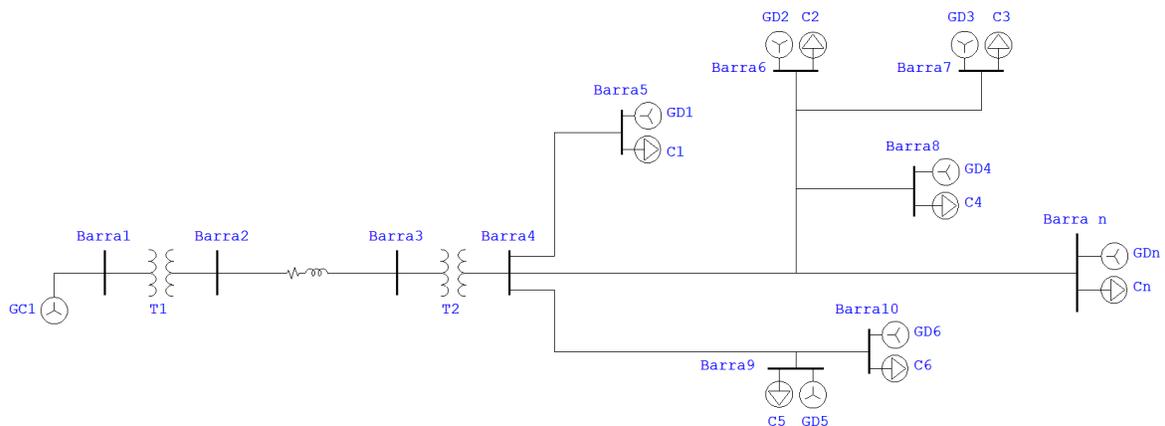


Figura 3.1 Esquema de un sistema eléctrico de potencia con la presencia de generadores distribuidos (GD) en el Sistema de Distribución.

La formulación matemática que describe la concentración de GD en la barra del sistema de distribución se muestra en la ecuación (3.20).

$$GD_{total} = \sum_{k \in I_2} GD_k \quad (3.20)$$

donde, GD_{total} representa la generación distribuida total de cada tipo de tecnología ($GD_{total-eólica}$, $GD_{total-solar\ fotovoltaica}$, $GD_{total-biomasa}$, etc.); GD_k representa el k -ésimo generador distribuido en el sistema de distribución; y I_2 es el conjunto de todas las barras k en donde existe generación distribuida.

El SEP resultante con GD y Carga Total concentrada en la barra 4 de distribución se muestra en la Figura 3.2.

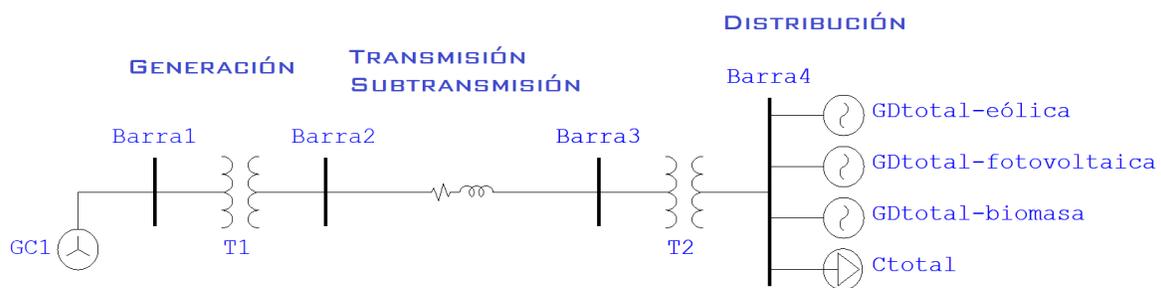


Figura 3.2 Sistema eléctrico de potencia que considera GD concentrada en la barra del Sistema de Distribución.

CAPÍTULO 4

IMPLEMENTACIÓN DEL PROBLEMA

4.1 Notación

La siguiente lista describe la notación matemática a ser usada para describir los algoritmos de las respectivas técnicas meta-heurísticas:

$x \leftarrow y$	Es una notación computacional la cual indica que y es asignada a la variable x .
$\{x : x \in S\}$	Es el conjunto de todo x tal que x pertenece al conjunto S .
$\{x_i : i \in S\}$	Es el conjunto de todo x_i tal que i pertenece al conjunto S .
$[a, b]$	Es el intervalo cerrado entre a y b , es decir, $\{x : a \leq x \leq b\}$.
$S_1 \cup S_2$	Es el conjunto de todo x tal que x pertenece ya sea al conjunto S_1 o al conjunto S_2 . Por ejemplo, si $S_1 = \{1,2\}$ y $S_2 = \{9\}$, entonces $S_1 \cup S_2 = \{1,2,9\}$.
$ S $	Es el número de elementos del conjunto S .
\emptyset	Representa el conjunto vacío. $ \emptyset = 0$.
$\max_x f(x)$	Indica el máximo valor de $f(x)$. Por ejemplo, si $f(x) = 4 - x^2$, entonces $\max_x f(x) = 4$.
$\arg \min_x f(x)$	Indica el valor de x , el cual resulta en el mínimo valor de $f(x)$. Por ejemplo, si $f(x) = (x - 1)^2$, entonces $\arg \min_x f(x) = 1$.
$A \Rightarrow B$	Significa que A implica B .

4.2 Búsqueda Tabú (TS) [5] [36]

La Búsqueda Tabú (*Tabu Search – TS*) fue introducida por Fred Glover en [37], un artículo en donde también introdujo el término meta-heurística. La TS es una meta-heurística que nace con el objetivo de dotar de inteligencia a los algoritmos de búsqueda local tradicionales, buscando así explorar soluciones más allá del óptimo local. Esta meta-heurística se encuentra completamente desarrollada en su forma original en [37] y [38].

El término tabú (taboo) significa prohibido, no aceptado, o no permitido. Estas prohibiciones pueden estar basadas en la cultura, religión, moralidad, o en la política. La TS se basa en la idea que, si cierta región del espacio de búsqueda ha sido ya visitada durante el proceso de optimización, entonces esta región pasa a ser tabú y el algoritmo de búsqueda no permite visitarla otra vez. De forma similar, si cierta estrategia que ha sido ya usada durante el proceso de búsqueda, entonces esa estrategia de búsqueda se vuelve tabú y el proceso de búsqueda no permite que sea usada de nuevo. En términos del problema del PET, si una configuración de circuitos ha sido ya evaluada, esta configuración pasa a ser tabú (lista tabú) de tal forma que, si tal solución no representa el óptimo global, el proceso de búsqueda no se estanque cíclicamente en un óptimo local.

El algoritmo 4.1 describe un algoritmo básico de la búsqueda tabú, donde T es la lista de las características tabú (lista tabú), x_0 es la mejor solución actual, y M determina el número máximo de individuos (vecinos) en la sociedad (vecindario). Se crea un vecindario a partir de x_0 , y no se permite que el proceso de búsqueda incluya características que se encuentran en T . Cuando se encuentra una mejor solución candidata x' sus características son guardadas en la lista tabú T . De esta forma se indica al proceso de búsqueda la solución x' ya fue visitada. Por lo tanto, la lista tabú representa la memoria del algoritmo 4.1.



Esta memoria olvida periódicamente las características de las soluciones candidatas más antiguas en función del tiempo que estas han permanecido en la lista de tabú (este tiempo de permanencia representa un parámetro de sintonización del problema definido por el tamaño de T). En otras palabras, el tamaño de la lista tabú (*tabu tenure*) representa el tiempo o el número de iteraciones que las características de una solución candidata permanecen en la lista tabú. Es lógico que el valor del parámetro *tabu tenure* necesariamente tiene que ser un número entero positivo.

En cuanto a la similitud con la evolución humana, todo este proceso simula el cambio progresivo de tabú con el tiempo, como sucede en la sociedad.

```
Inicializar una solución candidata  $x_0$ 
 $T \leftarrow \emptyset$ 
Mientras no (Criterio de finalización)
   $Vecindario \leftarrow \emptyset$ 
  Mientras  $|Vecindario| < M$ 
    Crear un vecino  $x'$  de  $x_0$ 
    Si (las características de  $x' \notin T$ )
       $Vecindario \leftarrow Vecindario \cup x'$ 
    Fin si
  Fin mientras
 $x' \leftarrow \operatorname{argmin}(f(x) : x \in Vecindario)$ 
Si  $f(x') < f(x_0)$ 
   $T \leftarrow T \cup (\text{características de } x')$ 
   $x_0 \leftarrow x'$ 
Fin si
Vaciar las características antiguas de  $T$ 
Siguiente generación
```

Algoritmo 4.1 Búsqueda Tabú (TS) básico.

Es importante señalar que la evaluación de (*las características de x'*) intencionalmente se expresa ambiguamente. Esto se debe a que esta evaluación depende del problema, del método seleccionado para la creación de soluciones iniciales, preferencias del usuario, entre otros. En la aplicación de algoritmo TS en el problema del PET, las características correspondientes a x' corresponden al número de circuitos (configuración) que conectan los diferentes nodos del SEP de estudio.

En el algoritmo 4.1, M hace referencia al tamaño de la población, vecindario o número de individuos en una sociedad. En esta tesis la creación de cada vecino se lo realiza aleatoriamente (Ver punto 4.4.4). Por esta razón, es equivalente crear una población inicial de vecinos (un vecindario) en cada generación, en lugar de crear individuo por individuo hasta completar el vecindario.

4.3 Algoritmo de Cardumen de Peces Artificiales (AFSA) [5]

El AFSA fue propuesto en (Li et al., 2003) y a veces también es llamado Algoritmo de Escuela de Peces. El AFSA según su naturaleza corresponde a las meta-heurísticas de algoritmos evolutivos, los cuales se basan en la evolución biológica. Por su parte, el AFSA se basa libremente en el comportamiento de los peces en el cardumen. La posición de un pez artificial en el espacio de búsqueda se expresa como x_i , donde $i \in [1, N]$ representa el índice del pez, y N es el número de peces en el cardumen. El dominio de búsqueda para cada dimensión del problema está denotado como $[l_k, u_k]$ para $k \in [1, n]$, donde n representa la dimensión del espacio de búsqueda (dimensión del problema correspondiente al número de variables de decisión).

Los peces poseen un rango visual dentro del cual son capaces de ver a otros peces, y más allá del cual no pueden ver a otros peces. El rango visual de los peces que conforman el cardumen se define según la ecuación (4.1), en donde δ

representa un parámetro de sintonización que depende del problema de aplicación y es establecido por el usuario.

$$v = \delta \max_k (u_k - l_k) \quad (4.1)$$

Una vez establecido el rango visual de los peces (es el mismo para todos), es posible determinar para un pez x_i cuales peces se encuentran dentro de su rango visual. Por lo tanto, los índices de los peces que se encuentran dentro del rango visual del pez x_i se denota como se muestra en la ecuación (4.2):

$$V_i = \{j \neq i : \|x_i - x_j\|_2 \leq v\} \quad (4.2)$$

en donde, $\|x_i - x_j\|_2$ es la distancia euclidiana (norma de segundo grado) desde el pez i hasta los diferentes peces j que se encuentren dentro del rango visual v del pez i . V_i corresponde a un vector fila (o columna) en donde sus elementos contienen los índices de los peces que se encuentren en el rango visual de cada pez i .

El comportamiento del pez i (aleatorio, persecución, cardumen, búsqueda, o saltarín) depende del estado visual de su entorno. A su vez, su estado visual depende del número de peces que es capaz de visualizar, y se clasifica en: (1) vacío; (2) lleno de peces (muchos peces); y (3) no lleno (pocos peces). En consecuencia, antes de determinar el comportamiento de un pez, es necesario determinar su estado visual según las ecuaciones (4.3) y (4.4), las mismas que corresponden a un estado visual lleno y un estado visual no lleno. El término θ es un parámetro de sintonización propio del problema.

$$\frac{|V_i|}{N} > \theta \quad (4.3)$$

$$\frac{|V_i|}{N} \leq \theta \quad (4.4)$$



Los peces en AFSA tienen 5 comportamientos: (1) aleatorio; (2) persecución; (3) cardumen; (4) búsqueda; o (5) saltarín. Estos comportamientos se describen a continuación.

4.3.1 Comportamiento Aleatorio

A veces los peces se comportan aleatoriamente, esto es, ellos se mueven sin una dirección específica en el espacio de búsqueda. El algoritmo 4.2 describe el pseudocódigo del movimiento aleatorio. Un pez se mueve aleatoriamente cuando no tiene peces dentro de su rango visual (estado visual vacío), o si el proceso de optimización se ha estancado.

El estancamiento se define como una falla del mejor individuo en la población para mejorar significativamente durante las m generaciones anteriores. La expresión para determinar si el proceso está estancado se muestra en la inecuación (4.5), donde $f_t(x)$ es el valor de la función objetivo del individuo x evaluada en la t -ésima generación (iteración), m es un parámetro de sintonización entero positivo, y η es un parámetro de sintonización real no negativo.

$$\arg \min_x f_{t-m}(x) - \arg \min_x f_t(x) < \eta \Rightarrow \text{Estancamiento} \quad (4.5)$$

Es importante señalar que la inecuación (4.5) es válida para problemas de minimización.



Para $k=1$ hasta n

$$r \leftarrow U[0,1]$$

Si $r < 1/2$ entonces

$$\rho \leftarrow U[a, b]$$

$$y_i(k) \leftarrow x_i(k) + \rho \min(v, u_k - x_i(k))$$

Caso contrario

$$\rho \leftarrow U[a, b]$$

$$y_i(k) \leftarrow x_i(k) - \rho \min(v, x_i(k) - l_k)$$

Fin si

Siguiente dimensión

Algoritmo 4.2 Comportamiento aleatorio del AFSA.

El algoritmo 4.2 muestra un movimiento aleatorio del pez i desde una posición x_i a una nueva posición y_i , donde n es la dimensión del problema (número de variables de decisión), $U[a, b]$ es un número aleatorio uniformemente distribuido en $[a, b]$, r es un número uniformemente distribuido en $[0,1]$, y v es el rango visual definido por la ecuación (4.1).

En este comportamiento y todos los consecuentes (4.3.2 — 4.3.5), a y b son números reales en donde: $a < b$ y $b \geq 0$.

4.3.2 Comportamiento Persecución

Ocasionalmente, un pez se mueve hacia la ubicación del pez que se encuentra con la mayor concentración de alimento. El comportamiento persecución de un pez i que se encuentra en una posición x_i se muestran en las siguientes ecuaciones:

$$j^* \leftarrow \arg \min_j \{f(x_j) : j \in V_i\} \quad (4.6)$$

$$y_i \leftarrow x_i + r(x_{j^*} - x_i) \quad (4.7)$$

donde $r \in [a, b]$ es una variable uniformemente distribuida, y y_i es la nueva posición del pez i . Teniendo en cuenta que se está tratando un problema de minimización, j^* es el índice del pez dentro del rango visual del pez i en una posición x_i , el cual tiene el mejor desempeño en el problema de optimización. Es obvio que, si un pez no se encuentra dentro del rango visual de otro pez, es imposible que cualquiera de los dos peces adopte el comportamiento persecución. Por lo tanto, el pez i persigue al mejor pez j^* si y solo si: (1) j^* se encuentra dentro del rango visual de i ; y (2) x_{j^*} tiene un mejor desempeño que x_i .

4.3.3 Comportamiento Cardumen

Los peces son animales sociales y frecuentemente tienden a agruparse formando así un cardumen. En este comportamiento, un pez en la posición x_i se mueve hacia el centroide c_i de los peces que se encuentren dentro de su rango visual. El comportamiento cardumen se describe en las siguientes ecuaciones:

$$c_i \leftarrow \frac{1}{|V_i|} \sum_{j \in V_i} x_j \quad (4.8)$$

$$y_i \leftarrow x_i + r(c_i - x_i) \quad (4.9)$$

donde $r \in [a, b]$ es una variable uniformemente distribuida, y y_i es la nueva posición del pez i con antigua posición x_i . El pez i adopta un comportamiento cardumen si y solo si: (1) el rango visual del pez no está lleno ni vacío (estado visual no lleno); y (2) $f(c_i)$ es mejor $f(x_i)$, es decir, $f(c_i) < f(x_i)$.

4.3.4 Comportamiento Búsqueda

Cuando un pez ve a otro pez el cual tienen más alimento, el primer pez se mueve hacia la dirección del segundo. El comportamiento búsqueda para un pez en una posición x_i se describe de la siguiente manera:



$$j \leftarrow \text{entero aleatorio} \in V_i \quad (4.10)$$

$$y_i \leftarrow x_i + r(x_j - x_i) \quad (4.11)$$

donde $r \in [a, b]$ es una variable uniformemente distribuida, y y_i es la nueva posición de x_i . El comportamiento búsqueda representa el movimiento de un pez hacia un pez aleatoriamente seleccionado que se encuentra dentro de su rango visual. De igual manera que en el comportamiento persecución, si un pez no se encuentra dentro del rango visual de cualquier otro pez, entonces este no puede adoptar el comportamiento búsqueda.

El comportamiento búsqueda ocurre: (1) si el estado visual del pez está lleno; (2) o si el estado visual del pez es no lleno y $f(c_i)$ de las ecuaciones (4.8) y (4.9) es peor que $f(x_i)$, es decir, $f(c_i) > f(x_i)$; (3) o si el estado del visual del pez es no lleno y $f(x_{j^*})$ de (4.6) y (4.7) es peor que $f(x_i)$, es decir, $f(x_{j^*}) > f(x_i)$.

4.3.5 Comportamiento Saltarín

En ocasiones, un pez salta aleatoriamente a través del espacio de búsqueda. Esto es similar a un pez saltando fuera del agua y cayendo aleatoriamente en una diferente ubicación. El comportamiento saltarín ocurre para un único pez seleccionado aleatoriamente si el proceso de optimización se encuentra estancado como se indica en la inecuación (4.5).



Para $k=1$ hasta n

$$r \leftarrow U[1,0]$$

$$\rho \leftarrow U[a,b]$$

Si $r < 1/2$ entonces

$$x_i(k) \leftarrow x_i(k) + \rho (u_k - x_i(k))$$

Caso contrario

$$x_i(k) \leftarrow x_i(k) - \rho (x_i(k) - l_k)$$

Fin si

Siguiente dimensión

Algoritmo 4.3 Comportamiento saltarín del AFSA.

El algoritmo 4.3 describe a un pez cualquiera i , saltando aleatoriamente en el espacio de búsqueda, donde $k \in [1, n]$, n representa el número de variables de decisión del problema (dimensión del espacio de búsqueda), $U[a, b]$ es un número aleatorio uniformemente distribuido en $[a, b]$, y r es un número uniformemente distribuido en $[0, 1]$.

4.3.6 Resumen de AFSA

AFSA usa un método de selección ambicioso. Esto es, después de un comportamiento aleatorio (incluido el saltarín), percusión, cardumen y búsqueda, el pez en la posición x_i se mueve a una nueva posición y_i solo si la nueva posición es mejor que la posición anterior (puede entenderse como la existencia de mayor alimento). El algoritmo 4.4 describe el pseudocódigo del Algoritmo de Cardumen de Peces Artificiales (AFSA) en donde el término $iter_{estancamiento}$ es un parámetro de sintonización que hace referencia a la iteración en la cual el algoritmo considera que el proceso de optimización podría estar estancado.



$N =$ tamaño de la población

Inicializar una población aleatoria de soluciones candidatas $\{x_i\}$ para $i \in [1, N]$

Mientras no (criterio de finalización)

Para cada individuo x_i

Encontrar los peces dentro del rango visual del pez x_i como se muestra en la ecuación 4.2

Si $V_i = \emptyset$ entonces

$y_i \leftarrow$ movimiento aleatorio como se muestra en el algoritmo 4.2

caso contrario si el rango visual de x_i esta lleno (ver ecuaciones (4.3) y (4.4)) entonces

$y_i \leftarrow$ movimiento búsqueda como se muestra en la ecuación (4.11)

caso contrario

Si $f(c_i) < f(x_i)$ (ver ecuaciones (4.8) y (4.9)) entonces

$y_i \leftarrow$ movimiento cardumen como se muestra en la ecuación (4.9)

caso contrario

$y_i \leftarrow$ movimiento búsqueda como se muestra en la ecuación (4.11)

Fin si

Si $f(x_j^*) < f(x_i)$ (ver ecuaciones (4.6) y (4.7)) entonces

$y_i \leftarrow$ movimiento persecución como se muestra en la ecuación (4.7)

caso contrario

$y_i \leftarrow$ movimiento búsqueda como se muestra en la ecuación (4.11)

Fin si

$y_i \leftarrow \arg \min\{f(x_i), f(y_i)\}$

Fin si

Siguiente individuo

$x_i \leftarrow \arg \min\{f(x_i), f(y_i)\}$ para $i \in [1, N]$

Si el algoritmo está estancado como se indica en la ecuación (4.5) y la generación actual es mayor o igual a la iteración de estancamiento ($iter_{estancamiento}$) entonces

$j \leftarrow$ entero aleatorio $\in [1, N]$

$x_j \leftarrow$ movimiento saltarín como se muestra en el algoritmo 4.3

Fin si

Siguiente generación

Algoritmo 4.4 Algoritmo de Cardumen de Peces Artificiales para minimizar una función n-dimensional $f(x)$, donde x_i es la i-ésima solución candidata.

4.4 Implementación de TS y AFSA en el PET

Básicamente los pasos a seguir para implementación de las meta-heurísticas TS y AFSA en la resolución del problema del PET son idénticos. La única diferencia radica en los ajustes de los parámetros de sintonización (paso 4.4.3), debido a que estos son propios de la naturaleza de cada meta-heurística.

Para la implementación de estas dos técnicas se utilizó el software MATLAB, conjuntamente con su paquete MATPOWER [39] para la simulación de flujos de potencia. Por otra parte, se usó el algoritmo de flujo óptimo de potencia (*runopf.m*) para evaluar la función objetivo de operación del sistema. Dicho esto, los pasos se listan a continuación (4.4.1 - 4.4.6).

4.4.1 Cargar los datos del SEP a resolver

En este punto se cargan los parámetros técnicos de los elementos que conforman el sistema eléctrico de potencia y los parámetros económicos referentes al PET, costos de operación de las unidades generadoras, costos de inversión de generación distribuida y costos de inversión para la adición de nuevos circuitos de transmisión.

En cuanto a los parámetros técnicos del SEP: datos de las líneas/cables de transmisión (*branch data*), datos de las barras (*bus data*), datos de los generadores (*generator data*), topología inicial. La topología del sistema eléctrico es muy importante debido a que brinda toda la información referente a como está estructurado el SEP en base a los elementos que lo conforman (conexión entre barras, tipos de barras).

En esta tesis se usarán dos modelos de prueba: Sistema Garver de 6 nodos y Sistema IEEE de 24 nodos. En estos modelos a diferencia de sus originales, se

incluye la adición de nuevas unidades de generación distribuida (considerando tecnología eólica, solar y biomasa de ciclo combinado CHP).

4.4.2 Configuración de parámetros generales

Los parámetros generales tienen gran impacto en la convergencia de la técnica meta-heurística seleccionada y se refieren a: selección de la técnica meta-heurística para la resolución del problema (TS o AFSA), tamaño de la población (vecindario en el caso de TS y cardumen de peces en el caso de AFSA), máximo número de iteraciones, número de experimentos que se requiere, máximo número de líneas/cables de transmisión por derecho de transmisión.

Es importante señalar que cada pez (o vecino en el caso de TS) constituye una solución candidata al problema de planeamiento, es decir, cada pez (o vecino) representa una topología de red de transmisión.

4.4.3 Ajuste de parámetros de sintonización de TS y AFSA

Los parámetros presentados en 4.4.2 están ligados a la convergencia de la meta-heurística seleccionada; en cambio, los parámetros de sintonización tienen gran incidencia en el rendimiento de cada meta-heurística. En efecto, es posible que en función del ajuste de los parámetros de sintonización una meta-heurística alcance o no el óptimo del problema.

4.4.3.1 Búsqueda Tabú (TS)

El algoritmo 4.1 describe el pseudocódigo de TS básico, en el cual solo existe un parámetro de sintonización referente al tamaño de la lista tabú T . Este parámetro conocido como *tabu tenure* define el tiempo que una solución candidata permanece en la lista prohibida T . La lista T contiene las características de las soluciones ya visitadas en el proceso de optimización. En este trabajo, estas características

corresponden a una topología candidata para la resolución del PET, es decir, es un vector que contiene el número de líneas/cables de transmisión por cada derecho de transmisión. El valor del parámetro *tabu tenure* seleccionado fue: *tabu_tenure* = 10

4.4.3.2 Algoritmo de Cardumen de Peces Artificiales (AFSA)

En [5] los valores de a y b son 0 y 1 respectivamente; sin embargo, en la aplicación al problema del PET estos valores impiden explorar todo el espacio de búsqueda, en consecuencia, era imposible llegar al óptimo con un espacio de búsqueda tan limitado. Por esta razón, para cada sistema de prueba se determinó cuales valores expandían el espacio de búsqueda hasta los límites permisibles en base a las restricciones, es decir, los valores que permitían cubrir todo el espacio de búsqueda.

El espacio de búsqueda corresponde al número de líneas/cables (circuitos) de transmisión que es posible añadir en un derecho de transmisión. En esta tesis se consideró un mínimo de cero circuitos (considerando que no existía un solo circuito en ese derecho de transmisión) y un máximo de 5. Esto es $l_k = 0$ y $u_k = 5$, donde k representa el derecho de transmisión (Ver punto 4.3).

Los parámetros de sintonización de AFSA dependen del sistema a resolver. Por lo cual los parámetros de sintonización se mostrarán en el Capítulo 5 en función de cada sistema de prueba.

4.4.4 Creación de la población inicial

Generalmente cuando no se tiene mucha información del problema a resolver se usa una técnica aleatoria uniformemente distribuida para la creación de la población inicial [35]. El pseudocódigo de este método que usa distribución aleatoria uniformemente distribuida se muestra en el algoritmo 4.5.

Normalmente, en un sistema eléctrico real al menos un circuito deberá ser añadido por el 10-30% de los derechos de transmisión disponibles. En consecuencia, en la creación de las soluciones iniciales para la resolución del PET se aplicará este criterio. Esto acelera el algoritmo de optimización debido a que se empiezan explorando regiones del espacio de búsqueda cercanas a valores óptimos. El término β corresponde al porcentaje (entre el 10% y el 30%) de los derechos de transmisión disponibles para el cálculo del número de líneas que serán añadidas inicialmente; y d se calcula según la ecuación (4.12) en donde, la expresión int indica que se considera únicamente el valor entero y se desprecia los decimales.

$$d = \text{int} \left(\left(\frac{\beta}{100} \right) k \right) \quad (4.12)$$

La población inicial x_{ij} es una matriz de dimensión $[k \times N]$, donde k dimensión del problema (número total de derechos de transmisión disponibles), N es el tamaño de la población (número de individuos en el cardumen o en el vecindario). Por su parte, los vectores x^{max} y x^{min} son de dimensión k . x^{max} contiene el número máximo circuitos por cada derecho de transmisión. x^{min} describe intrínsecamente la topología inicial del sistema ya que cada elemento del vector puede tomar dos valores: (a) número de líneas/cables existentes en cada derecho de transmisión; o (b) cero para los derechos de transmisión que no tienen circuitos.

El Algoritmo 4.5 muestra un método de distribución aleatorio uniformemente distribuido para la creación de soluciones iniciales, donde r es un número aleatorio uniformemente distribuido en $[0,1]$.



Definir x^{min} y x^{max}

Definir $\beta \in [10\%, 30\%]$

Calcular d según la ecuación (4.12)

Creación de soluciones iniciales (población candidata inicial):

Para cada $i = 1$ hasta N

$j \leftarrow$ entero aleatorio $\in [0, d]$

$r \leftarrow U[1,0]$

$x_{ij} \leftarrow$ redondear $[x_i^{min} + r(x_i^{max} - x_i^{min})]$

Fin para

Algoritmo 4.5 Creación de soluciones iniciales.

4.4.5 Evaluación de la población inicial

Luego de tener una población inicial (soluciones iniciales), es necesario evaluarla en la función objetivo del problema. En el caso del PET esta evaluación corresponde a un número real positivo que describe el costo el costo de inversión de los circuitos de transmisión.

En esta tesis, la evaluación de la función corresponde a: (i) el costo de inversión de la generación distribuida (eólica, solar fotovoltaica, biomasa CHP); (ii) costo de penalización por el recorte de carga (solución no factible debido a la operación de los GA). La formulación completa de la optimización de la función objetivo se presentó en la ecuación (3.1)

4.4.6 Proceso de optimización de cada meta-heurística

4.4.6.1 Búsqueda Tabú

La particularidad de esta meta-heurística es que, si la solución óptima no fue creada en la creación de la población inicial, es imposible que se llegue al óptimo. Esto se debe a que la TS es una meta-heurística de búsqueda local, es decir, busca

el óptimo global entre en conjunto de soluciones creadas en cada iteración y no las mejora como es el caso de la meta-heurística AFSA.

En TS un vecino corresponde a una topología de circuitos (cables/líneas de transmisión que conectan las barras del sistema que tengan derecho de transmisión). En el proceso de optimización los vecinos candidatos siempre van a estar dentro del espacio de búsqueda (crea el vecindario según el algoritmo 4.5), por lo que no es necesario verificar si los vecinos se encuentran dentro de los límites x^{max} y x^{min} .

4.4.6.2 Algoritmo de Cardumen de Peces Artificiales

En contraste con la Búsqueda Tabú, AFSA es una meta-heurística evolutiva que intenta mejorar sus soluciones candidatas. En AFSA el método de exploración usa parámetros aleatorios en el proceso de optimización buscando así, explorar regiones cercanas a una solución que presente un buen resultado.

En AFSA la posición de un pez corresponde a una topología de circuitos que mejora constantemente en busca de una posición que tenga mayor cantidad de alimento (más óptima). Debido al uso de parámetros aleatorios, la posición de un pez puede contener elementos que no estén dentro del espacio de búsqueda (fuera de los límites x^{max} y x^{min} respectivos). En efecto, es necesario verificar si la posición de cada pez pertenece al espacio de búsqueda antes de evaluar la función objetivo. Si una solución candidata contiene elementos que estén fuera del espacio de búsqueda, se los obligará a tomar el valor del límite más cercano.

De manera general, las dos meta-heurísticas guardan la posición del mejor individuo cada iteración.



4.4.7 Evaluación del criterio de parada

En estas tesis el criterio de parada se define por el número de iteraciones que realiza el proceso de optimización, es decir, una vez que se cumple el número de iteraciones finaliza el programa y se muestran los resultados relativos al PET.

4.4.8 Evaluación de la nueva población

Para la evaluación de la función objetivo (ecuación (3.1)) de la nueva población se hace uso del algoritmo de flujo óptimo de potencia de [39].

4.4.9 Diagramas de flujo

El diagrama de flujo de la implementación de las meta-heurísticas TS y AFSA en el PET se muestra en las Figura 4.1 y 4.2 respectivamente.

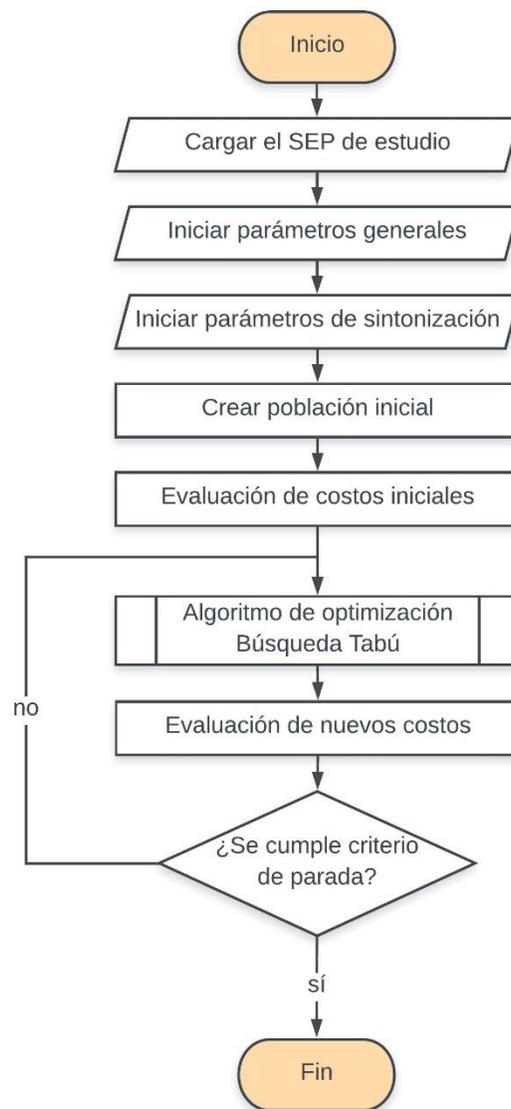


Figura 4.1 Diagrama de flujo de la implementación de la meta-heurística Búsqueda Tabú en el Planeamiento de la Expansión de los Sistemas de Transmisión

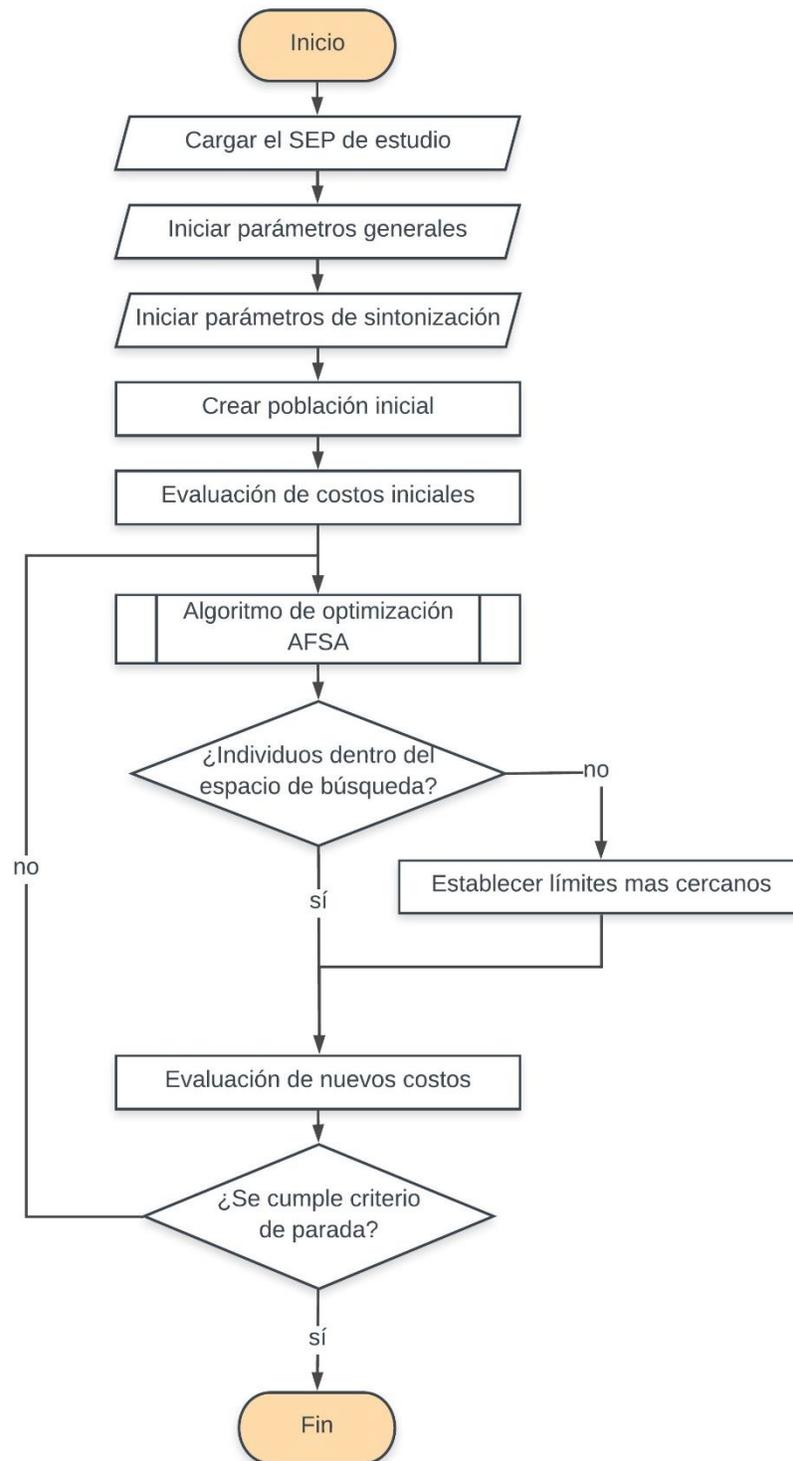


Figura 4.2 Diagrama de flujo de la implementación de la meta-heurística Algoritmo de Cardumen de Peces Artificiales el Planeamiento de la Expansión de los Sistemas de Transmisión



CAPÍTULO 5

PRUEBAS Y RESULTADOS

5.1 Sistemas de prueba

En esta tesis para resolver el impacto de la GD del PET se consideran los siguientes sistemas de prueba: Sistema Garver de 6 barras y el Sistema IEEE de 24 nodos.

5.1.1 Sistema Garver de 6 barras

El sistema Garver de 6 barras es un clásico en la resolución del problema del PET. Este sistema cuenta con un nodo aislado y 15 derechos de transmisión candidatos para la posible adición de transmisión que buscan satisfacer una demanda total de 760MW y 152MVar. Los datos correspondientes al sistema Garver de 6 nodos se muestran en el Anexo A.

5.1.2 Sistema IEEE de 24 barras

El sistema IEEE de 24 barras es un sistema más grande en comparación al sistema Garver que cuenta con 41 derechos de transmisión para satisfacer una demanda total de 8550MW y 1740MVar. Los datos correspondientes al sistema IEEE de 24 nodos se muestran en el Anexo B.

5.2 Comparación entre meta-heurísticas TS y AFSA

Con el objetivo de comparar el desempeño de las meta-heurísticas Búsqueda Tabu y Algoritmo de Cardumen de Peces Artificiales en el problema del PET, se utilizará el sistema Garver de 6 barras sin límite de reactivos (GA generan potencia reactiva sin costo - US\$ 0/MVar) y sin GD. En [35] y [40] se demuestra que el óptimo

global para este escenario es de MUSD 1,100 (mil cien millones de dólares), esto servirá para medir la tasa de éxito de cada meta-heurística.

Por otra parte, se considerará una población de 60 individuos y un total de 10 experimentos cada uno compuesto de 100 iteraciones. Posteriormente la técnica que tenga mejor desempeño se utilizará para estudiar el impacto de la GD en el PET. El desempeño de cada técnica dependerá de los siguientes aspectos:

1. Tasa de éxito: mide el porcentaje en el cual la técnica alcanzó el óptimo del problema (asumiendo que es conocido) o un valor referencial (en caso de no conocerse) en función del número de experimentos. Por ejemplo, si en cinco de diez experimentos la técnica alcanzó el óptimo, se tiene una tasa de éxito del 50%. La tasa de éxito indica la eficiencia de la meta-heurística en la resolución del problema e indirectamente indica que tan buena es para no estancarse en óptimos locales.
2. Número de iteraciones promedio: es el promedio de las iteraciones todos los experimentos en el cual la meta-heurística alcanza el óptimo. Indica las iteraciones promedio que la meta-heurística requirió para alcanzar el óptimo. A menor número de iteraciones promedio, más rápida es la convergencia de la técnica.
3. Desviación estándar del número de iteraciones promedio: indica que tan disperso se encuentra el número de iteraciones promedio de cada experimento que la técnica alcanzó el óptimo. Un valor pequeño de desviación estándar indica la proximidad del número de iteraciones de cada experimento de la técnica alcanza el óptimo.
4. Evaluaciones promedio de la función objetivo: indica el número de evaluaciones de cada solución candidata (peces/vecinos) en la función objetivo.

- **Búsqueda Tabú (TS)**

Con un *tabu tenure* igual a 10 se obtuvieron los resultados que se muestran en la Tabla 5.1.

Tabla 5.1 Desempeño de TS en el escenario de comparación de las técnicas meta-heurísticas.

Tasa de éxito (%)	0
Número de iteraciones promedio	-
Desviación estándar del número de iteraciones promedio	-
Evaluaciones promedio de la F.O.	5941
Costo mínimo (MUSD)	1,700

En base a una tasa de éxito de 0% y con un mínimo plan de MUSD 1,700, se puede concluir que la meta-heurística TS (específicamente el del Algoritmo 4.1) no tiene un buen desempeño en la aplicación para la resolución del PET usando el modelo AC. Por otra parte, la Figura 5.1 muestra los 10 experimentos del proceso de optimización.

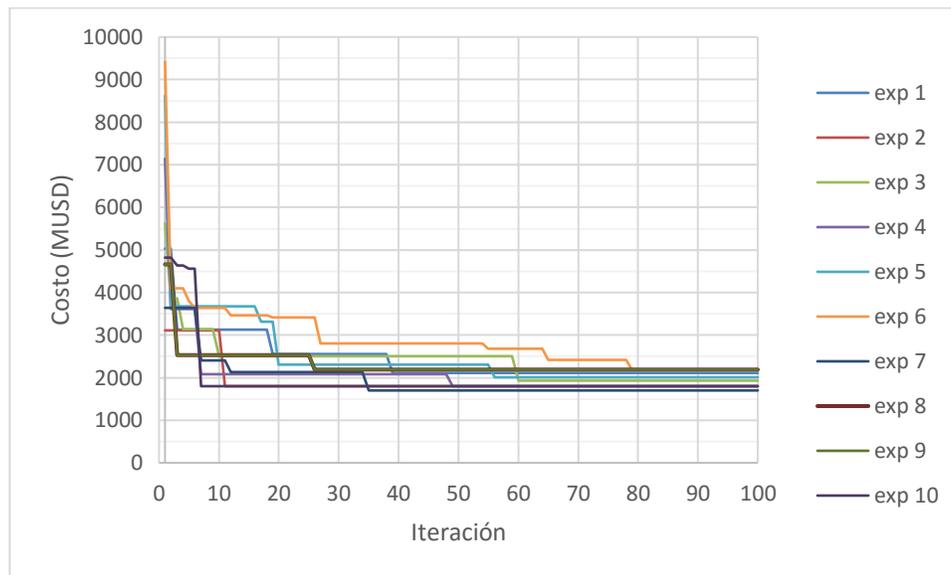


Figura 5.1 Proceso de optimización del algoritmo TS considerando 10 experimentos (exp) y 100 iteraciones.

- **Algoritmo de Cardumen de Peces Artificiales (AFSA)**

Los parámetros de sintonización de AFSA se muestran en la Tabla 5.2. El parámetro $\theta = 0,5$ pretende que el estado visual de los peces este siempre lleno (compensando así el número de iteraciones de este escenario). En efecto, se utiliza primordialmente el comportamiento búsqueda en el proceso de optimización. Posteriormente, en 5.3 se utilizará un $\theta = 0,9$ y un mayor número de iteraciones buscando que en el proceso de optimización intervengan todos los comportamientos presentes en el Algoritmo 4.4.

Tabla 5.2 Parámetros de sintonización de AFSA en el sistema Garver de 6 barras considerando el escenario de comparación de las técnicas meta-heurísticas.

δ	θ	m	η	$iter_{estan}$	Búsqueda		Cardumen		Persecución		Saltarín	
					a	b	a	b	a	b	a	b
2.5	0,5	1	0	60	-2	1	-1	1	-1	1	-2	1

Los resultados y la gráfica de los experimentos de AFSA se muestran en la Tabla 5.2 y Figura 5.2 respectivamente.

Tabla 5.3 Desempeño de AFSA en el escenario de comparación de las técnicas meta-heurísticas.

Tasa de éxito (%)	50
Número de iteraciones promedio	71
Desviación estándar del número de iteraciones promedio	38
Evaluaciones promedio de la F.O.	6112
Costo mínimo (MUSD)	1,100

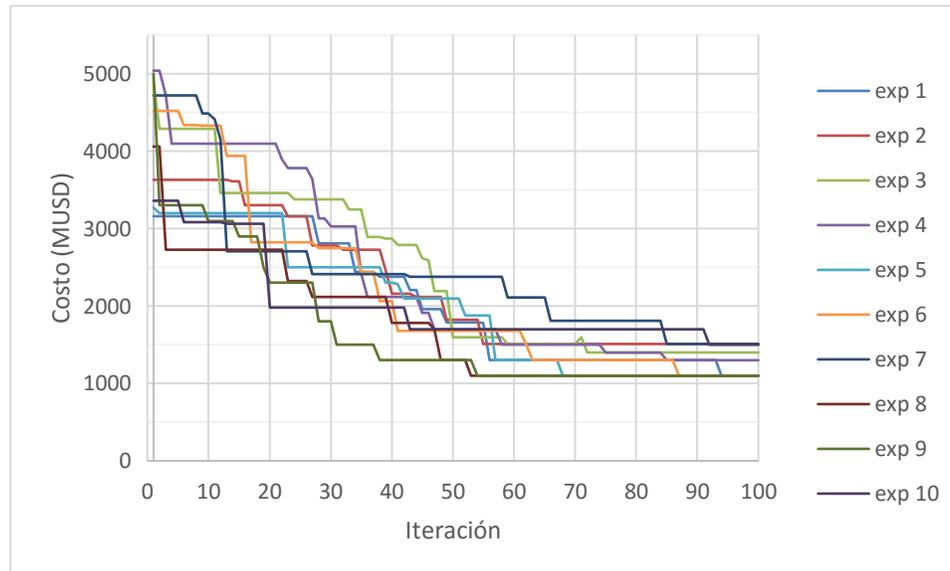


Figura 5.2 Proceso de optimización del algoritmo AFSA considerando 10 experimentos (exp) y 100 iteraciones.

Los resultados de AFSA en la Tabla 5.3 frente a los resultados de TS en la Tabla 5.1 muestran que la técnica AFSA tiene un mejor desempeño en la resolución del PET. En consecuencia, los siguientes escenarios serán resueltos mediante meta-heurística AFSA.

5.3 Pruebas

Se resuelve el problema del PET dividiéndolo en dos subsecciones: 1) PET sin considerar la presencia de GD y 2) PET considerando la presencia de GD. Las pruebas se realizarán en los sistemas de prueba Garver de 6 nodos e IEEE de 24 nodos con las siguientes consideraciones:

- Para todos los escenarios se considera una población de 60 peces o individuos.
- El número de iteraciones para todos los escenarios del sistema Garver de 6 nodos es de 150; mientras que para los escenarios del sistema IEEE de 24 nodos es de 250.
- Se consideran todos los escenarios sin límites de reactivos.
- Los parámetros de sintonización de AFSA para todos los escenarios del sistema Garver de 6 nodos se muestran en la Tabla 5.4.
- Los parámetros de sintonización de AFSA para todos los escenarios del sistema IEEE de 24 nodos se muestran en la Tabla 5.5.
- En los escenarios con GD se considerará dos tipos de tecnología en cualquier barra que presente demanda de potencia activa (GD cercana a los consumidores). Adicionalmente, se disminuirá el costo de inversión de cada tecnología en un 50 y 75% con dos objetivos: i) analizar la variación de la función objetivo; y ii) estimar costos futuros debido de inversión de GD debido a que estos disminuyen constantemente con el avance tecnológico.
- Los costos relacionados a la adición de circuitos de transmisión que se presentan en los Anexos A y B son referenciales para cada modelo de prueba. Para el estudio del impacto de la GD en el PET es

necesario hacer que estos costos sean comparables con los costos de inversión de GD que se muestran en la Tabla 2.1. En efecto, los costos presentados en los Anexos A y B son proporcionales a los presentados en [40].

- En los escenarios con GD se buscará que los costos relacionados a la adición de circuitos sean más realistas, de tal modo que el proceso de optimización vea como atractivo la inversión de la GD.

Tabla 5.4 Parámetros de sintonización de AFSA para los escenarios del Sistema Garver de 6 nodos.

δ	θ	m	η	$iter_{estan}$	Búsqueda		Cardumen		Persecución		Saltarín	
					a	b	a	b	a	b	a	b
2.5	0,95	1	0	70	-2	1	-1	1	-1	1	-2	1

Tabla 5.5 Parámetros de sintonización de AFSA para los escenarios del Sistema IEEE de 24 nodos.

δ	θ	m	η	$iter_{estan}$	Búsqueda		Cardumen		Persecución		Saltarín	
					a	b	a	b	a	b	a	b
2.5	0,8	1	0	100	-2	1	-2	1	-2	1	-2	2

5.4 PET sin GD

5.4.1 Sistema Garver de 6 nodos sin GD (Garver_sin_GD)

Los parámetros que describen el desempeño de la meta-heurística en el problema del PET se muestran en la Tabla 5.6. Se encontró que el mejor plan de expansión, es decir, la topología más barata que cumple con todos los requerimientos técnicos del sistema fue de MUSD 1,100. Al comparar con los resultados obtenidos en [35] y [40] (USD $110 \cdot 10^3$ y USD 110 respectivamente – costos referenciales del sistema Garver) se demuestra que los costos de inversión

del PET son coincidentes. Sin embargo, la topología óptima encontrada en este trabajo es diferente a la topología presentada en [35] y [40].

La Tabla 5.7 indica que el plan óptimo obtenido resulta de la adición de 3 circuitos entre las barras 2-6 y 1 circuito entre las barras 3-5; mientras que el plan óptimo en [35] y [40] resulta de la adición de 1 circuito entre las barras 3-5 y 3 circuitos entre las barras 4-6. La diferencia consiste en que la topología de [35] y [40] es viable si y solo si existe un recorte de carga de aproximadamente de 4,3MW en la barra 2; esto es un generador artificial (GA) abasteciendo 4,3MW en la barra 2.

Tabla 5.6 Desempeño de AFSA en el Sistema Garver sin límite de reactivos y sin considerar la presencia de GD.

Tasa de éxito (%)	80
Número de iteraciones promedio	82
Desviación estándar del número de iteraciones promedio	83
Evaluaciones promedio de la F.O.	5784
Costo mínimo (MUSD)	1,100

Tabla 5.7 Costos del PET del Sistema Garver sin límite de reactivos y sin considerar la presencia de GD.

Circuito		n_{ij}	$C_{ijtotal}$ MUSD
i	j		
2	6	3	900
3	5	1	200
Total		4	1,100

La figura 5.3 muestra la convergencia del mejor experimento (menor número iteraciones en el que se alcanzó el óptimo) de AFSA del sistema Garver.

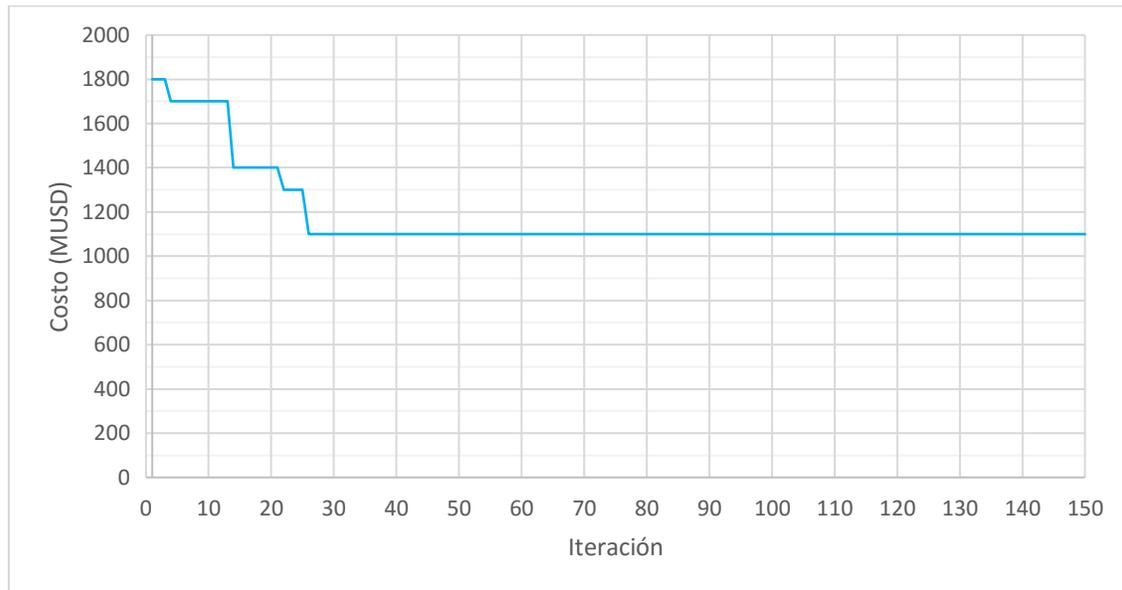


Figura 5.3 Proceso de convergencia del mejor experimento de AFSA en el Sistema Garver de 6 barras sin considerar la presencia de GD.

5.4.2 Sistema IEEE de 24 nodos sin GD (IEEE24_sin_GD)

En la Tabla 5.8 se puede apreciar el desempeño de AFSA en el PET del Sistema IEEE de 24 nodos. Se determinó MUSD 3,500 como el costo mínimo de la función objetivo con las siguientes adiciones: 1 circuito entre las barras 1-2; 1 circuito entre las barras 6-10; y 1 circuito entre las barras 7-8.

Además, la Figura 5.4 describe la convergencia del proceso de optimización del mejor experimento de AFSA para el sistema IEEE de 24 barras.

Tabla 5.8 Desempeño de AFSA en el Sistema IEEE de 24 barras sin límite de reactivos y sin considerar la presencia de GD.

Tasa de éxito (%)	30
Número de iteraciones promedio	163
Desviación estándar del número de iteraciones promedio	28
Evaluaciones promedio de la F.O.	17590
Costo mínimo (MUSD)	3,500

Tabla 5.9 Costos del PET del Sistema IEEE de 24 barras sin límite de reactivos y sin considerar la presencia de GD.

Circuito		n_{ij}	$C_{totalij}$ MUSD
i	j		
1	2	1	300
6	10	1	1,600
7	8	1	1,600
Total		3	3,500

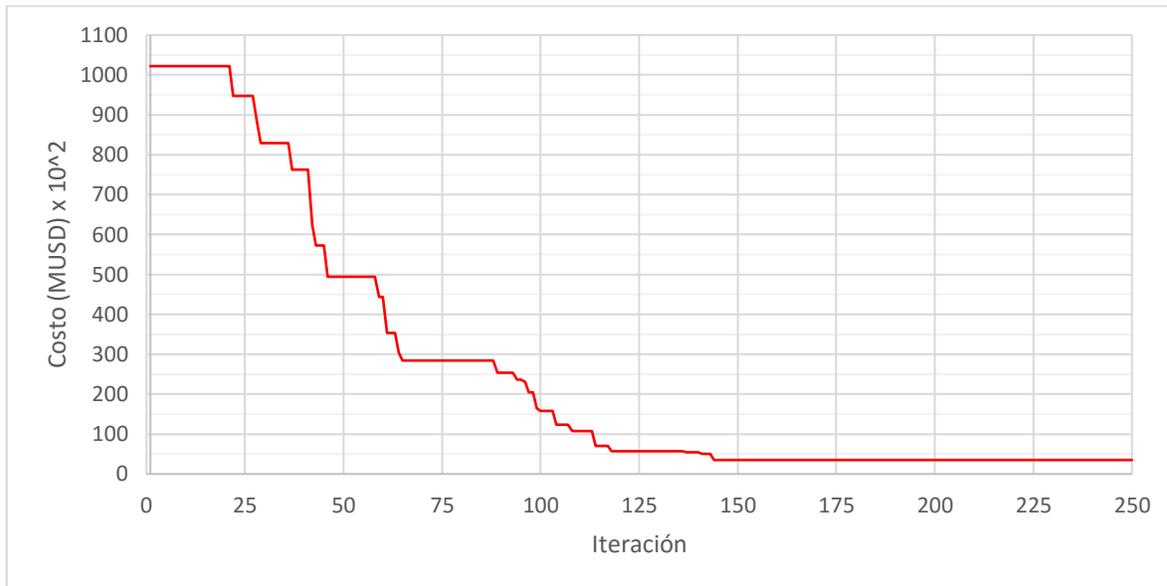


Figura 5.4 Proceso de convergencia del mejor experimento de AFSA en el Sistema IEEE de 24 barras sin considerar la presencia de GD.

5.5 PET con GD

5.5.1 Sistema Garver de 6 nodos con GD

En los puntos 5.5.1.1 - 5.1.1.3 se considera el sistema Garver con la presencia de GD según las características que se muestran en el Anexo A.2; mientras que en el punto 5.1.1.4 se considera el sistema Garver con GD en todas las barras que presenten demanda de potencia activa (Ver Anexo A.3).

5.5.1.1 Sin reducción de los costos de inversión de GD (Garver_GD_1)

La Tabla 5.10 muestra que la topología óptima del sistema Garver con costos originales de inversión de GD, consiste en la adición de un circuito entre las barras 4-6. El costo óptimo de PET para este escenario corresponde a un total de 300 MUSD.



Por otra parte, la Tabla 5.11 muestra los resultados relativos a la GD. El término $P_{inst_{GD}}$ indica la potencia óptima en MW que se debería se instalado en el escenario Garver_GD_1; mientras que el término $C_{inv_{GD}}$ indica el costo de inversión en MUSD de $P_{inst_{GD}}$. Se puede notar que el generador 3 conectado a la barra 4 despacha 0 MW de su potencia instalada. Esto se debe a que el costo de inversión de Biomasa CHP es relativamente mayor a los costos de Fotovoltaica y Eólica; en efecto, el flujo óptimo de potencia de MATPOWER (*runopf.m*) prefiere despachar las tecnologías más baratas.

La Tabla 5.12 indica un costo óptimo total (valor de la función objetivo) igual a 760.560 MUSD, el cual corresponde a la suma del costo de inversión del PET y el costo de inversión de GD. Al comparar este resultado con el mostrado en la Tabla 5.7 correspondiente al escenario Garver_sin_GD, se puede notar que efectivamente la GD reduce el costo de la inversión del PET de 1,100 MUSD a 760.560 MUSD.

Por último, la Figura 5.5 muestra la convergencia del mejor experimento del escenario Garver_sin_GD.

Tabla 5.10 Costos del PET del escenario Garver_GD_1 sin límite de reactivos.

Circuito		n_{ij}	$C_{total_{ij}}$ MUSD
i	j		
4	6	1	300
Total		1	300

Tabla 5.11 Costos de inversión y potencia óptima de GD del escenario Garver_GD_1 sin límite de reactivos.

GD	Barra	P_{instGD} MW	C_{invk} USD/kW	C_{invGD} MUSD
1 Eólico	2	50	2,346	117.300
2 Fotovoltaico	2	50	2,025	101.250
3 Biomasa CHP	4	0	5,792	0.000
4 Eólico	4	31	2,346	72.726
5 Fotovoltaico	5	50	2,025	101.250
6 Eólico	5	29	2,346	68.034
Total		210		460.560

Tabla 5.12 Costo total de la función objetivo del escenario Garver_GD_1 sin límite de reactivos.

MUSD	
C_{PET}	300
C_{invGD}	460.560
Total	760.560

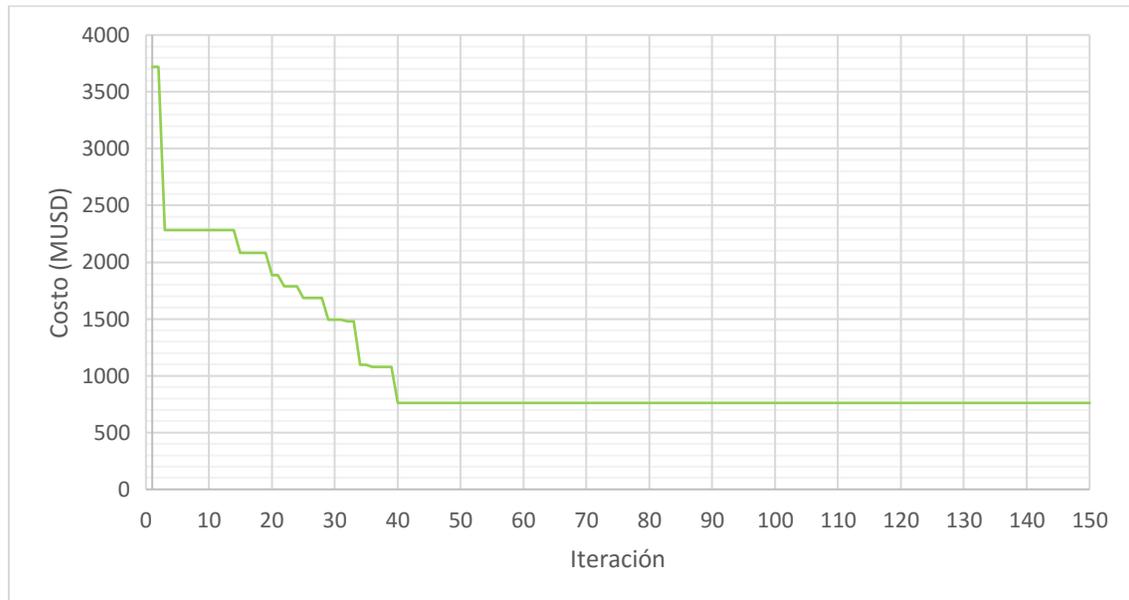


Figura 5.5 Proceso de convergencia del mejor experimento de AFSA en el escenario Garver_GD_1.

5.5.1.2 Reducción de los costos de inversión de GD del 50% (Garver_GD_2)

El escenario Garver_GD_2 a diferencia del Garver_GD_1 considera un 50% de decremento del costo de inversión por potencia instalada c_{inv_k} , en donde k representa toda barra con GD.

De los resultados mostrados en las Tablas 5.13 - 5.15 se puede notar que el costo de inversión y la potencia instalada de GD se mantiene constante; mientras que los costos de inversión de GD y el costo total de la función objetivo decrecen linealmente al 50% de su valor. Se encontró que el valor óptimo de la función objetivo ($C_{PET} + C_{invGD}$) es 530.280 MUSD.

La Figura 5.6 muestra la convergencia del mejor experimento del escenario Garver_GC_2.

Tabla 5.13 Costos del PET del escenario Garver_GD_2 sin límite de reactivos.

Circuito		n_{ij}	$C_{total_{ij}}$ MUSD
i	j		
4	6	1	300
Total		1	300

Tabla 5.14 Costos de inversión y potencia óptima de GD del escenario Garver_GD_2 sin límite de reactivos.

GD	Barra	P_{instGD} MW	C_{inv_k} USD/kW	C_{invGD} MUSD
1 Eólico	2	50	1,173	58.650
2 Fotovoltaico	2	50	1,0125	50.625
3 Biomasa CHP	4	0	2,896	0.000
4 Eólico	4	31	1,173	36.363
5 Fotovoltaico	5	50	1,0125	50.625
6 Eólico	5	29	1,173	34.017
Total		210		230.280

Tabla 5.15 Costo total de la función objetivo del escenario Garver_GD_2 sin límite de reactivos.

MUSD	
C_{PET}	300
C_{invGD}	230.280
Total	530.280

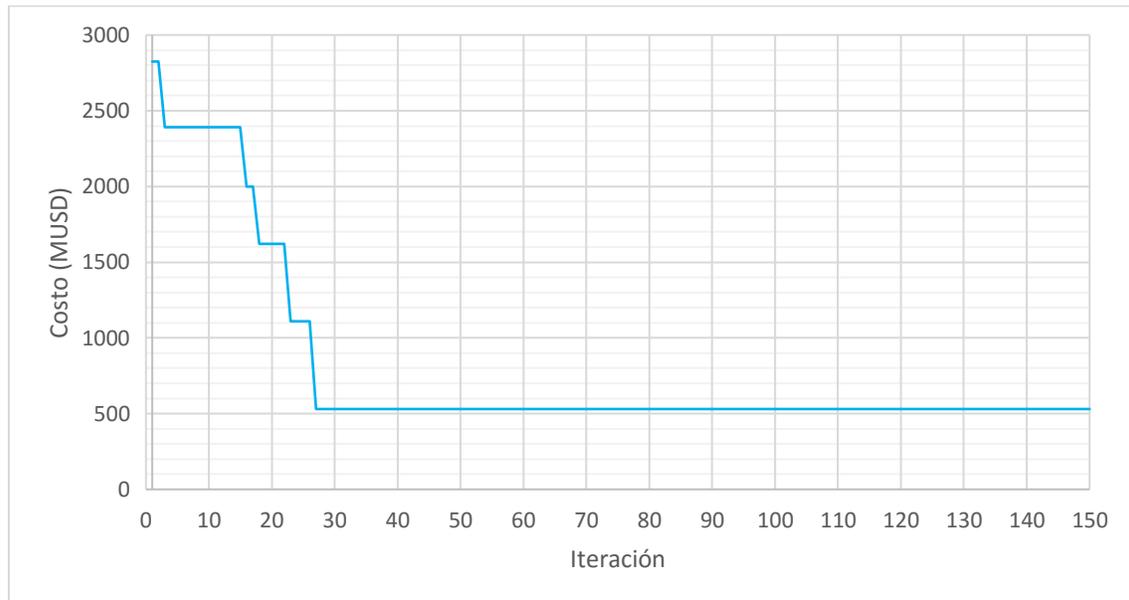


Figura 5.6 Proceso de convergencia del mejor experimento de AFSA en el escenario Garver_GD_2.

5.5.1.3 Reducción de los costos de inversión de GD del 75% (Garver_GD_3)

Con el mismo razonamiento aplicado en Garver_GD_2, el escenario Garver_GD_3 difiere del Garver_GD_1 debido a la reducción del término c_{inv_k} en un 75%.

De igual manera, este escenario muestra que el costo de inversión del PET y la potencia instalada de GD se mantiene constante en 300 MUSD y en 210 MW respectivamente; los costos de inversión de GD y el costo total de la función objetivo decrecen linealmente en un 75% respecto al escenario Garver_GD_1 (ver Tablas 5.11 y 5.17). El costo total mínimo encontrado se muestra en la Tabla 5.18 con un valor de 415.140 MUSD.

Tabla 5.16 Costos del PET del escenario Garver_GD_3 sin límite de reactivos.

Circuito		n_{ij}	$C_{total_{ij}}$ MUSD
i	j		
4	6	1	300
Total		1	300

Tabla 5.17 Costos de inversión y potencia óptima de GD del escenario Garver_GD_3 sin límite de reactivos.

GD	Barra	P_{instGD} MW	C_{inv_k} USD/kW	C_{invGD} MUSD
1 Eólico	2	50	586.5	29.325
2 Fotovoltaico	2	50	506.25	25.3125
3 Biomasa CHP	4	0	1,448	0.000
4 Eólico	4	31	586.5	18.1815
5 Fotovoltaico	5	50	506.25	25.3125
6 Eólico	5	29	586.5	17.0085
Total		210		115.140

Tabla 5.18 Costo total de la función objetivo del escenario Garver_GD_3 sin límite de reactivos.

MUSD	
C_{PET}	300
C_{invGD}	115.140
Total	415.140

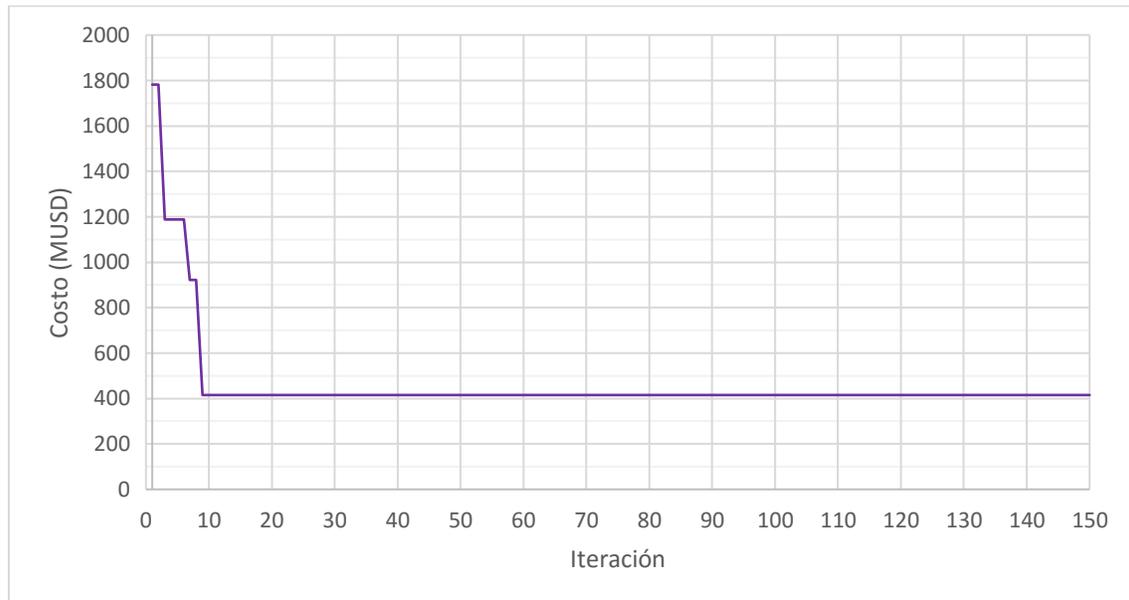


Figura 5.7 Proceso de convergencia del mejor experimento de AFSA en el escenario Garver_GD_3.

La Figura 5.8 describe la relación lineal del costo total de la función objetivo (C_{total}) en base a la variación porcentual del costo de inversión de GD (Inv. GD) para los escenarios Garver_GD_1, Garver_GD_2 y Garver_GD_3. Este decremento lineal se debe a que el costo de Inv. PET se mantuvo constante en 300 MUSD. Además, el tener la misma topología para los escenarios Garver_GD_1, Garver_GD_2 y Garver_GD_3 obliga a que se mantenga constante el despacho de GD a pesar de que c_{inv_k} varíe porcentualmente.

Teniendo en cuenta tales consideraciones, se considera un nuevo escenario para el sistema Garver que considera GD en todas las barras que presenten demanda de potencia activa (sección 5.5.1.4) sin reducción de costos de inversión de GD (como el casi Garver_GD_1). De esta manera se busca analizar cuáles son las consecuencias de una mayor incidencia de GD en el Sistema Garver.

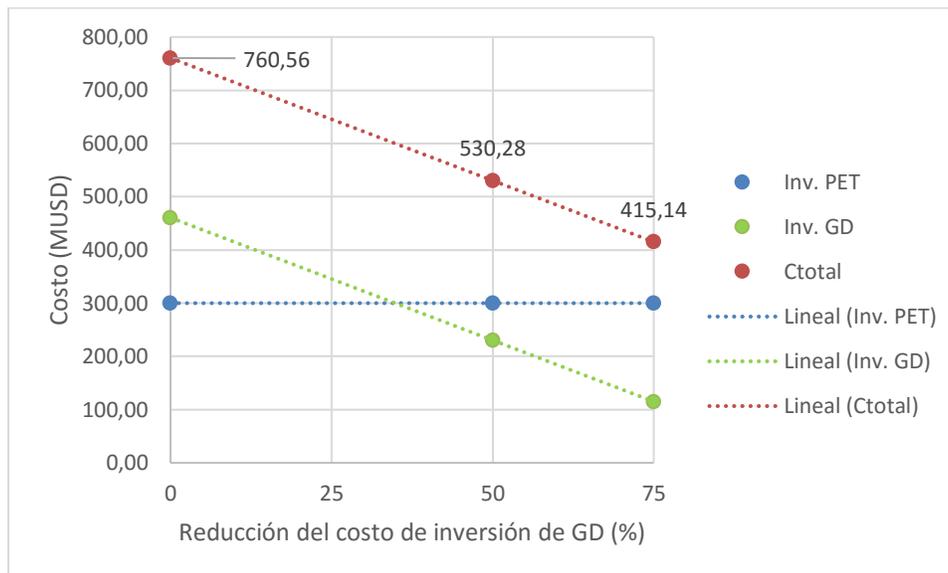


Figura 5.8 Variación del costo total (Ctotal) y del PET (Inv. PET) en función del decremento del costo de inversión de GD (Inv. GD). Reducción de 0%, 50% y 75% en los escenarios Garver_GD_1, Garver_GD_2 y Garver_GD_3 respectivamente.

5.5.1.4 Sistema Garver con GD en todas las barras que tienen demanda de potencia activa (Garver_GD_4)

Los datos para el escenario Garver_GD_4 se exponen en el Anexo A.3.

En esta sección se describe el efecto que provoca una mayor incidencia de GD en el sistema Garver. Si bien, el costo $C_{totalij}$ de la Tabla 5.19 se mantiene constante en 300 MUSD respecto a los escenarios anteriores, la topología cambia ya que se añade 1 circuito entre las barras 2-6 (1 circuito entre barras 4-6 en los escenarios anteriores).

Además, en la Tabla 5.20 se puede notar que los datos totales de potencia óptima instalada y costo de inversión referentes a la GD discrepan con los resultados del escenario Garver_GD_1 (sin reducción de costos de inversión de GD). En el caso de Garver_GD_1 se obtiene una potencia óptima total instalada de

210 MW a un costo de 460.560 MUSD; mientras que para Garver_GD_4 se obtiene 214 MW a un costo de 453.894 MUSD. Es importante señalar que en la Tabla 5.20 se despreciaron todas las tecnologías de GD que no despachaban potencia o tenían un valor cercano a cero ($\leq 10E-6$).

Al comparar los resultados de las Tablas 5.12 y 5.21, se puede notar que, aunque el escenario Garver_AC_4 tenga mayor potencia instalada de GD, el costo de inversión del mismo resulta en un menor valor. En efecto, el escenario Garver_GD_4 resulta en el mejor plan con un costo de la función objetivo de 753.894 MUSD, frente a 760.560 MUSD del escenario Garver_GD_1.

Tabla 5.19 Costos del PET del escenario Garver_GD_4 sin límite de reactivos.

Circuito		n_{ij}	$C_{total_{ij}}$ MUSD
i	j		
2	6	1	300
Total		1	300

Tabla 5.20 Costos de inversión y potencia óptima de GD del escenario Garver_GD_4 sin límite de reactivos.

GD	Barra	$P_{inst_{GD}}$ MW	C_{inv_k} USD/kW	$C_{inv_{GD}}$ MUSD
1 Fotovoltaico	1	50	2,025	101.250
4 Fotovoltaico	2	50	2,025	101.250
8 Eólico	4	38	2,346	89.148
9 Fotovoltaico	5	50	2,025	101.250
10 Eólico	5	26	2,346	60.996
Total		214		453.894

Tabla 5.21 Costo total de la función objetivo del escenario Garver_GD_3 sin límite de reactivos.

MUSD	
C_{PET}	300
C_{invGD}	453.894
Total	753.894

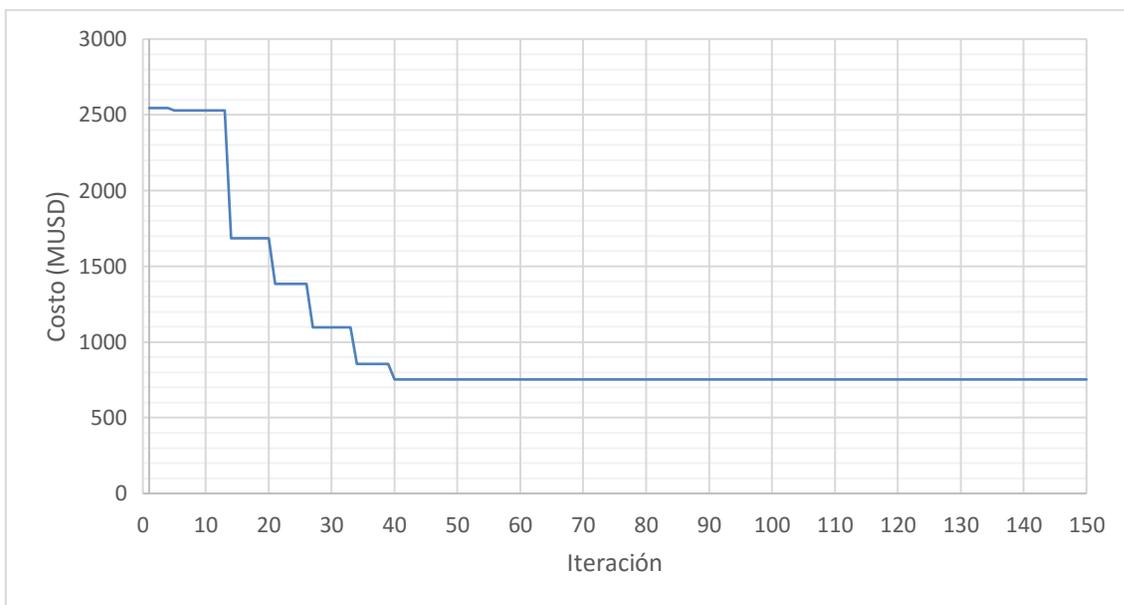


Figura 5.9 Proceso de convergencia del mejor experimento de AFSA en el escenario Garver_GD_4.

5.5.1.5 Resumen de costos de los diferentes escenarios del sistema Garver.

En la Tabla 5.22 se muestran los diferentes resultados para cada escenario del sistema Garver. En donde, es fácil notar el impacto positivo de la GD en el PET, debido a que reduce notablemente los costos de la adición de circuitos de transmisión, es decir, costos de inversión del PET.



Tabla 5.22 Resumen comparativo de los escenarios del Sistema Garver todos sin límites de reactivos.

Escenario	Garver_sin_GD	Garver_GD_1	Garver_GD_2	Garver_GD_3	Garver_GD_4
C_{PET} (MUSD)	1,100	300	300	300	300
C_{invGD} (MUSD)	-	460.560	230.280	115.140	453.894
Total	1,100	760.560	530.280	415.140	753.894

5.5.2 Sistema IEEE de 24 nodos con GD

En los siguientes puntos se considera el sistema IEEE de 24 barras con GD en todas las barras que presenten demanda de potencia activa, es decir, las barras 1-10, 13-16 y 18-20, tal como se muestra en el Anexo B.2. Las Tablas 5.24, 5.27 y 5.30 relativas a los resultados de GD, mostrarán únicamente los resultados de las tecnologías de GD que despachen potencia activa, todas las demás serán despreciadas tal como se hizo para el escenario Garver_GD_4.

5.5.2.1 Sin reducción de los costos de inversión de GD (IEEE24_GD_1)

Debido a la presencia de GD en el escenario IEEE24_GD_1 no es necesario la adición de circuitos de transmisión, es decir, $C_{totalij} = 0$. En cuanto a la GD, la Tabla 5.23 indica las potencias óptimas instaladas y el costo de inversión de GD, resultando en un total de 224 MW y 482.811 MUSD respectivamente. Debido a que el costo resultante de inversión de PET es cero, el costo total de la función objetivo es igual al costo de inversión total de GD, tal como se muestra en la Tabla 5.24.

Por otra parte, en la Figura 5.10 se puede visualizar la convergencia del mejor experimento para el escenario IEEE24_GD_1.

Tabla 5.23 Costos de inversión y potencia óptima de GD del escenario IEEE24_GD_1 sin límite de reactivos.

GD	Barra	P_{instGD} MW	C_{invk} USD/kW	C_{invGD} MUSD
4 Fotovoltaico	2	33	2,025	66.825
11 Fotovoltaico	6	50	2,025	101.250
12 Eólico	6	50	2,346	117.300
21 Fotovoltaico	13	50	2,025	101.250
24 Eólico	14	41	2,346	96.186
Total		224		482.811

Tabla 5.24 Costo total de la función objetivo del escenario IEEE24_GD_1 sin límite de reactivos.

MUSD	
C_{PET}	0
C_{invGD}	482.811
Total	482.811



Figura 5.10 Proceso de convergencia del mejor experimento de AFSA en el escenario IEEE_GD_1

Un costo de inversión del PET igual a cero indica que es imposible obtener una mejor topología, pues con la inversión de GD (Tabla 5.23) es innecesario la adición de circuitos. Por lo tanto, el costo total de la función objetivo será igual a la inversión de GD y la reducción de los costos de inversión de GD tendrán un comportamiento lineal, tal como sucedió con los escenarios Garver_GD_1, Garver_GD-2 y Garver_GD_3.

5.5.2.2 Reducción de los costos de inversión de GD del 50% (IEEE24_GD_2)

Para el escenario IEEE_GD_2 no es necesario la adición de circuitos si existe la potencia instalada de GD que se muestra en la Tabla 5.25. Se requiere: 33 MW del GD 4 (fotovoltaico) en la barra 2; 50 MW del GD 11 (fotovoltaico) en la barra 6; 50 MW del GD 12 (eólico) en la barra 6; 50 MW del GD 21 (fotovoltaico) en la barra 13, y 41 MW del GD 24 (eólico) en la barra 14. Esto provee un total de 224 MW a un costo de 241.4055 MUSD. La Tabla 5.26 muestra un costo total de la función objetivo de 241.4055 MUSD igual al costo de inversión de GD.

La Figura 5.11 muestra el proceso de optimización del mejor experimento para el escenario IEEE24_GD_2.

Tabla 5.25 Costos de inversión y potencia óptima de GD del escenario IEEE24_GD_2 sin límite de reactivos.

GD	Barra	P_{instGD} MW	c_{invk} USD/kW	C_{invGD} MUSD
4 Fotovoltaico	2	33	1,0125	33.4125
11 Fotovoltaico	6	50	1,0125	50.625
12 Eólico	6	50	1,173	58.650
21 Fotovoltaico	13	50	1,0125	50.625
24 Eólico	14	41	1,173	48.093
Total		224		241.4055

Tabla 5.26 Costo total de la función objetivo del escenario IEEE24_GD_2 sin límite de reactivos.

MUSD	
C_{PET}	0
C_{invGD}	241.4055
Total	241.4055

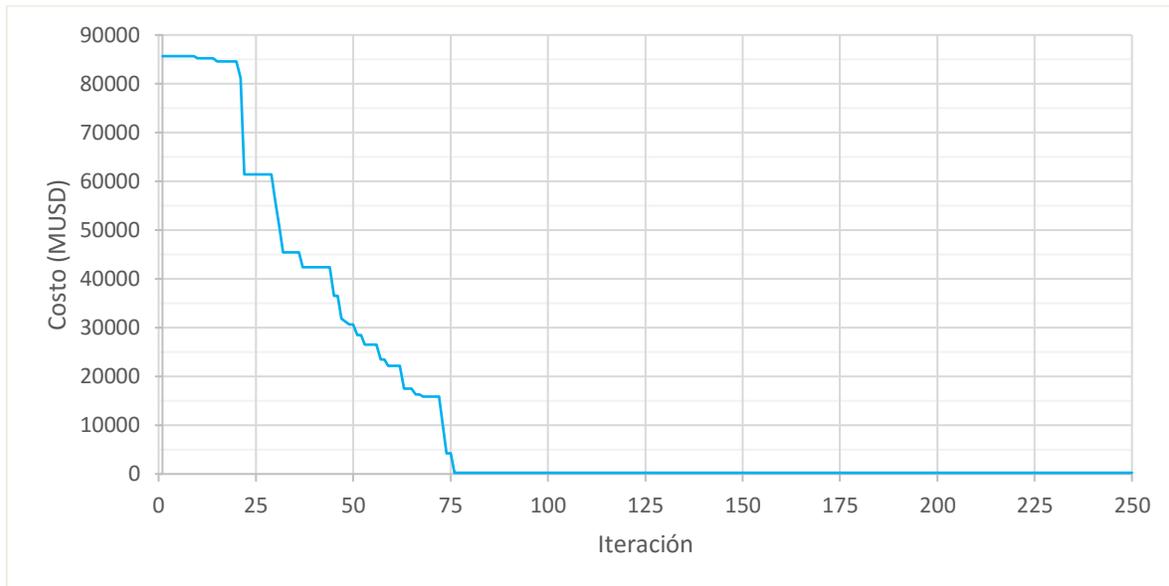


Figura 5.11 Proceso de convergencia del mejor experimento de AFSA en el escenario IIEEE24_GD_2.

5.5.2.3 Reducción de los costos de inversión de GD del 75% (IEEE24_GD_3)

Con el mismo razonamiento aplicado en el escenario IIEEE24_GD_2, las Tablas 5.27 y 5.28 muestran los resultados para el escenario IEEE24_GD_3. En el cual se obtiene: un costo de inversión de PET igual a cero; un costo de inversión de GD de 120.7027 MUSD; y un costo total de la función objetivo de 120.7027 MUSD.



Tabla 5.27 Costos de inversión y potencia óptima de GD del escenario IEEE24_GD_3 sin límite de reactivos.

GD	Barra	P_{instGD} MW	C_{invk} USD/kW	C_{invGD} MUSD
4 Fotovoltaico	2	33	506.25	16.7062
11 Fotovoltaico	6	50	506.25	25.3125
12 Eólico	6	50	586.5	29.325
21 Fotovoltaico	13	50	506.25	25.3125
24 Eólico	14	41	586.5	24.0465
Total		224		120.7027

Tabla 5.28 Costo total de la función objetivo del escenario IEEE24_GD_3 sin límite de reactivos

MUSD	
C_{PET}	0
C_{invGD}	120.7027
Total	120.7027

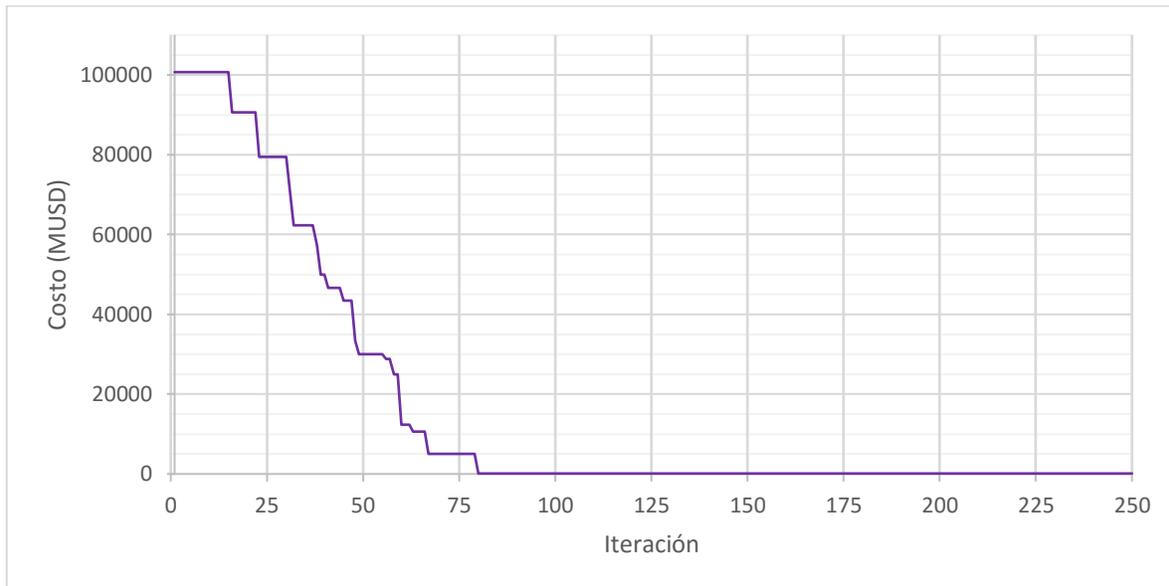


Figura 5.12 Proceso de convergencia del mejor experimento de AFSA en el escenario IEEE24_GD_3

La Figura 5.13 describe la relación lineal del costo total de la función objetivo (C_{total}) en base a la variación porcentual del costo de inversión de GD (Inv. GD) para los escenarios IEEE24_GD_1, IEEE_GD_2 y IEEE_GD_3. En este caso al tener un costo de inversión de PET (Inv. PET) las gráficas de Inv. GD y C_{total} son coincidentes.

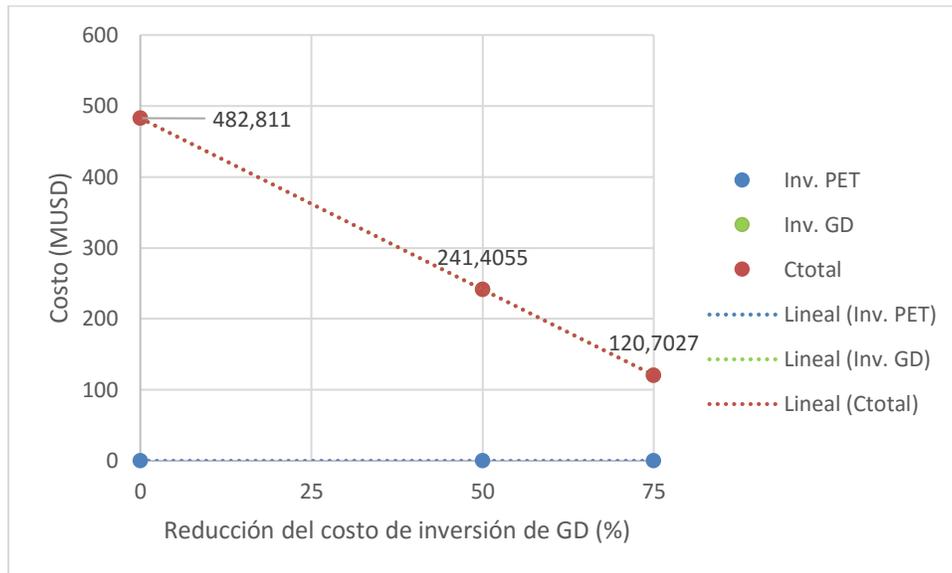


Figura 5.13 Variación del costo total (Ctotal) y del PET (Inv. PET) en función del decremento del costo de inversión de GD (Inv. GD). Reducción de 0%, 50% y 75% en los escenarios IEEE24_GD_1, IEEE24_GD_2 y IEEE24_GD_3 respectivamente.

5.5.2.4 Resumen de costos de los diferentes escenarios del sistema IEEE de 24 barras.

En la Tabla 5.29 se muestran los diferentes resultados para cada escenario del sistema IEEE. Al igual que los resultados del sistema Garver, es fácil notar que para sistema IEEE de 24 barras la incidencia de GD también impacta positivamente en el PET. De hecho, la presencia de GD en el sistema IEEE de 24 barras hace que sea innecesario la adición de un solo circuito de transmisión.



Tabla 5.29 Resumen comparativo de los escenarios del Sistema IEEE de 24 barras todos sin límites de reactivos.

Escenario	IEEE24_sin_GD	IEEE24_GD_1	IEEE24_GD_2	IEEE24_GD_3
C_{PET} (MUSD)	3,500	0	0	0
C_{invGD} (MUSD)	-	482.811	241.4055	120.7027
Total (MUSD)	3,500	482.811	241.4055	120.7027

En base a los resultados mostrados en esta sección, se determina que el impacto de la GD resulta en la reducción de los costos de inversión de la expansión del sistema de transmisión. Esto con un enfoque netamente económico; con un enfoque técnico, la incidencia de GD en el SEP podría implicar en la reducción de las pérdidas de transmisión de energía dado el caso que la GD evite la construcción parcial o completa de circuitos de transmisión.

CAPÍTULO 6

CONCLUSIONES

6.1 Conclusiones

En esta tesis se estudió el impacto económico de la incidencia de Generación Distribuida (GD) en el Planeamiento de la Expansión de los Sistemas de Transmisión (PET). Para ello, se consideró un planeamiento estático en un horizonte a largo plazo (10 años) usando el modelo AC. En primera instancia, se propuso las meta-heurísticas Búsqueda Tabu (TS) y Algoritmo de Cardumen de Peces Artificiales (AFSA) para la resolución del problema.

Posteriormente, se seleccionó la meta-heurística AFSA, la cual mostró mejor desempeño a la hora de resolver el problema del PET. Es importante indicar que la técnica AFSA en [5] no mostraba un buen desempeño en la resolución del problema, teniendo una tasa de éxito de 0% para los sistemas de prueba utilizados: Garver 6 barras e IEEE 24 barras. Para ello, fue necesario realizar pequeñas adecuaciones en cuanto a la exploración del espacio de búsqueda y al proceso de estancamiento, mejorando notablemente su desempeño. Cabe mencionar que particularmente el estado visual del pez “lleno” es el que mejor desempeño presenta en la búsqueda del óptimo.

En cuanto a la GD, se escogieron tres tipos de tecnología: eólica, fotovoltaica y biomasa de ciclo combinado CHP; con el criterio de representar las tecnologías a pequeña escala de mayor incidencia en el país y también en base a la información de costos reales de inversión de GD que existe en la literatura [18]. La modelación se lo hizo considerando la GD como la concentración de toda generación a pequeña escala (correspondiente al mismo tipo de tecnología) en la barra del sistema de

distribución, tal como se modela la carga en un SEP. El límite de potencia instalada de GD fue de 50 MW.

Por otra parte, la razón por la cual esta tesis consideró costos proporcionales de adición de circuitos a los costos que aparecen en la literatura [40], se debe a que al trabajar con sistemas de prueba los costos de los mismos no son realistas. De esta forma, se compensó los costos referentes al PET con los costos referentes a la GD haciendo atractivo la inversión de GD antes que la adición de circuitos.

En base a los resultados de los experimentos realizados en los sistemas de prueba, se concluye que la presencia de GD puede reducir los costos de inversión del PET evitando la adición de circuitos de transmisión. Por ejemplo, en el caso del sistema Garver, la incidencia de GD reduce el plan del escenario Garver_sin_GD de 1,100 MUSD a un plan de 453.894 MUSD en el escenario Garver_GD_4. De igual manera para el sistema IEEE de 24 barras, se reduce de 3,500 MUSD en el escenario IEEE24_sin_GD a 482.811 MUSD en el escenario IEEE24_GD_1.

Este trabajo representa un aporte interesante en el tema del PET, ya que la mayoría de impactos técnicos y económicos de la GD se centran a nivel del sistema de distribución. El concepto de este trabajo puede ser utilizado por empresas de transmisión tanto en un sector eléctrico verticalmente integrado como en un sector con estructura de mercado eléctrico.

6.2 Trabajos futuros

Debido al alcance de esta tesis, no se consideró factores importantes como: pérdidas, costos de operación de los generadores existentes, generación de potencia reactiva de GD, contingencias del sistema de transmisión. Considerando que, la incidencia de GD puede evitar la adición de circuitos de transmisión, es indiscutible que esto reduciría también las pérdidas, ya que la energía no tendrá que ser transportada grandes distancias desde las grandes centrales hasta los centros



de consumo; sino más bien, la GD cubriría la demanda localmente. Además, no se consideró la generación de reactivos por parte de los generadores distribuidos.

Los trabajos futuros podrían extenderse al análisis completo del impacto de la GD en el PET considerando pérdidas, contingencias, costos de operación de las unidades existen y generación de potencia reactiva de las tecnologías de GD.

ANEXOS

Anexo A

A.1 Datos del Sistema Garver de 6 barras

Tabla A.1.1 Datos de Barra del Sistema Garver.

<i>Barra</i>	<i>Tipo</i>	P_D	Q_D	P_G^{max}	P_{GC}^{min}	Q_{GC}^{max}	Q_{GC}^{min}
1	Slack	80	16	160	0	48	-10
2	PQ	240	48	-	-	-	-
3	PV	40	8	370	0	101	-10
4	PQ	160	32	-	-	-	-
5	PQ	240	48	-	-	-	-
6	PV	0	0	610	0	183	-10

Tabla A.1.2 Datos de Líneas del Sistema Garver.

<i>Desde nodo (i)</i>	<i>Hasta nodo (j)</i>	r_{ij} pu	x_{ij} pu	b_{ij}^{shunt} pu	S_{ij}^{max} MVA	$c_{ij} \times 10^7$ US\$	$n_{ij}^{inicial}$	n_{ij}^{max}
1	2	0,040	0,400	0,00	120	40	1	5
1	3	0,038	0,380	0,00	120	38	0	5
1	4	0,060	0,600	0,00	100	60	1	5
1	5	0,020	0,200	0,00	120	20	1	5
1	6	0,068	0,680	0,00	90	68	0	5
2	3	0,020	0,200	0,00	120	20	1	5
2	4	0,040	0,400	0,00	120	40	1	5
2	5	0,031	0,310	0,00	120	31	0	5
2	6	0,030	0,300	0,00	120	30	0	5
3	4	0,059	0,590	0,00	102	59	0	5
3	5	0,020	0,200	0,00	120	20	1	5
3	6	0,048	0,480	0,00	120	48	0	5
4	5	0,063	0,630	0,00	95	63	0	5
4	6	0,030	0,300	0,00	120	30	0	5
5	6	0,061	0,610	0,00	98	61	0	5

A.2 Datos de GD del Sistema Garver de 6 barras con GD en las barras 2, 4 y 5

Tabla A.2.1 Datos de GD del sistema Garver para los escenarios Garver_GD_1, Garver_GD_2, Garver_GD_3.

<i>Barra</i>	<i>Generador</i>	<i>Tecnología</i>	P_{GD}^{max}	P_{GD}^{min}	Q_{GC}^{max}	Q_{GC}^{min}
2	1	Eólica	50	0	0	0
2	2	Fotovoltaica	50	0	0	0
4	3	Biomasa CHP	50	0	0	0
4	4	Eólica	50	0	0	0
5	5	Fotovoltaica	50	0	0	0
5	6	Eólica	50	0	0	0

A.3 Datos de GD del Sistema Garver de 6 barras con GD en todas las barras con demanda de potencia activa

Tabla A.2.2 Datos de GD del sistema Garver para el escenario Garver_GD_4.

<i>Barra</i>	<i>Generador</i>	<i>Tecnología</i>	P_{GD}^{max}	P_{GD}^{min}	Q_{GC}^{max}	Q_{GC}^{min}
1	1	Fotovoltaica	50	0	0	0
1	2	Eólica	50	0	0	0
2	3	Eólica	50	0	0	0
2	4	Fotovoltaica	50	0	0	0
3	5	Fotovoltaica	50	0	0	0
3	6	Biomasa CHP	50	0	0	0
4	7	Biomasa CHP	50	0	0	0
4	8	Eólica	50	0	0	0
5	9	Fotovoltaica	50	0	0	0
5	10	Eólica	50	0	0	0

Anexo B**B.1 Datos del Sistema IEEE de 24 barras****Tabla B.1.1** Datos de Barra del Sistema IEEE de 24 barras.

<i>Barra</i>	<i>Tipo</i>	P_D	Q_D	P_{GC}^{max}	P_{GC}^{min}	Q_{GC}^{max}	Q_{GC}^{min}
1	Slack	324	66	576	0	240	-150
2	PV	291	60	576	0	240	-150
3	PQ	540	111	-	-	-	-
4	PQ	222	45	-	-	-	-
5	PQ	213	42	-	-	-	-
6	PV	408	84	-	-	0	-300
7	PV	375	75	900	0	540	0
8	PQ	513	105	-	-	-	-
9	PQ	525	108	-	-	-	-
10	PQ	585	120	-	-	-	-
11	PQ	0	0	-	-	-	-
12	PQ	0	0	-	-	-	-
13	PV	795	162	1773	0	720	0
14	PV	582	117	-	-	600	-150
15	PV	951	192	645	0	330	-150
16	PV	300	60	465	0	240	-150
17	PQ	0	0	-	-	-	-
18	PV	999	204	1200	0	600	-150
19	PQ	543	111	-	-	-	-
20	PQ	384	78	-	-	-	-
21	PV	0	0	1200	0	600	-150
22	PV	0	0	900	0	288	-180
23	PV	0	0	1980	0	930	-375
24	PQ	0	0	-	-	-	-



Tabla B.1.2 Datos de Líneas del Sistema IEEE de 24 barras.

Desde nodo (i)	Hasta nodo (j)	r_{ij} pu	x_{ij} pu	b_{ij}^{shunt} pu	S_{ij}^{max} MVA	$c_{ij} \times 10^8$ US\$	$n_{ij}^{inicial}$	n_{ij}^{max}
1	2	0,0026	0,0139	0,4611	200	3	1	5
1	3	0,0546	0,2112	0,0572	220	55	1	5
1	5	0,0218	0,0845	0,0229	220	22	1	5
2	4	0,0328	0,1267	0,0343	220	33	1	5
2	6	0,0497	0,1920	0,0520	220	50	1	5
3	9	0,0308	0,1190	0,0322	220	31	1	5
3	24	0,0023	0,0839	0,0000	600	50	1	5
4	9	0,0268	0,1037	0,0281	220	27	1	5
5	10	0,0228	0,0883	0,0239	220	23	1	5
6	10	0,0139	0,0605	2,4590	200	16	1	5
7	8	0,0159	0,0614	0,0166	220	16	1	5
8	9	0,0427	0,1651	0,0447	220	43	1	5
8	10	0,0427	0,1651	0,0447	220	43	1	5
9	11	0,0023	0,0839	0,0000	600	50	1	5
9	12	0,0023	0,0839	0,0000	600	50	1	5
10	11	0,0023	0,0839	0,0000	600	50	1	5
10	12	0,0023	0,0839	0,0000	600	50	1	5
11	13	0,0061	0,0476	0,0999	625	66	1	5
11	14	0,0054	0,0418	0,0879	625	58	1	5
12	13	0,0061	0,0476	0,0999	625	66	1	5
12	23	0,0124	0,0966	0,2030	625	134	1	5
13	23	0,0111	0,0865	0,1818	625	120	1	5
14	16	0,0050	0,0389	0,0818	625	54	1	5
15	16	0,0022	0,0173	0,0364	625	24	1	5
15	21	0,0063	0,0490	0,1030	625	68	2	5
15	24	0,0067	0,0519	0,1091	625	72	1	5
16	17	0,0033	0,0259	0,0545	625	36	1	5
16	19	0,0030	0,0231	0,0485	625	32	1	5
17	18	0,0018	0,0144	0,0303	625	20	1	5
17	22	0,0135	0,1053	0,2212	625	146	1	5
18	21	0,0033	0,0259	0,0545	625	36	2	5



19	20	0,0051	0,0396	0,0833	625	55	2	5
20	23	0,0028	0,0216	0,0455	625	30	2	5
21	22	0,0087	0,0678	0,1424	625	94	1	5
1	8	0,0348	0,1344	0,0000	220	35	0	5
2	8	0,0328	0,1267	0,0000	220	33	0	5
6	7	0,0497	0,1920	0,0000	220	50	0	5
13	14	0,0057	0,0447	0,0000	625	62	0	5
14	23	0,0080	0,0620	0,0000	625	86	0	5
16	23	0,0105	0,0822	0,0000	625	114	0	5
19	23	0,0078	0,0606	0,0000	625	84	0	5

B.2 Datos de GD del Sistema IEEE de 24 barras con GD en todas las barras con demanda de potencia activa

Tabla B.2.1 Datos de GD del sistema IEEE de 24 barras para los escenarios IEEE24_GD_1, IEEE24_GD_2, IEEE24_GD_3.

Barra	Generador	Tecnología	P_{GD}^{max}	P_{GD}^{min}	Q_{GC}^{max}	Q_{GC}^{min}
1	1	Eólica	50	0	0	0
1	2	Fotovoltaica	50	0	0	0
2	3	Eólica	50	0	0	0
2	4	Fotovoltaica	50	0	0	0
3	5	Eólica	50	0	0	0
3	6	Fotovoltaica	50	0	0	0
4	7	Biomasa CHP	50	0	0	0
4	8	Eólica	50	0	0	0
5	9	Fotovoltaica	50	0	0	0
5	10	Eólica	50	0	0	0
6	11	Fotovoltaica	50	0	0	0
6	12	Eólica	50	0	0	0
7	13	Fotovoltaica	50	0	0	0
7	14	Eólica	50	0	0	0
8	15	Eólica	50	0	0	0
8	16	Fotovoltaica	50	0	0	0



9	17	Biomasa CHP	50	0	0	0
9	18	Eólica	50	0	0	0
10	19	Fotovoltaica	50	0	0	0
10	20	Eólica	50	0	0	0
13	21	Fotovoltaica	50	0	0	0
13	22	Eólico	50	0	0	0
14	23	Fotovoltaica	50	0	0	0
14	24	Eólico	50	0	0	0
15	25	Fotovoltaica	50	0	0	0
15	26	Eólico	50	0	0	0
16	27	Fotovoltaica	50	0	0	0
16	28	Eólico	50	0	0	0
18	29	Fotovoltaica	50	0	0	0
18	30	Eólico	50	0	0	0
19	31	Eólico	50	0	0	0
19	32	Fotovoltaica	50	0	0	0
20	33	Biomasa CHP	50	0	0	0
20	34	Eólica	50	0	0	0

Referencias Bibliográficas

- [1] R.A. Gallego, A. Escobar, R.A. Romero, y A. Monticelli, *Planeamiento de la Expansión de Sistemas de Transmisión de Energía Eléctrica*, Pereira, Colombia: Universidad Tecnológica de Pereira.
- [2] P.B. Callejas, C.T. Mancera, y G.L. Bayona (2011). *Planeamiento Estático de la Expansión de Sistemas de Transmisión: Comparación de Algoritmos Genéticos, Búsqueda Tabú y Enumeración Truncada*, Rev. UIS Ing., Vol. 2, No. 2.
- [3] I. Segura (2005), *Evaluación del Impacto de la Generación Distribuida en Sistemas de Distribución Primaria de Energía Eléctrica* (Tesis Doctoral), Valencia, España: Universidad de Valencia.
- [4] H. Zhang, G.T. Heydt, V. Vittal, and H.D. Mittelmann (2012), *Transmission expansion Planning Using an AC Model: Formulations and Possible Relaxations*, Rev. IEEE PES General Meeting, pp. 1–8.
- [5] D. Simon, (2013). *Evolutionary Optimization Algorithms*, Hoboken, USA: John Wiley & Sons.
- [6] J.M.A. Ortiz (1998), *A Methodology For Automatic Transmission Network Expansion Planning Using a Tabu Search Algorithm* (M.Sc. Thesis in Portuguese), Federal University of Santa Catarina, Florianópolis, Brazil.
- [7] J. Wu, J. Liu, Z.G. LU, and G.T. SONG (2007), *Artificial Fish Swarm Algorithm Suitable to Transmission Network Planning*, Power system technology.
- [8] H. Seifi, and M.S. Sepasian (2011), *Electric Power System Planning: Issues, Algorithms and Solutions*, Berlin, Germany: Springer Science & Business Media.



- [9] G.C. Oliveira, A.P.C Costa, and S. Binato (1995), *Large Scale Transmission Network Planning Using Optimization and Heuristic Techniques*, Vol. 10, No. 4, pp 1828-1834.
- [10] R. Romero, A. Monticelli, A. Garcia, and S. Haffner (2002), *Test systems and mathematical models for transmission network expansion planning*, *Rev. IEEE Proceedings Gener. Transm. Distrib.*, Vol. 149, No. 1.
- [11] G. Latorre, R. Cruz, J. Areiza, and A. Villegas (2003), *Classification of Publications and Models on Transmission Expansion Planning*, *Rev. IEEE Trans. Power Systems*, Vol. 18, No. 2, pp. 938-946.
- [12] A-M. Borbely, and J.F. Kreider (2001), *Distributed Generation - The Power Paradigm for the New Millennium*, Boca Raton, USA: CRC Press.
- [13] R. Zeballos, y M. Vignolo (2000), *¿Redes de transmisión o generación distribuida?*, Montevideo, Uruguay: Universidad de la República, Instituto de Ingeniería Eléctrica [IIE].
- [14] Fundación de la Energía de la Comunidad de Madrid [FENERCOM] (2007), *Guía Básica de la Generación Distribuida*, Madrid, España: Gráficas Elisa, S.A.
- [15] F.M. Gonzales-Longatt (2008), *Impacto de la Generación Distribuida en los Sistemas de Potencia* (Tesis doctoral). Universidad Central de Venezuela, Caracas, Venezuela.
- [16] F.M. Gonzales-Longatt, and C. Fortoul (2005), Review of Distributed Generation Concept: Attempt of Unification. *Proceeding of International Conference on Renewable Energies and Power Quality (ICREPQ '05)*, Spain.
- [17] T. Ackermann, G. Andersson, y L. Söder (2000), *Distributed generation: a definition*. *Rev. Electric Power Systems Research*, Vol. 57, pp 195-204.



- [18] National Renewable Energy Laboratory [NREL] (2016). Distributed Generation Renewable Energy Estimate of Costs. USA: NREL Energy Analysis. Recuperado de <http://www.nrel.gov/analysis/tech-lcoe-re-cost-est.html>.
- [19] V.H. Méndez Quezada (2005), *Generación Distribuida: Aspectos técnicos y su tratamiento regulatorio* (Tesis doctoral). Universidad Pontificia Comillas de Madrid, Madrid, España.
- [20] F.M. González Longatt (2008), *Impacto de la Generación Distribuida en el Comportamiento de los Sistemas de Potencia* (Tesis doctoral). Universidad Central de Venezuela, Caracas, Venezuela.
- [21] V.H. Méndez, J. Rivier, J.I de la Fuente, T. Gómez, J. Arceluz, J. Marín, and A. Madurga (2006), *Impact of distributed generation on distribution investment deferral*. *Rev. Electrical Power and Energy Systems*, Vol. 28, pp. 244-252.
- [22] J. Zhao, and J. Foster (2010), *Investigating the impacts of distributed generation on transmission expansion cost: an Australian case study*. *Rev. Economics and Management Group Papers from University of Queensland*, Vol. 2.
- [23] J. Zhao, J. Foster, Z. Dong, and K. Wong (2011), *Flexible Transmission Network Planning Considering Distributed Generation Impacts*. *Rev. IEEE Trans. on Power Systems*, Vol. 26, No. 3, pp 1434-1443.
- [24] C. Rathore, and R. Roy (2013), *Impact of Distributed Generation in Transmission Network Expansion Planning Problem*. 3rd International Conference on Electric Power and Energy Conversion Systems. Yildiz Technical University: Istanbul, Turkey.



-
- [25] R. Hejeejo, and J. Qiu (2017), *Probabilistic transmission expansion planning considering distributed generation and demand response programs*. Rev. *IET Renewable Power Generation*, Vol. 11, pp 650-658.
- [26] L.L. Garver (1970), *Transmission Network Estimation Using Linear Programming*. Rev. *IEEE Trans. Power Appar. Syst.*, No. 7, pp. 1688–1697.
- [27] M. Escobar, A. Duque, J. Melchor, y A. Escobar (2012), *Planeamiento de sistemas de transmisión de energía eléctrica usando AMPL*, Pereira, Colombia: Scientia et Technica.
- [28] H. K. Youssef, and R. Hackam (1989), *New Transmission Planning Model*. Rev. *IEEE Trans. Power Systems*, Vol. 4, No. 1, pp. 9–18.
- [29] E. Bustamante-Cedeño, and S. Arora (2009), *Multi-Step Simultaneous Changes Constructive Heuristic Algorithm for Transmission Network Expansion Planning*. Rev. *Electric Power Systems Research*, Vol. 79, No. 4, pp. 586–594.
- [30] I. Sánchez, R. Romero, J. Mantovani, and M. Rider (2005), *Transmission-expansion planning using the DC model and nonlinear-programming technique*. Rev. *IEEE Proc. Gener. Transm. Distrib.*, Vol 152, No. 6, pp 763-769.
- [31] R.A. Gallego, A.B. Alves, A. Monticelli, and R. Romero (1997), *Parallel simulated annealing applied to long term transmission network expansion planning*. Rev. *IEEE Trans. Power Systems*, Vol. 12, No. 1, pp. 181-188.
- [32] E. da Silva, J. Areiza, G. Couto de Oliveira, and S. Binato (2001), *Transmission network expansion planning under a Tabu Search approach*, Rev. *IEEE Trans. Power Systems*, Vol. 16, No. 1, pp. 62-68.
- [33] R. Bent, G. L. Toole, and A. Berscheid (2012), *Transmission Network Expansion Planning with Complex Power Flow Models*. Rev. *IEEE Trans. on*



Power Systems, Vol. 27, No. 2, pp. 904–912.

- [34] M. J. Rider, A. V. Garcia, and R. Romero (2007), *Power System Transmission Network Expansion Planning Using AC Model*, *Rev. IET Gener. Transm. Distrib.*, Vol. 1, No. 5, pp. 731–742.
- [35] S.P. Torres, and C.A. Castro (2014), *Expansion planning for smart transmission grids using AC model and shunt compensation*. *Rev. IET Gener. Transm. Distrib.*, Vol. 8, No. 5, pp. 966–975, 2014.
- [36] A.C. Riojas (2005), *Conceptos, algoritmo y aplicación al problema de las N-reinas* (Tesis de pregrado). Universidad Nacional Mayor de San Marcos, Lima, Perú.
- [37] F. Glover (1989), *Tabu Search — Part I*. *Rev. ORSA Journal on Computing*, Vol. 1, No. 3, pp. 190–206.
- [38] F. Glover (1990), *Tabu Search — Part II*. *Rev. ORSA Journal on Computing*, Vol. 2, No. 3, pp. 4–32.
- [39] R.D. Zimmerman, C.E. Murillo-Sánchez, and R.J. Thomas (2011), *MATPOWER: Steady-State Operations, Planning, and Analysis Tools for Power Systems Research and Education*. *Rev. IEEE Trans. on Power Systems*, Vol. 26, No. 1, pp. 12–19.
- [40] M.J. Rider Flores (2006), *Planejamento da Expansão de Sistemas de Transmissão Usando os Modelos CC – CA e Técnicas de Programação Não – Linear* (Tesis doctoral). Universidade Estadual de Campinas, Campinas, Brasil.