

ESCUELA POLITÉCNICA NACIONAL

FACULTAD DE INGENIERÍA ELÉCTRICA Y ELECTRÓNICA

**PLANIFICACIÓN ÓPTIMA DE LA EXPANSIÓN DE SISTEMAS DE
TRANSMISIÓN CON RESTRICCIONES DE SEGURIDAD**

ALGORITMO DE OPTIMIZACIÓN HEURÍSTICA B

**TRABAJO DE INTEGRACIÓN CURRICULAR PRESENTADO COMO
REQUISITO PARA LA OBTENCIÓN DEL TÍTULO DE INGENIERO ELÉCTRICO**

JHON ANTONIO CARVAJAL ZAMBRANO

jhon.carvajal@epn.edu.ec

DIRECTOR: ING. WALTER ALBERTO VARGAS CONTRERAS, MSC.

walter.vargas@epn.edu.ec

Quito, Febrero 2024

CERTIFICACIONES

Yo, JHON ANTONIO CARVAJAL ZAMBRANO declaro que el trabajo de integración curricular aquí descrito es de mi autoría; que no ha sido previamente presentado para ningún grado o calificación profesional; y, que he consultado las referencias bibliográficas que se incluyen en este documento.

JHON ANTONIO CARVAJAL ZAMBRANO

Certifico que el presente trabajo de integración curricular fue desarrollado por JHON ANTONIO CARVAJAL ZAMBRANO, bajo mi supervisión.

ING. WALTER ALBERTO VARGAS CONTRERAS, MSC.
DIRECTOR

DECLARACIÓN DE AUTORÍA

A través de la presente declaración, afirmamos que el trabajo de integración curricular aquí descrito, así como el (los) producto(s) resultante(s) del mismo, son públicos y estarán a disposición de la comunidad a través del repositorio institucional de la Escuela Politécnica Nacional; sin embargo, la titularidad de los derechos patrimoniales nos corresponde a los autores que hemos contribuido en el desarrollo del presente trabajo; observando para el efecto las disposiciones establecidas por el órgano competente en propiedad intelectual, la normativa interna y demás normas.

JHON ANTONIO CARVAJAL ZAMBRANO

ING. WALTER ALBERTO VARGAS CONTRERAS, MSC.

DEDICATORIA

A mi querida madre, Jenny Zambrano, cuyo amor incondicional, sacrificio y apoyo constante han sido la fuerza motriz que me ha permitido alcanzar mis objetivos. Gracias por ser mi inspiración y mi roca inquebrantable.

A mi padre, Willian, mis queridos hermanos, Steve y Aymar, y a todos aquellos que generosamente me brindaron su apoyo y cariño a lo largo de mi vida. Y finalmente, a Pepito, mi fiel mascota, quien estuvo a mi lado durante la ejecución de este trabajo, brindándome alegría, amor y su compañía incondicional.

AGRADECIMIENTO

Agradezco profundamente a mi familia, cuyo incondicional apoyo ha hecho posible cada paso de este camino. A mis compañeros, quienes, con sus palabras de aliento, breves explicaciones o simplemente su presencia, me brindaron la fortaleza necesaria para alcanzar mis objetivos. Su contribución no solo ha sido invaluable, sino también el motor que impulsó mi éxito.

Al Ingeniero Walter Vargas, Msc., mi sincero agradecimiento por su inigualable paciencia, sólidos conocimientos y valiosos consejos, los cuales fueron fundamentales en la realización de este trabajo.

CONTENIDO

Resumen	1
Abstract	2
1 INTRODUCCIÓN	3
1.1 Objetivo general	4
1.2 Objetivos específicos	4
1.3 Alcance	4
1.4 Marco teórico	5
1.4.1 Sistemas eléctricos de potencia	5
1.4.2 Flujo de potencia	6
1.4.3 Flujo óptimo de potencia	8
1.4.4 Flujo óptimo de potencia con restricciones de seguridad	8
1.4.5 Planificación de la expansión del sistema de transmisión	8
1.4.6 Planificación de la expansión del sistema de transmisión considerando restricciones de seguridad	9
1.4.7 Algoritmos heurísticos	9
2 METODOLOGÍA	11
2.1 Formulación matemática	12
2.1.1 Matriz de Admitancia Ybarra	12
2.1.2 Formulación del Flujo Óptimo de Potencia DC - DCOPF	16
2.1.3 Formulación Matricial del Flujo Óptimo de Potencia DC con Restric- ciones de Seguridad - SCDCOPF	19
2.1.4 Problema de Planificación de la Expansión del Sistema de Transmi- sión - NTEP	31
2.1.5 Problema de Planificación óptima de la Expansión del Sistema Eléc- trico de Transmisión Considerando Restricciones de Seguridad, For- mulación matricial	34
2.1.6 Algoritmo de optimización de mapeo por media-varianza - MVMO	36
2.1.7 Implementación Python	39

3	RESULTADOS Y DISCUSIÓN	47
3.1	Red de Garver	47
3.1.1	Planificación óptima - Sin Consideraciones de redespacho ni restricciones de seguridad	49
3.1.2	Planificación óptima - Considerando redespacho y sin considerar restricciones de seguridad	51
3.1.3	Planificación óptima - Considerando redespacho y restricciones de seguridad	52
3.1.4	Planificación óptima - Considerando restricciones de seguridad y sin considerar redespacho	54
3.1.5	Planificación óptima - Resumen de resultados	55
3.2	Sistema IEEE de 24 barras	57
3.2.1	Planificación óptima - Sin considerar restricciones de seguridad	58
3.2.2	Planificación óptima - Considerando restricciones de seguridad	59
3.2.3	Planificación óptima - Al considerar restricciones de seguridad y la construcción de nuevos corredores	60
4	CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES	62
4.1	Conclusiones	62
4.2	Recomendaciones	63
5	REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS	64
6	ANEXOS	I

RESUMEN

La planificación de los sistemas eléctricos de transmisión se realiza siguiendo parámetros técnicos y económicos. Los planes de transmisión deben garantizar un desempeño adecuado del sistema eléctrico y hacerlo al menor costo posible. La construcción de ramales a la red, determinados por el plan obtenido, propenderá garantizar un funcionamiento correcto en condiciones normales como en situaciones de contingencias al menor costo posible. Bajo estas consideraciones se presenta, a través del lenguaje de programación Python, una herramienta que permita la determinación de planes de expansión óptimos del sistema de transmisión. El instrumento descrito considerará restricciones de seguridad, contingencias, de los distintos ramales con el fin de garantizar las condiciones de operatividad antes descritas.

La herramienta computación se encontrará potenciada bajo un algoritmo heurístico, algoritmo de optimización de mapeo de media-varianza (MVMO), cuyo objetivo es la generación de planes óptimos de expansión. La heurística implementada determinará y seleccionará planes de expansión óptimos mediante el análisis del sistema a través de la modelación de corriente continua de flujos de potencia óptimos, tomando en cuenta restricciones de seguridad. De esta forma, los planes de expansión de la transmisión consideran las restricciones técnicas operativas y las restricciones de seguridad, priorizando el abastecimiento de energía a la carga bajo distintas condiciones operativas. La herramienta desarrollada se valida al determinar planes de expansión óptimos en redes de prueba disponibles en la literatura.

PALABRAS CLAVE: planificación óptima, heurísticos, MVMO, restricciones de seguridad.

ABSTRACT

The planning of electrical transmission systems is carried out following technical and economic parameters. Transmission plans must ensure proper performance of the electrical system and do so at the lowest possible cost. The construction of branches in the network, determined by the obtained plan, will seek to guarantee proper operation under normal conditions as well as in contingency situations at the lowest possible cost. Under these considerations, a tool is presented through the Python programming language that allows the determination of optimal expansion plans for the transmission system. The described tool will consider safety constraints and contingencies of different branches to ensure the operational conditions described earlier.

The computational tool will be enhanced by a heuristic algorithm, the mean-variance mapping optimization algorithm (MVMO), whose objective is the generation of optimal expansion plans. The implemented heuristic will determine and select optimal expansion plans by analyzing the system through the modeling of optimal power flow in direct current, considering safety constraints. Thus, transmission expansion plans consider technical operational constraints and safety constraints, prioritizing the supply of energy to the load under different operational conditions. The developed tool is validated by determining optimal expansion plans in test networks available in the literature.

KEYWORDS: Optimal Planning, Heuristics, MVMO, Security Constraints.

1 INTRODUCCIÓN

Se aborda el desafío de planificación óptima para la expansión de sistemas eléctricos de transmisión mediante la creación de una herramienta computacional en Python. La solución se basa en el modelado matricial del flujo óptimo de sistemas eléctricos en corriente continua, considerando restricciones de seguridad.

El problema se enfrenta desde diversas perspectivas, incluyendo la modelación matemática de un flujo óptimo de potencia en corriente continua que incorpora restricciones de seguridad, así como el desarrollo de un algoritmo heurístico para determinar el plan de expansión óptimo. La modelación busca contemplar los límites técnicos de los componentes, como la cargabilidad, forzando la desconexión de carga en ausencia de condiciones adecuadas para respetar con dichos límites, preservando la integridad del sistema eléctrico.

A través del modelo matemático y el lenguaje de programación Python, se crea un algoritmo que determina el flujo óptimo de potencia considerando contingencias en las ramas. El algoritmo heurístico de optimización de mapeo media-varianza (MVMO) se encarga de generar y determinar el plan óptimo de expansión de la transmisión, evaluando costos de construcción de líneas de transmisión o transformadores.

Los posibles ramales de la red de transmisión se modelan según características técnicas, número de circuitos en paralelo y costos de construcción, incorporando un análisis económico en la optimización de la planificación. La generación de planes de expansión es responsabilidad de la heurística del algoritmo, mientras que la evaluación se realiza mediante la formulación matemática de flujos de potencia óptimos, considerando la seguridad para evitar desconexiones de carga en situaciones de contingencia.

Es fundamental destacar que la desconexión de carga conlleva un costo asociado, por lo que el algoritmo heurístico optimiza el costo de cada plan de expansión penalizando la desconexión o deslastre de carga, asegurando así la distribución de energía en diversas situaciones operativas de la red.

Para garantizar la eficacia, el componente desarrollado se verifica mediante el uso de redes eléctricas de prueba, sometiéndolo a diferentes criterios de planificación para demostrar la versatilidad de la herramienta desarrollada.

1.1 OBJETIVO GENERAL

Desarrollar una herramienta computacional para el análisis de la planificación óptima de sistemas eléctricos de transmisión considerando restricciones de seguridad utilizando el algoritmo MVMO en el lenguaje de programación Python.

1.2 OBJETIVOS ESPECIFICOS

1. Modelación matemática del problema, a través del uso del modelo DC para flujo de potencia.
2. Determinar el flujo óptimo de potencia DC para sistemas eléctricos de potencia a través del uso de distintas herramientas y solvers disponibles en Python.
3. Implementar el algoritmo MVMO, que permita determinar la expansión óptima del sistema de transmisión, considerando criterios de seguridad, contingencias N-1.
4. Evaluar el comportamiento y resultados de la herramienta computacional desarrollada, a través de la solución de problemas de planificación óptima en redes de prueba.

1.3 ALCANCE

Dentro del marco del trabajo de integración curricular, se prevé llevar a cabo una revisión bibliográfica exhaustiva de las diversas alternativas existentes para abordar el desafío de la planificación óptima de la expansión de los sistemas eléctricos de transmisión, teniendo en cuenta las restricciones de seguridad. A partir de esta revisión, se realizará la modelación matemática tanto del problema de planificación con restricciones de seguridad como del algoritmo MVMO. Además, se llevará a cabo una verificación bibliográfica del lenguaje de programación Python.

Basándonos en la formulación matemática desarrollada, se implementará una herramienta en Python que resuelva el problema de optimización de flujos de potencia DC, teniendo en cuenta las restricciones de seguridad. Esta herramienta permitirá evaluar el costo de cada posible plan de expansión. Además, se desarrollará una herramienta que, mediante la optimización heurística con el algoritmo MVMO, genere planes de expansión óptimos considerando restricciones de seguridad, incluso frente a contingencias N-1.

Finalmente, se procederá a evaluar las herramientas desarrolladas utilizando sistemas de prueba como la red de Garver u otros sistemas de prueba para determinar la efectividad de las herramientas. Se llevará a cabo la evaluación en distintos escenarios, obteniendo planes de expansión óptimos y seguros.

1.4 MARCO TEÓRICO

1.4.1 Sistemas eléctricos de potencia

Los sistemas eléctricos de potencia (SEP) se definen como conjuntos de máquinas, dispositivos y elementos que transforman una forma de energía primaria en energía eléctrica, transportándola a los usuarios finales a través de las fases de generación, transmisión y distribución, [1]. Dada la naturaleza dinámica del comportamiento de la carga, los SEP están en constante evolución, y una planificación adecuada es esencial al construir nuevas infraestructuras eléctricas.

La transmisión de energía eléctrica se describe como el proceso de transportar grandes bloques de energía desde las centrales generadoras hasta los centros de carga y los usuarios finales, utilizando estructuras que ofrecen un medio físico para la transmisión de la energía. Los componentes clave de estas estructuras incluyen conductores, torres de transmisión, aislantes y dispositivos de protección, [1].

En términos de la planificación de los sistemas de transmisión de energía, esta debe considerar parámetros técnicos y económicos, siempre buscando la optimización de los recursos. En otras palabras, la planificación de la transmisión se enfrenta al desafío de ser un problema de optimización. Se puede entender como la construcción de líneas de transmisión al menor costo posible, respetando las restricciones inherentes al sistema.

Sin embargo, un sistema eléctrico no opera al 100 % de su capacidad, ya que diversos

escenarios como mantenimientos o fallas de equipos pueden requerir la desconexión de ciertas líneas de transmisión. Esta desconexión somete al sistema a mayores exigencias técnicas que, dependiendo de su impacto, podrían dar lugar a procesos de desconexión de carga para mantener la operatividad del sistema y prevenir su colapso.

El deslastre de carga implica la interrupción selectiva del suministro de energía eléctrica para ciertas cargas, con el objetivo de reducir la demanda de energía y preservar la integridad de los equipos o del sistema en su conjunto, [2].

El deslastre de carga representa la situación más desfavorable dentro de un sistema eléctrico de potencia, indicando que el sistema no puede suministrar la demanda, lo que resulta en pérdidas económicas debido a la energía no suministrada, así como en consecuencias sociales relacionadas con diversos aspectos como costos productivos, deterioro de la calidad de vida y consideraciones de seguridad, entre otros.

Ante esta perspectiva, resulta de vital importancia reducir o eliminar la probabilidad de que ocurra el deslastre de carga, dado el impacto negativo asociado, según se explicó. Por este motivo, la planificación de la expansión debe contemplar la posibilidad de la falta de disponibilidad de al menos una línea del sistema, sin violar los límites técnicos u operativos establecidos.

1.4.2 Flujo de potencia

El flujo de potencia se refiere al análisis de un sistema eléctrico con el propósito de identificar y determinar las variables que definen dicho sistema, tales como los voltajes con sus respectivos ángulos, la potencia activa y reactiva, así como las corrientes del sistema. Este análisis se realiza a partir de las variables conocidas del sistema, como se menciona en [3].

De forma general la resolución de un problema de flujo de potencia, según [3], radica en:

1. Definir valores iniciales para las variables desconocidas de voltaje, por lo general establecidos en 1 [p.u.] para la magnitud y 0° para el ángulo.
2. Calcular la potencia activa y reactiva inyectada en el sistema para cada nodo o barra. Esto se logra utilizando las ecuaciones de potencia activa y reactiva con los valores de voltaje en magnitud y ángulo.
3. Comparar los valores calculados de potencia inyectada en cada nodo con los valores

de potencia neta en esos nodos. Si al comparar el error de potencias se encuentra dentro de la tolerancia especificada, el proceso se detiene.

4. En caso contrario, actualizar los valores de voltajes desconocidos, tanto en magnitud como en ángulo. Para esta actualización, se puede emplear la derivada parcial, Jacobiano, de las potencias con respecto al voltaje en magnitud y al ángulo.
5. Con los valores actualizados, repetir el proceso de manera iterativa hasta alcanzar la tolerancia deseada. Este procedimiento se repite hasta que los valores de las potencias inyectadas y netas convergen dentro de los límites establecidos.

1.4.2.1 Flujo de potencia sistema de corriente alterna AC

Las ecuaciones de potencia activa y reactiva, empleadas en el análisis del flujo de carga de un sistema eléctrico, son no lineales, ya que incorporan funciones trigonométricas, [3]. La presencia de estas no linealidades implica desafíos significativos al abordar problemas como la planificación óptima de redes de transmisión o estudios de seguridad. En particular, la simulación de múltiples flujos de potencia, en especial en redes eléctricas extensas, conlleva costos de memoria elevados. Dichas simulaciones podrían también requerir un tiempo de ejecución prolongado, según se indica en [4].

1.4.2.2 Flujo de potencia sistema de corriente continua DC

La linealización de las ecuaciones del problema de flujo de potencia, conocido como flujo de potencia DC o PFDC por sus siglas en inglés (Power flow direct current), ofrece la ventaja de significativas reducciones en los tiempos de cálculo. Bajo estas condiciones, el problema se vuelve lineal, lo que agiliza el proceso computacional. Sin embargo, es importante tener en cuenta que esta simplificación puede afectar la fiabilidad de los resultados.

A pesar de las posibles limitaciones, el enfoque de estudiar un sistema a través de flujos de potencia DC ha encontrado amplias aplicaciones, en situaciones que demandan la simulación de múltiples flujos de potencia. Esto se evidencia en escenarios que requieren la realización de cientos de simulaciones, como en los problemas de planificación o estudios de seguridad del sistema [4].

1.4.2.3 Justificaciones flujo de potencia DC

Como se ha señalado, hay aplicaciones que demandan la realización de múltiples flujos de potencia, lo que en redes eléctricas extensas, podría resultar en tiempos de simulación o análisis prolongados. Debido a esta consideración, se tiene la intención de emplear una modelación linealizada del problema mediante el enfoque de flujo de potencia DC.

1.4.3 Flujo óptimo de potencia

El flujo óptimo de potencia o DCOPF por sus siglas en inglés (Direct Current Optimal Power Flow) implica la optimización de variables de control para encontrar un punto de operación que maximice la eficiencia, minimizando los costos operativos o pérdidas, siempre asegurándose de no violar los límites operativos del sistema. En su forma de corriente continua, se emplean las ecuaciones linealizadas del flujo de potencia que no tienen en cuenta las pérdidas para llevar a cabo el proceso de optimización [5].

1.4.4 Flujo óptimo de potencia con restricciones de seguridad

El flujo óptimo de potencia puede ser ejecutado de manera que no solo tome en cuenta las restricciones operativas del sistema en un escenario normal de funcionamiento, cuando el sistema está operando al 100%, sino también en situaciones de contingencia, como la pérdida de una línea del sistema, de modo que se consideren restricciones de seguridad. Este proceso implica la simulación de todas las contingencias propuestas para determinar la gestión segura y económica del despacho de energía, minimizando costos [5].

1.4.5 Planificación de la expansión del sistema de transmisión

Como se ha mencionado, los SEP necesitan evolucionar, cambiar y adaptarse a las nuevas características de la carga, que por lo general experimenta un crecimiento. Esto origina la necesidad de expandir el sistema en sus diversas etapas, ya sea en generación, distribución o transmisión.

En los sistemas de transmisión, al igual que en distribución o generación, la planificación se presenta como una necesidad intrínseca para prevenir futuras deficiencias del sistema.

Dicha planificación debe estar respaldada por un análisis técnico y económico que garantice su óptima expansión, asegurando así un funcionamiento eficiente y confiable del sistema.

1.4.6 Planificación de la expansión del sistema de transmisión considerando restricciones de seguridad

Las contingencias N-1 constituyen el proceso mediante el cual se retira un elemento del sistema de transmisión y se evalúa su impacto en el sistema eléctrico, incluyendo aspectos como voltajes y capacidad de los elementos. Este análisis se realiza con el objetivo de garantizar que el sistema opere dentro de los rangos técnicos apropiados [6].

En la planificación de la expansión de los sistemas eléctricos de transmisión, es crucial considerar como un elemento fundamental la capacidad de mantener una operación adecuada en situaciones de contingencia. Como se mencionó antes, el deslastre de carga se utiliza como último recurso para preservar la integridad del SEP. Por lo tanto, un plan de expansión que resulte en la desconexión de carga, en condiciones de contingencia, indicaría una planificación deficiente.

1.4.7 Algoritmos heurísticos

Los algoritmos heurísticos son técnicas o procesos de búsqueda inteligente enfocados en la optimización, prescindiendo de cálculos matemáticos rigurosos, [7].

1.4.7.1 Algoritmo de optimización de media-varianza - MVMO

El algoritmo de optimización de media-varianza, conocido como MVMO por sus siglas en inglés, es una técnica heurística que utiliza la media y la varianza de la mejor población en un momento dado. Este enfoque se emplea en una función de mapeo cuyo propósito es determinar la mutación que se llevará a cabo para encontrar los descendientes de la población actual. En cada iteración, la curva de mapeo se ajusta en forma y ubicación a través de las diferentes poblaciones. Existe una variante de este algoritmo que incorpora el concepto de inteligencia de enjambre para aumentar la robustez y garantizar una convergencia adecuada, [7].

En términos generales, el algoritmo MVMO implica la generación y almacenamiento de resultados en una matriz de población ordenada de la mejor a la peor respuesta. Este conjunto de resultados tiene un número finito predefinido. A partir de esta población, se calculan los valores de media y varianza para utilizarlos en la función de mapeo, generando mutaciones para la descendencia. La descendencia resultante se evalúa y, si representa una solución mejor que las almacenadas en la población, se inserta en su lugar, eliminando la peor solución. En la variante de enjambre o de partículas, se realiza un proceso MVMO convencional para cada partícula, conectándolas en el proceso de mutación y descendencia, [8].

2 METODOLOGÍA

El problema de planificación óptima de la expansión de los sistemas eléctricos de transmisión considerando restricciones de seguridad es abordado mediante un enfoque metodológico que centra en el desarrollo matemático para la solución del problema del SCDCOPF para la implementación práctica, en lenguaje de programación Python, de la herramienta computacional.

Bajo esta estrategia se obtendrá el componente teórico, como la modelación matemática y el componente práctico, el programa, que permita resolver el problema de planificación considerando las particularidades de cualquier sistema eléctrico con sus respectivas restricciones técnicas y de seguridad, configurando así un enfoque cuantitativo para afrontar el problema.

El trabajo descrito es de tipo exploratorio al buscar una comprensión profunda del problema de planificación para la posterior modelación. Y experimental debido a la necesidad intrínseca de implementar el modelo a través de un lenguaje de programación y analizar los resultados para diversos escenarios para determinar su eficacia y capacidad para analizar distintos sistemas eléctricos.

La recolección de datos se abordará mediante el análisis documental del problema de planificación considerando estudios previos, el estado del arte, entre otros, para el análisis comparativo y el desarrollo sinérgico del modelo matemático y el programa en Python.

Finalmente, la eficacia y capacidad del programa desarrollado será determinada a través del uso de redes eléctricas de prueba disponibles en la literatura.

2.1 FORMULACIÓN MATEMÁTICA

2.1.1 Matriz de Admitancia Ybarra

Para modelar el sistema es imperante describir los componentes que conforman el sistema dentro de la matriz de admitancia, también conocida como la Ybarra. Esta modelación conforme a los objetivos del componente se realiza de forma matricial a partir de la Figura 2.1 que se presenta a continuación.

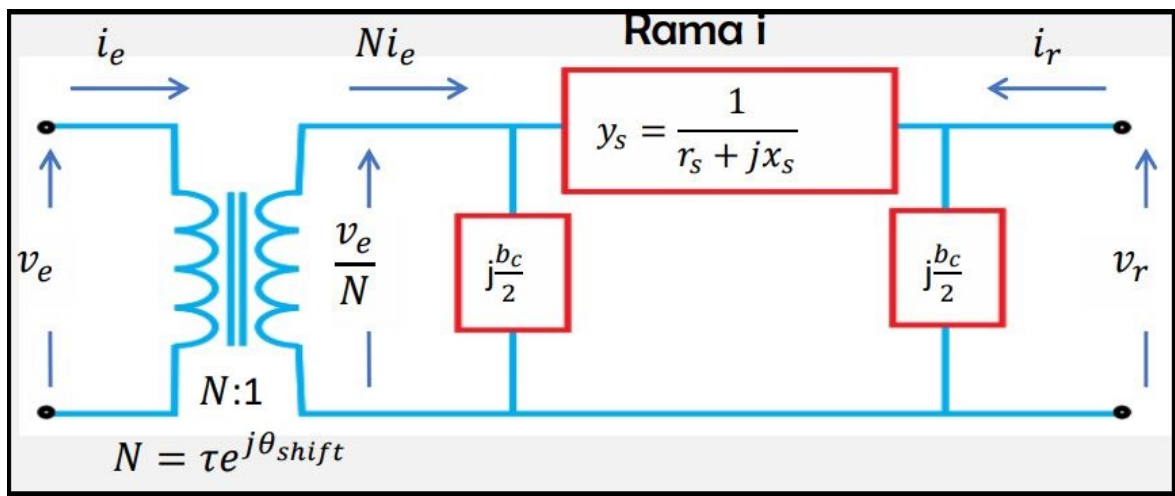


Figura 2.1: Modelo de la rama, tomado de [9].

La corriente de envío i_e y la corriente de recepción i_r presentadas en la Figura 2.1 se expresan de acuerdo con los voltajes terminales de envío y recepción v_e y v_r en la matriz de la admitancia de rama tal que:

$$\begin{bmatrix} i_e \\ i_r \end{bmatrix} = Y_{rama} \begin{bmatrix} v_e \\ v_r \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} y_{ee} & y_{er} \\ y_{re} & y_{rr} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} v_e \\ v_r \end{bmatrix} \quad (2.1)$$

De la Figura 2.1 se deducen las ecuaciones presentadas a continuación:

$$i_{y_s} = y_s \left(\frac{v_e}{N} - v_r \right) = \frac{y_s}{N} v_e - y_s v_r \quad (2.2)$$

$$i_{bc_e} = j \frac{b_c}{2} \left(\frac{v_e}{N} \right) = j \frac{b_c}{2N} v_e \quad (2.3)$$

$$i_{bc_r} = j \frac{b_c}{2} v_r \quad (2.4)$$

Al considerar la ley de corrientes de Kirchoff para los nodos del sistema se tiene que:

$$Ni_e = i_{y_s} + i_{bc_e} \quad (2.5)$$

$$i_r = i_{bc_r} - i_{y_s} \quad (2.6)$$

A partir del reemplazo de las ecuaciones (2.2) y (2.3) en (2.5) al igual que (2.4) y (2.2) en (2.6), se obtiene:

$$i_e = \frac{(y_s + j\frac{b_c}{2})}{N^2}v_e - \frac{y_s}{N}v_r \quad (2.7)$$

$$i_r = -\frac{y_s}{N}v_e + (y_s + j\frac{b_c}{2})v_r \quad (2.8)$$

Las corrientes de envío y recibo expresadas en (2.7) y (2.8) se expresan de forma matricial como en (2.1) tal que:

$$\begin{bmatrix} i_e \\ i_r \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{y_s + j\frac{b_c}{2}}{N^2} & -\frac{y_s}{N} \\ -\frac{y_s}{N} & y_s + j\frac{b_c}{2} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} v_e \\ v_r \end{bmatrix} \quad (2.9)$$

Siendo:

$$N = \tau e^{j\theta_{shift}} \quad (2.10)$$

Se debe considerar que τ representa la magnitud del tap del transformador mientras que θ_{shift} representa el ángulo del tap del transformador.

De la ecuación (2.9) se plantea la matriz de admitancia de rama como:

$$Y_{rama} = \begin{bmatrix} y_{ee} & y_{er} \\ y_{re} & y_{rr} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{y_s + j\frac{b_c}{2}}{\tau^2} & -\frac{y_s}{N} \\ -\frac{y_s}{N} & y_s + j\frac{b_c}{2} \end{bmatrix} \quad (2.11)$$

Al generalizar dicha matriz para nl ramas, se obtiene:

$$Y_{rama}^i = \begin{bmatrix} y_{ee}^i & y_{er}^i \\ y_{re}^i & y_{rr}^i \end{bmatrix} \quad (2.12)$$

Siendo:

$$Y_{ee} = [y_{ee}^1 \ \cdots \ y_{ee}^{nl}]^T \quad (2.13)$$

$$Y_{er} = [y_{er}^1 \ \cdots \ y_{er}^{nl}]^T \quad (2.14)$$

$$Y_{re} = \begin{bmatrix} y_{re}^1 & \cdots & y_{re}^{nl} \end{bmatrix}^T \quad (2.15)$$

$$Y_{rr} = \begin{bmatrix} y_{rr}^1 & \cdots & y_{rr}^{nl} \end{bmatrix}^T \quad (2.16)$$

Finalmente, la matriz $Y_{barrera}$ expresada en términos de (2.13), (2.14), (2.15) y (2.16) es expresada como:

$$Y_e = [Y_{ee}]C_e + [Y_{er}]C_r \quad (2.17)$$

$$Y_r = [Y_{re}]C_e + [Y_{rr}]C_r \quad (2.18)$$

$$Y_{barrera} = C_e^T Y_e + C_r^T Y_r + [C_s^T Y_{sh}] \quad (2.19)$$

Sabiendo que: $Y_{sh} = [G_s + jB_s]_{nb \times 1}$

La matriz de conexión C_s ($ns \times nb$) se define tal que permitan relacionar el (i, j) ésimo término de la matriz con cada elemento del shunt j si este está conectado en la barra i al asignar 1 en ese término de la matriz de no ser así se asigna el valor de 0.

Para las matrices C_e ($nl \times nb$) y C_r ($nl \times nb$) la definición radica en asignar 1 al (i, j) ésimo elemento de C_e y al (i, k) ésimo de C_r al resto de elementos se le asigna el valor de 0.

Considerando que:

nb : representa el número de barras.

nl : representa el número de ramales.

ns : representa el número de elementos de compensación shunt.

e : representa el vector de barras.

r : representa el barras de recibo.

2.1.1.1 Consideraciones matriz Ybarra para el modelo de red DC

La formulación presentada en 2.1.1 es realizada considerando un modelo de corriente alterna, AC, mas como se retrató antes, la simplificación del modelo mediante su linealización DC brinda una aproximación adecuada para el problema que se plantea abordar. Por lo que la construcción de la matriz Ybarra se realiza siguiendo las consideraciones que se plantean a continuación.

Se considera resistencia nula del sistema, para los ramales que lo conforman:

$$y_{s_{nlx1}} = 1/.x_{s_{(nl \times 1)}} \quad (2.20)$$

El efecto capacitivo de los ramales, en las líneas de transmisión, es despreciado:

$$b_{c_{nlx1}} = [0]_{(nl \times 1)} \quad (2.21)$$

Al igual que la compensación shunt:

$$Y_{sh} = [0]_{(nb \times 1)} \quad (2.22)$$

Para los transformadores no se considera el desfase angular ni la relación de transformación para los taps:

$$\tau = [1]_{(nl \times 1)} \quad (2.23)$$

$$\theta_{shift} = [0]_{(nl \times 1)} \quad (2.24)$$

Por lo que, la expresión (2.10) se reduce a:

$$N = \tau = [1]_{(nl \times 1)} \quad (2.25)$$

Bajo estas consideraciones la matriz de admitancias de rama (2.11) puede ser expresada tal que:

$$Y_{rama} = \begin{bmatrix} y_{ee} & y_{er} \\ y_{re} & y_{rr} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} y_s & -\frac{y_s}{N} \\ -\frac{y_s}{N} & y_s \end{bmatrix} \quad (2.26)$$

Por lo que la matriz Y_{barra} modelada en un sistema AC en la ecuación (2.19) puede ser reducida a:

$$Y_{barra} = C_e^T Y_e + C_r^T Y_r \quad (2.27)$$

2.1.2 Formulación del Flujo Óptimo de Potencia DC - DCOPF

Una vez determinada la Ybarra para el sistema eléctrico al igual que realizar las consideraciones para la modelación DC. Se presenta la modelación del flujo óptimo de potencia de forma matricial.

Esta modelación considera las restricciones relativas a los límites técnicos que al no poder ser satisfechos requerirán el deslastre de carga. De no modelarse el deslastre de carga se pueden originar problemas de convergencia tal y como se presenta en el ejemplo desarrollado en los anexos.

2.1.2.1 Función Objetivo

El problema se modela a través de la función objetivo presentada a continuación:

$$f_{(nx \times 1)} = \begin{bmatrix} K_{cost} W_{g(n_g \times 1)} \\ 0_{(nb \times 1)} \\ K_{des} [W_\lambda]_{(nd \times nd)} P_{d(nd \times 1)} \end{bmatrix}_{(nx \times 1)} \quad (2.28)$$

Función que busca minimizar el costo asociado al despacho de potencia, así como cuantificar el costo de la desconexión de carga. Las variables del sistema son representadas como $x_{(nx \times 1)}$ que se conforma como:

$$x_{(nx \times 1)} = \begin{bmatrix} P_{g(n_g \times 1)} \\ \theta_{(nb \times 1)} \\ \lambda_{(nd \times 1)} \end{bmatrix}_{(nx \times 1) = (ng + nb + nd) \times 1} \quad (2.29)$$

Se deduce la función objetivo como:

$$f^T x = \begin{bmatrix} K_{cost} W_{g(1 \times ng)}^T & \cdots & 0_{(1 \times nb)}^T & \cdots & K_{des} ([W_\lambda] P_d)_{(1 \times nd)}^T \end{bmatrix}_{(1 \times nx)} \begin{bmatrix} P_{g(n_g \times 1)} \\ \theta_{(nb \times 1)} \\ \lambda_{(nd \times 1)} \end{bmatrix}_{(nx \times 1)} \quad (2.30)$$

$$Min : f^T x = (K_{cost} W_g^T P_g) + (K_{des} ([W_\lambda] P_d)^T \lambda) \quad (2.31)$$

Sabiendo que:

K_{cost} : Factor asociado al del costo generación, despacho de potencia.

W_g : Vector de costos de despacho para cada generador en \$/MWh.

P_g : Vector potencia de generación despachada en MW.

K_{des} : Factor asociado a la penalización del deslastre de carga.

W_λ : Vector de potencia deslastrada para cada carga \$/MWh.

P_d : Vector de potencia demandada para cada carga en MW.

λ : Deslastre de carga en pu.

nd : Número de cargas.

nb : Número de barras.

ng : Número de generadores.

nx : Dimensión de $x_{(nx \times 1)}$, variables del problema.

Se debe destacar que la variable λ , asociada al deslastre de carga puede tener una modelación discreta, pudiendo ser cero o uno, o continua, abarcar cualquier valor en el intervalo entre cero y uno. Dicha modelación responde a las características reales del sistema donde un disyuntor o relé tiene dos estados conectado o desconectado. En la realidad, no se puede desconectar o deslastrar parcialmente una carga.

2.1.2.2 Restricciones de Igualdad

El balance de potencia dentro del sistema debe tener un valor de 0, dado que la potencia generada debe ser igual a la consumida. El problema de optimización debe asegurarse que se respete dicha consideración mediante las restricciones de igualdad que se presentan a continuación:

$$P_{esp} = P_{cal} \quad (2.32)$$

$$C_g^T P_g - C_d^T P_d (1 - \lambda) = B\theta \quad (2.33)$$

$$C_g^T P_g - B\theta + C_d^T P_d \lambda = C_d^T P_d \quad (2.34)$$

Considerando expresar (2.34) de la forma $Ax = b$ se obtiene:

$$\left[\begin{array}{c|c|c} C_g^T & -B & C_d^T [P_d] \end{array} \right]_{(nb \times nx)} \begin{bmatrix} P_g_{(ng \times 1)} \\ \theta_{(nb \times 1)} \\ \lambda_{(nd \times 1)} \end{bmatrix}_{(nx \times 1)} = C_d^T P_d_{(nd \times 1)} \quad (2.35)$$

Con:

$$B = -I_{mag}(Y_{barra})$$

C_g : Matriz de conectividad de generadores.

C_d : Matriz de conectividad de cargas.

2.1.2.3 Restricciones de Desigualdad

Las líneas de transmisión y transformadores, referidos como ramales, no siempre soportan las características de potencia de la red. Su construcción, configuración u arreglo limita la potencia que puede circular por estos. Por lo que el problema considera estas limitaciones a través de las expresiones propuestas a continuación:

$$-\overline{f_{ij}}_{(nl \times 1)} \leq S_{(nl \times nb)} \theta_{(nb \times 1)} \leq \overline{f_{ij}}_{(nl \times 1)} \quad (2.36)$$

Donde la desigualdad presentada en (2.36) se descompone en:

$$S_{(nl \times nb)} \theta_{(nb \times 1)} \leq \overline{f_{ij}}_{(nl \times 1)} \quad (2.37)$$

$$-S_{(nl \times nb)} \theta_{(nb \times 1)} \leq \overline{f_{ij}}_{(nl \times 1)} \quad (2.38)$$

De forma matricial:

$$\begin{bmatrix} S\theta \\ \hline -S\theta \end{bmatrix}_{(2nl \times 1)} \leq \begin{bmatrix} \overline{f_{ij}} \\ \hline \overline{f_{ij}} \end{bmatrix}_{(2nl \times 1)} \quad (2.39)$$

Que representada de la forma $Ax \leq b$, matricialmente, se obtiene:

$$\begin{bmatrix} 0_{(nl \times ng)} & \vdots & S_{(nl \times nb)} & \vdots & 0_{(nl \times nd)} \\ \dots & \vdots & \dots & \vdots & \dots \\ 0_{(nl \times ng)} & \vdots & -S_{(nl \times nb)} & \vdots & 0_{(nl \times nd)} \end{bmatrix}_{(2nl \times nx)} \begin{bmatrix} P_{g(ng \times 1)} \\ \theta_{(nb \times 1)} \\ \lambda_{(nd \times 1)} \end{bmatrix}_{(nx \times 1)} \leq \begin{bmatrix} \overline{f_{ij}}_{(nl \times 1)} \\ \dots \\ \overline{f_{ij}}_{(nl \times 1)} \end{bmatrix}_{(2nl \times 1)} \quad (2.40)$$

Donde:

$\overline{f_{ij}}$: Representa el flujo máximo de potencia desde la barra i hasta j en MW.

$S = -I_{mag}(Y_e)$: Representa el flujo de potencia desde la barra i hasta j en MW.

2.1.2.4 Límites de Variables

Las variables del problema, ecuación (2.29), cuentan con los límites presentados a continuación:

$$\begin{bmatrix} \underline{P}_g_{(ng \times 1)} \\ -\pi_{(nb \times 1)} \\ \underline{\lambda}_{(nd \times 1)} \end{bmatrix}_{(nx \times 1)} \leq \begin{bmatrix} P_{g(ng \times 1)} \\ -\theta_{(nb \times 1)} \\ \lambda_{(nd \times 1)} \end{bmatrix}_{(nx \times 1)} \leq \begin{bmatrix} \overline{P}_g_{(ng \times 1)} \\ \pi_{(nb \times 1)} \\ \overline{\lambda}_{(nd \times 1)} \end{bmatrix}_{(nx \times 1)} \quad (2.41)$$

Donde:

$\underline{P}_g, \overline{P}_g$: Potencia mínima y máxima de generación en MW.

$\underline{\lambda}, \overline{\lambda}$: Carga deslastrada mínima y máxima en pu.

La barra de referencia cumple que el ángulo de su voltaje, θ_{slack} , esta dado por:

$$0 \leq \theta_{slack} \leq 0 \quad (2.42)$$

2.1.3 Formulación Matricial del Flujo Óptimo de Potencia DC con Restricciones de Seguridad - SCDCOPF

Los criterios de seguridad buscan evaluar el desempeño del sistema cuando uno de sus elementos sale de servicio por cualquier condición. Denominados criterios N-1, se mode-

lan de forma matricial similar a la de la sección 2.1.2, adaptando las ecuaciones de dicha sección a las consideraciones de seguridad.

La principal diferencia consiste en que las ecuaciones del sistema, en su estructura, contienen el caso base, sin contingencias, y los casos considerando una contingencia por cada caso, como se presenta a continuación.

2.1.3.1 Función Objetivo

Al igual que la sección 2.1.2 la ecuación (2.28) se modela de forma generalizada como:

$$f = \begin{bmatrix} K_{cost} W_{g_{(ng \times 1)}}^0 \\ K_{cost} W_{g_{(ng \times 1)}}^1 \\ \vdots \\ K_{cost} W_{g_{(ng \times 1)}}^{n_{cont}} \\ \\ 0_{(nb \times 1)}^0 \\ 0_{(nb \times 1)}^1 \\ \vdots \\ 0_{(nb \times 1)}^{n_{cont}} \\ \\ K_{des} [W_\lambda]_{(nd \times nd)} P_{d_{(nd \times 1)}}^0 \\ K_{des} [W_\lambda]_{(nd \times nd)} P_{d_{(nd \times 1)}}^1 \\ \vdots \\ K_{des} [W_\lambda]_{(nd \times nd)} P_{d_{(nd \times 1)}}^{n_{cont}} \end{bmatrix}_{(ng+nb+nd)(1+n_{cont}) \times 1} \quad (2.43)$$

De la misma forma la ecuación generalizada de (2.28) para las variables del modelo es presentada como:

$$x = \begin{bmatrix} P_{g_{(ng \times 1)}}^0 \\ P_{g_{(ng \times 1)}}^1 \\ \vdots \\ P_{g_{(ng \times 1)}}^{n_{cont}} \\ \\ \theta_{(nb \times 1)}^0 \\ \theta_{(nb \times 1)}^1 \\ \vdots \\ \theta_{(nb \times 1)}^{n_{cont}} \\ \\ \lambda_{(nd \times 1)}^0 \\ \lambda_{(nd \times 1)}^1 \\ \vdots \\ \lambda_{(nd \times 1)}^{n_{cont}} \end{bmatrix}_{(ng+nb+nd)(1+n_{cont}) \times 1} \quad (2.44)$$

Cuya función objetivo es:

$$\begin{aligned} Min : f^T x = & K_{cost} (W_g^T P_g^0 + W_g^T P_g^1 + \dots + W_g^T P_g^{n_{cont}}) + \\ & K_{des} \left(([W_\lambda] P_d)^T \lambda^0 + ([W_\lambda] P_d)^T \lambda^1 + \dots + ([W_\lambda] P_d)^T \lambda^{n_{cont}} \right) \end{aligned} \quad (2.45)$$

Donde:

K_{cost} , W_g , K_{des} , W_λ , P_d , ng , nb y nd : Han sido descritas anteriormente en (2.31).

Integrando al análisis las siguientes variables:

P_g^0 y $P_g^{n_{cont}}$: Vector de potencia demandada para cada carga en MW, para el caso base y última contingencia considerada respectivamente .

λ^0 y $\lambda^{n_{cont}}$: Deslastre de carga expresado en pu, forma vectorial, para el caso base y la última contingencia.

n_{cont} : Número de contingencias consideradas.

2.1.3.2 Restricciones de Igualdad

Al igual que la ecuación (2.34), las restricciones de igualdad para el caso base en conjunto con todas las restricciones se presentan como:

$$\begin{aligned} C_g^T P_g^0 - B^0 \theta^0 + C_d^T P_d \lambda^0 &= C_d^T P_d \\ C_g^T P_g^1 - B^1 \theta^1 + C_d^T P_d \lambda^1 &= C_d^T P_d \\ &\vdots \\ C_g^T P_g^{n_{cont}} - B^{n_{cont}} \theta^{n_{cont}} + C_d^T P_d \lambda^{n_{cont}} &= C_d^T P_d \end{aligned} \quad (2.46)$$

Al igual que la ecuación (2.35) se busca generalizar de la forma $Ax = b$ pero considerando contingencias.

Por lo que se desarrolla la expresión A_{eq} , tal que:

Para la componente C_g^T se tiene que:

$$\begin{aligned}
\text{Caso Base} &\rightarrow \left[C_g^T (nb \times ng)^0 \quad 0_{(nb \times ng)^1} \quad 0_{(nb \times ng)^2}^2 \quad \cdots \quad 0_{(nb \times ng)^{n_{cont}}} \right]_{nb \times ng(1+n_{cont})} \\
\text{1ra Contingencia} &\rightarrow \left[0_{(nb \times ng)^0} \quad C_g^T (nb \times ng)^1 \quad 0_{(nb \times ng)^2}^2 \quad \cdots \quad 0_{(nb \times ng)^{n_{cont}}} \right]_{nb \times ng(1+n_{cont})} \\
&\vdots \\
\text{\(n_{cont}\)ésima Cont.} &\rightarrow \left[0_{(nb \times ng)^0} \quad 0_{(nb \times ng)^1} \quad \cdots \quad 0_{(nb \times ng)^{n_{cont}-1}} \quad C_g^T (nb \times ng)^{n_{cont}} \right]_{nb \times ng(1+n_{cont})}
\end{aligned} \tag{2.47}$$

Formando la matriz $C_{g_{comp}}^T$ tal que:

$$\left[\begin{array}{ccccc}
C_g^T (nb \times ng) & 0_{(nb \times ng)} & 0_{(nb \times ng)} & \cdots & 0_{(nb \times ng)} \\
0_{(nb \times ng)} & C_g^T (nb \times ng) & 0_{(nb \times ng)} & \cdots & 0_{(nb \times ng)} \\
\vdots & \vdots & \ddots & \vdots & \vdots \\
0_{(nb \times ng)} & 0_{(nb \times ng)} & \cdots & 0_{(nb \times ng)} & C_g^T (nb \times ng)
\end{array} \right]_{nb(1+n_{cont}) \times ng(1+n_{cont})} \tag{2.48}$$

De forma similar para la componente B , en cada contingencia se tiene:

$$\begin{aligned}
\text{Caso base} &\rightarrow \left[-B^0 (nb \times nb)^0 \quad 0_{(nb \times nb)^1} \quad 0_{(nb \times nb)^2}^2 \quad \cdots \quad 0_{(nb \times nb)^{n_{cont}}} \right]_{nb \times nb(1+n_{cont})} \\
\text{1ra Contingencia} &\rightarrow \left[0_{(nb \times nb)^0} \quad -B^1 (nb \times nb)^1 \quad 0_{(nb \times nb)^2}^2 \quad \cdots \quad 0_{(nb \times nb)^{n_{cont}}} \right]_{nb \times nb(1+n_{cont})} \\
&\vdots \\
\text{\(n_{cont}\)ésima Cont.} &\rightarrow \left[0_{(nb \times nb)^0} \quad 0_{(nb \times nb)^1} \quad \cdots \quad 0_{(nb \times nb)^{n_{cont}-1}} \quad -B^{n_{cont}} (nb \times nb)^{n_{cont}} \right]_{nb \times nb(1+n_{cont})}
\end{aligned} \tag{2.49}$$

Permitiendo definir $-B_{comp}$ como:

$$\left[\begin{array}{ccccc}
-B^0 (nb \times nb) & 0_{(nb \times nb)} & 0_{(nb \times nb)} & \cdots & 0_{(nb \times nb)} \\
0_{(nb \times nb)} & -B^1 (nb \times nb) & 0_{(nb \times nb)} & \cdots & 0_{(nb \times nb)} \\
\vdots & \vdots & \ddots & \vdots & \vdots \\
0_{(nb \times nb)} & 0_{(nb \times nb)} & \cdots & 0_{(nb \times nb)} & -B^{n_{cont}} (nb \times nb)
\end{array} \right]_{nb(1+n_{cont}) \times nb(1+n_{cont})} \tag{2.50}$$

Finalmente, para la componente $C_d^T[P_d]$:

$$\begin{aligned}
\text{Caso base} &\rightarrow \left[(C_d^T[P_d])_{(nb \times nd)}^0 \quad 0_{(nb \times nd)}^1 \quad 0_{(nb \times nd)}^2 \quad \cdots \quad 0_{(nb \times nd)}^{n_{cont}} \right]_{nb \times nd(1+n_{cont})} \\
\text{1ra Contingencia} &\rightarrow \left[0_{(nb \times nd)}^0 \quad (C_d^T[P_d])_{(nb \times nd)}^1 \quad 0_{(nb \times nd)}^2 \quad \cdots \quad 0_{(nb \times nd)}^{n_{cont}} \right]_{nb \times nd(1+n_{cont})} \\
&\vdots \\
\text{\(n_{cont}\)ésima Cont.} &\rightarrow \left[0_{(nb \times nd)}^0 \quad 0_{(nb \times nd)}^1 \quad \cdots \quad 0_{(nb \times nd)}^{n_{cont}-1} \quad (C_d^T[P_d])_{(nb \times nd)}^{n_{cont}} \right]_{nb \times nd(1+n_{cont})}
\end{aligned} \tag{2.51}$$

Definiendo la matriz $(C_d^T[P_d])_{comp}$ como:

$$\left[\begin{array}{ccccc}
(C_d^T[P_d])_{(nb \times nd)} & 0_{(nb \times nd)} & 0_{(nb \times nd)} & \cdots & 0_{(nb \times nd)} \\
0_{(nb \times nd)} & (C_d^T[P_d])_{(nb \times nd)} & 0_{(nb \times nd)} & \cdots & 0_{(nb \times nd)} \\
\vdots & \vdots & \ddots & \vdots & \vdots \\
0_{(nb \times nd)} & 0_{(nb \times nd)} & \cdots & 0_{(nb \times nd)} & (C_d^T[P_d])_{(nb \times nd)}
\end{array} \right]_{nb \times nd(1+n_{cont})} \tag{2.52}$$

Siendo la matriz A_{eq} definida como:

$$A_{eq} = \left[C_{g_{comp}}^T \quad \left| \quad -B_{comp} \quad \left| \quad (C_d^T[P_d])_{comp} \right. \right. \right]_{nb(1+n_{cont}) \times (ng+nb+nd)(1+n_{cont})} \tag{2.53}$$

Por otra parte el vector b_{eq} es igual a:

$$b_{eq} = \left[\begin{array}{c}
\left(C_{d_{(nb \times nd)}^T} P_{d(nd \times 1)} \right)_{(nb \times 1)}^0 \\
\left(C_{d_{(nb \times nd)}^T} P_{d(nd \times 1)} \right)_{(nb \times 1)}^1 \\
\vdots \\
\left(C_{d_{(nb \times nd)}^T} P_{d(nd \times 1)} \right)_{nb \times 1}^{n_{cont}}
\end{array} \right]_{nb(1+n_{cont}) \times 1} \tag{2.54}$$

Expresando las restricciones de igualdad como:

$$\begin{bmatrix} C_{g\text{comp}}^T & | & -B_{\text{comp}} & | & (C_d^T [P_d])_{\text{comp}} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} P_{g(n_g \times 1)}^0 \\ P_{g(n_g \times 1)}^1 \\ \vdots \\ P_{g(n_g \times 1)}^{n_{\text{cont}}} \\ \theta_{(nb \times 1)}^0 \\ \theta_{(nb \times 1)}^1 \\ \vdots \\ \theta_{(nb \times 1)}^{n_{\text{cont}}} \\ \lambda_{(nd \times 1)}^0 \\ \lambda_{(nd \times 1)}^1 \\ \vdots \\ \lambda_{(nd \times 1)}^{n_{\text{cont}}} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} (C_d^T P_d)_{(nb \times 1)}^0 \\ (C_d^T P_d)_{(nb \times 1)}^1 \\ \vdots \\ (C_d^T P_d)_{nb \times 1}^{n_{\text{cont}}} \end{bmatrix} \quad (2.55)$$

Donde:

B^0 y $B^{n_{\text{cont}}}$: Parte imaginaria de $-Y_{\text{barra}}$ o matriz de susceptancias para el caso base y la última contingencia.

θ^0 y $\theta^{n_{\text{cont}}}$: Vector de ángulos de voltaje en las barras para el caso base y la última contingencia.

C_g y C_d : se han definido previamente en (2.35).

2.1.3.3 Restricciones de Desigualdad

El flujo máximo de potencia por cada rama se define para cada contingencia al igual que en el caso base de la misma forma que en la ecuación (2.36), obteniendo:

$$\begin{aligned}
-\overline{f_{ij}}_{(nl \times 1)}^0 &\leq S_{(nl \times nb)}^0 \theta_{(nb \times 1)}^0 \leq \overline{f_{ij}}_{(nl \times 1)}^0 \\
-\overline{f_{ij}}_{(nl \times 1)}^1 &\leq S_{(nl \times nb)}^1 \theta_{(nb \times 1)}^1 \leq \overline{f_{ij}}_{(nl \times 1)}^1 \\
&\vdots \\
-\overline{f_{ij}}_{(nl \times 1)}^{n_{cont}} &\leq S_{(nl \times nb)}^{n_{cont}} \theta_{(nb \times 1)}^{n_{cont}} \leq \overline{f_{ij}}_{(nl \times 1)}^{n_{cont}}
\end{aligned} \tag{2.56}$$

Desigualdades que se descomponen tal que:

$$\begin{aligned}
S_{(nl \times nb)}^0 \theta_{(nb \times 1)}^0 &\leq \overline{f_{ij}}_{(nl \times 1)}^0 \\
S_{(nl \times nb)}^1 \theta_{(nb \times 1)}^1 &\leq \overline{f_{ij}}_{(nl \times 1)}^1 \\
&\vdots \\
S_{(nl \times nb)}^{n_{cont}} \theta_{(nb \times 1)}^{n_{cont}} &\leq \overline{f_{ij}}_{(nl \times 1)}^{n_{cont}}
\end{aligned} \tag{2.57}$$

$$\begin{aligned}
-S_{(nl \times nb)}^0 \theta_{(nb \times 1)}^0 &\leq \overline{f_{ij}}_{(nl \times 1)}^0 \\
-S_{(nl \times nb)}^1 \theta_{(nb \times 1)}^1 &\leq \overline{f_{ij}}_{(nl \times 1)}^1 \\
&\vdots \\
-S_{(nl \times nb)}^{n_{cont}} \theta_{(nb \times 1)}^{n_{cont}} &\leq \overline{f_{ij}}_{(nl \times 1)}^{n_{cont}}
\end{aligned} \tag{2.58}$$

Se consideran restricciones de desigualdad adicionales relativas a la variación de la potencia de generación.

$$\begin{aligned}
-\overline{\Delta P}_{(ng \times 1)} &\leq P_{g(ng \times 1)}^1 - P_{g(ng \times 1)}^0 \leq \overline{\Delta P}_{(ng \times 1)} \\
-\overline{\Delta P}_{(ng \times 1)} &\leq P_{g(ng \times 1)}^2 - P_{g(ng \times 1)}^0 \leq \overline{\Delta P}_{(ng \times 1)} \\
&\vdots \\
-\overline{\Delta P}_{(ng \times 1)} &\leq P_{g(ng \times 1)}^{n_{cont}} - P_{g(ng \times 1)}^0 \leq \overline{\Delta P}_{(ng \times 1)}
\end{aligned} \tag{2.59}$$

Que al descomponer la ecuación (2.59) se obtiene:

$$\begin{aligned}
P_{g(ng \times 1)}^1 - P_{g(ng \times 1)}^0 &\leq \overline{\Delta P}_{(ng \times 1)} \\
P_{g(ng \times 1)}^2 - P_{g(ng \times 1)}^0 &\leq \overline{\Delta P}_{(ng \times 1)} \\
&\vdots \\
P_{g(ng \times 1)}^{n_{cont}} - P_{g(ng \times 1)}^0 &\leq \overline{\Delta P}_{(ng \times 1)}
\end{aligned} \tag{2.60}$$

$$\begin{aligned}
P_{g(n_g \times 1)}^0 - P_{g(n_g \times 1)}^1 &\leq \overline{\Delta P}_{(n_g \times 1)} \\
P_{g(n_g \times 1)}^0 - P_{g(n_g \times 1)}^2 &\leq \overline{\Delta P}_{(n_g \times 1)} \\
&\vdots \\
P_{g(n_g \times 1)}^0 - P_{g(n_g \times 1)}^{n_{cont}} &\leq \overline{\Delta P}_{(n_g \times 1)}
\end{aligned} \tag{2.61}$$

Siendo:

$$\overline{\Delta P} = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ \vdots \\ 0 \end{bmatrix}_{(n_g \times 1)} \tag{2.62}$$

Para el generador de referencia el $\overline{\Delta P}$ corresponde a:

$$\Delta P_{slack} = \infty \tag{2.63}$$

Para poder expresar las restricciones de la forma $Ax \leq b$ se define la matriz A como:

$$A = \begin{bmatrix} A_{11} & A_{12} & A_{13} \\ A_{21} & A_{22} & A_{23} \end{bmatrix}_{[2n_l(1+n_{cont})+2n_g(n_{cont})] \times [(n_g+n_l+nd)(1+n_{cont})]} \tag{2.64}$$

Donde:

$$A_{11} = \begin{matrix} 0 \\ 1 \\ \vdots \\ n_{cont} \end{matrix} \begin{bmatrix} 0_{(nl \times ng)}^0 & 0_{(nl \times ng)}^1 & \cdots & 0_{(nl \times ng)}^{n_{cont}} \\ 0_{(nl \times ng)}^0 & 0_{(nl \times ng)}^1 & \cdots & 0_{(nl \times ng)}^{n_{cont}} \\ 0_{(nl \times ng)} & 0_{(nl \times ng)} & \cdots & 0_{(nl \times ng)} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ 0_{(nl \times ng)} & 0_{(nl \times ng)} & \cdots & 0_{(nl \times ng)} \\ 0_{(nl \times ng)} & 0_{(nl \times ng)} & \cdots & 0_{(nl \times ng)} \end{bmatrix}_{2nl(1+n_{cont}) \times ng(1+n_{cont})} \quad (2.65)$$

$$A_{12} = \begin{matrix} 0 \\ 1 \\ \vdots \\ n_{cont} \end{matrix} \begin{bmatrix} S_{(nl \times nb)}^0 & 0_{(nl \times nb)}^1 & 0_{(nl \times nb)} & \cdots & 0_{(nl \times nb)} & 0_{(nl \times nb)}^{n_{cont}} \\ -S_{nl \times nb}^0 & 0_{(nl \times nb)}^1 & 0_{(nl \times nb)} & \cdots & 0_{(nl \times nb)} & 0_{(nl \times nb)}^{n_{cont}} \\ 0_{(nl \times nb)}^0 & S_{nl \times nb}^1 & 0_{(nl \times nb)} & \cdots & 0_{(nl \times nb)} & 0_{(nl \times nb)}^{n_{cont}} \\ 0_{(nl \times nb)}^0 & -S_{nl \times nb}^1 & 0_{(nl \times nb)} & \cdots & 0_{(nl \times nb)} & 0_{(nl \times nb)}^{n_{cont}} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \ddots & \vdots & \vdots \\ 0_{(nl \times nb)}^0 & 0_{(nl \times nb)}^1 & 0_{(nl \times nb)} & \cdots & 0_{(nl \times nb)} & S_{nl \times nb}^{n_{cont}} \\ 0_{(nl \times nb)}^0 & 0_{(nl \times nb)}^1 & 0_{(nl \times nb)} & \cdots & 0_{(nl \times nb)} & -S_{nl \times nb}^{n_{cont}} \end{bmatrix}_{2nl(1+n_{cont}) \times nb(1+n_{cont})} \quad (2.66)$$

$$A_{13} = \begin{matrix} 0 \\ 1 \\ \vdots \\ n_{cont} \end{matrix} \begin{bmatrix} 0_{(nl \times nd)}^0 & 0_{(nl \times nd)}^1 & \cdots & 0_{(nl \times nd)}^{n_{cont}} \\ 0_{(nl \times nd)}^0 & 0_{(nl \times nd)}^1 & \cdots & 0_{(nl \times nd)}^{n_{cont}} \\ 0_{(nl \times nd)} & 0_{(nl \times nd)} & \cdots & 0_{(nl \times nd)} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ 0_{(nl \times nd)} & 0_{(nl \times nd)} & \cdots & 0_{(nl \times nd)} \\ 0_{(nl \times nd)} & 0_{(nl \times nd)} & \cdots & 0_{(nl \times nd)} \end{bmatrix}_{2nl(1+n_{cont}) \times nd(1+n_{cont})} \quad (2.67)$$

$$A_{21} = \begin{matrix} 1 \\ 2 \\ \vdots \\ n_{cont} \end{matrix} \left[\begin{array}{cccccc}
-I_{(ng \times ng)}^0 & I_{(ng \times ng)}^1 & 0_{(ng \times ng)} & \cdots & 0_{(ng \times ng)} & 0_{(ng \times ng)}^{n_{cont}} \\
I_{(ng \times ng)}^0 & -I_{(ng \times ng)}^1 & 0_{(ng \times ng)} & \cdots & 0_{(ng \times ng)} & 0_{(ng \times ng)}^{n_{cont}} \\
-I_{(ng \times ng)}^0 & 0_{(ng \times ng)}^1 & I_{(ng \times ng)}^2 & \cdots & 0_{(ng \times ng)} & 0_{(ng \times ng)}^{n_{cont}} \\
I_{(ng \times ng)}^0 & 0_{(ng \times ng)}^1 & -I_{(ng \times ng)}^2 & \cdots & 0_{(ng \times ng)} & 0_{(ng \times ng)}^{n_{cont}} \\
\vdots & \vdots & \vdots & \ddots & \vdots & \vdots \\
-I_{(ng \times ng)}^0 & 0_{(ng \times ng)}^1 & 0_{(ng \times ng)} & \cdots & 0_{(ng \times ng)} & I_{(ng \times ng)}^{n_{cont}} \\
I_{(ng \times ng)}^0 & 0_{(ng \times ng)}^1 & 0_{(ng \times ng)} & \cdots & 0_{(ng \times ng)} & -I_{(ng \times ng)}^{n_{cont}}
\end{array} \right]_{2ng(n_{cont}) \times ng(1+n_{cont})} \quad (2.68)$$

$$A_{22} = \begin{matrix} 1 \\ 2 \\ \vdots \\ n_{cont} \end{matrix} \left[\begin{array}{cccc}
0_{(ng \times nl)}^0 & 0_{(ng \times nl)}^1 & \cdots & 0_{(ng \times nl)}^{n_{cont}} \\
0_{(ng \times nl)} & 0_{(ng \times nl)} & \cdots & 0_{(ng \times nl)} \\
0_{(ng \times nl)} & 0_{(ng \times nl)} & \cdots & 0_{(ng \times nl)} \\
0_{(ng \times nl)} & 0_{(ng \times nl)} & \cdots & 0_{(ng \times nl)} \\
\vdots & \vdots & \cdots & \vdots \\
0_{(ng \times nl)} & 0_{(ng \times nl)} & \cdots & 0_{(ng \times nl)} \\
0_{(ng \times nl)} & 0_{(ng \times nl)} & \cdots & 0_{(ng \times nl)}
\end{array} \right]_{2ng(n_{cont}) \times nl(1+n_{cont})} \quad (2.69)$$

$$A_{23} = \begin{matrix} 1 \\ 2 \\ \vdots \\ n_{cont} \end{matrix} \left[\begin{array}{cccc}
0_{(ng \times nd)}^0 & 0_{(ng \times nd)}^1 & \cdots & 0_{(ng \times nd)}^{n_{cont}} \\
0_{(ng \times nd)} & 0_{(ng \times nd)} & \cdots & 0_{(ng \times nd)} \\
0_{(ng \times nd)} & 0_{(ng \times nd)} & \cdots & 0_{(ng \times nd)} \\
0_{(ng \times nd)} & 0_{(ng \times nd)} & \cdots & 0_{(ng \times nd)} \\
\vdots & \vdots & \cdots & \vdots \\
0_{(ng \times nd)} & 0_{(ng \times nd)} & \cdots & 0_{(ng \times nd)} \\
0_{(ng \times nd)} & 0_{(ng \times nd)} & \cdots & 0_{(ng \times nd)}
\end{array} \right]_{2ng(n_{cont}) \times nd(1+n_{cont})} \quad (2.70)$$

Mientras que el b se formula como:

$$b = \begin{bmatrix} \overline{f_{ij}^0}_{(nl \times 1)} \\ \overline{f_{ij}^0}_{(nl \times 1)} \\ \overline{f_{ij}^1}_{(nl \times 1)} \\ \overline{f_{ij}^1}_{(nl \times 1)} \\ \vdots \\ \overline{f_{ij}^{n_{cont}}}_{(nl \times 1)} \\ \overline{f_{ij}^{n_{cont}}}_{(nl \times 1)} \\ \\ \overline{\Delta P}_{(ng \times 1)}^0 \\ \overline{\Delta P}_{(ng \times 1)}^0 \\ \overline{\Delta P}_{(ng \times 1)}^1 \\ \overline{\Delta P}_{(ng \times 1)}^1 \\ \vdots \\ \overline{\Delta P}_{(ng \times 1)}^{n_{cont}} \\ \overline{\Delta P}_{(ng \times 1)}^{n_{cont}} \end{bmatrix}_{[2nl(1+n_{cont})+2ng(n_{cont})] \times 1} \quad (2.71)$$

Donde:

S^0 y $S^{n_{cont}}$: Representa el flujo de potencia desde la barra i hasta j en MW para el caso base y la última contingencia.

$\overline{f_{ij}^0}$: Representa el flujo máximo de potencia desde la barra i hasta j en MW para el caso base y la última contingencia.

I : Matriz identidad.

$\overline{\Delta P}$: Representa la variación de potencia, generación, de forma matricial.

2.1.3.4 Límites de Variables

Los imites se expresan al igual que en (2.44) para cada contingencia, tal que:

$$\begin{bmatrix} \underline{P}_{g(n_g \times 1)}^0 \\ \underline{P}_{g(n_g \times 1)}^1 \\ \vdots \\ \underline{P}_{g(n_g \times 1)}^{n_{cont}} \\ -\pi_{(nb \times 1)}^0 \\ -\pi_{(nb \times 1)}^1 \\ \vdots \\ -\pi_{(nb \times 1)}^{n_{cont}} \\ \underline{\lambda}_{(nd \times 1)}^0 \\ \underline{\lambda}_{(nd \times 1)}^1 \\ \vdots \\ \underline{\lambda}_{(nd \times 1)}^{n_{cont}} \end{bmatrix} \leq \begin{bmatrix} P_{g(n_g \times 1)}^0 \\ P_{g(n_g \times 1)}^1 \\ \vdots \\ P_{g(n_g \times 1)}^{n_{cont}} \\ \theta_{(nb \times 1)}^0 \\ \theta_{(nb \times 1)}^1 \\ \vdots \\ \theta_{(nb \times 1)}^{n_{cont}} \\ \lambda_{(nd \times 1)}^0 \\ \lambda_{(nd \times 1)}^1 \\ \vdots \\ \lambda_{(nd \times 1)}^{n_{cont}} \end{bmatrix} \leq \begin{bmatrix} \overline{P}_{g(n_g \times 1)}^0 \\ \overline{P}_{g(n_g \times 1)}^1 \\ \vdots \\ \overline{P}_{g(n_g \times 1)}^{n_{cont}} \\ \pi_{(nb \times 1)}^0 \\ \pi_{(nb \times 1)}^1 \\ \vdots \\ \pi_{(nb \times 1)}^{n_{cont}} \\ \overline{\lambda}_{(nd \times 1)}^0 \\ \overline{\lambda}_{(nd \times 1)}^1 \\ \vdots \\ \overline{\lambda}_{(nd \times 1)}^{n_{cont}} \end{bmatrix} \quad (2.72)$$

Para la barra donde se encuentra la referencia del sistema:

$$\begin{aligned}
0 &\leq \theta_{slack}^0 \leq 0 \\
0 &\leq \theta_{slack}^1 \leq 0 \\
&\vdots \\
0 &\leq \theta_{slack}^{n_{cont}} \leq 0
\end{aligned} \quad (2.73)$$

Donde:

El superíndice de la variable retrata la contingencia modelada, en caso de ser igual a cero corresponde al caso base. Siguiendo con las definiciones planteadas en la ecuación (2.41).

2.1.4 Problema de Planificación de la Expansión del Sistema de Transmisión - NTEP

Este problema de planificación se aborda en [10], dicha formulación se presenta a continuación y se denominara como la formulación clásica.

2.1.4.1 Función Objetivo

$$\min Z = \sum_{(i,j) \in \Omega_c} c_{ij} \cdot n_{ij} + \alpha \sum_i r_i \quad (2.74)$$

Donde:

c_{ij} : Costo de la construcción de la rama $i - j$ en \$.

n_{ij} : Número de ramas construidas en la rama $i - j$, siendo $n_{ij} \in \text{enteros}$.

α : Factor de penalización por desconexión de carga \$/MW.

r_i : Carga desconectada en la barra i en MW.

2.1.4.2 Restricciones de igualdad

Para las restricciones de igualdad se considera el balance de potencia en las barras y la ecuación del flujo de potencia linealizado, tal que:

$$A \cdot f + g + r = d \quad (2.75)$$

$$f_{ij} - b_{ij} (n_{ij0} + n_{ij}) (\theta_i - \theta_j) = 0 \quad (2.76)$$

Donde:

A : Matriz de incidencia nodal.

g : Vector de generación, g_i , en MW.

f : Vector que representa los flujos de potencia en MW.

d : Vector cargas, d_i , en MW.

f_{ij} : Flujo de potencia entre las ramas $i - j$ en MW.

b_{ij} : Susceptancia de la rama $i - j$ en pu.

n_{ij0} : Total de circuitos en la conexión $i - j$ en el estado inicial.

θ_i y θ_j : Valor angular del voltaje en la barra i e j en rad..

2.1.4.3 Restricciones de desigualdad

Las restricciones de desigualdad recogen las restricciones técnicas de la potencia máxima que puede circular en la conexión $i - j$.

$$|f_{ij}| \leq (n_{ij0} + n_{ij}) \bar{f}_{ij} \quad (2.77)$$

Donde:

\bar{f}_{ij} : Flujo máximo de potencia en la conexión $i - j$ en MW.

2.1.4.4 Límites de Variables

Los límites de las variables se definen, como:

$$0 \leq g \leq \bar{g} \quad (2.78)$$

$$0 \leq r \leq \bar{d} \quad (2.79)$$

$$0 \leq n_{ij} \leq \bar{n}_{ij} \quad (2.80)$$

$$-\underline{\theta}_{ij} \leq \theta_{ij} \leq \bar{\theta}_{ij} \quad (2.81)$$

$$0 \leq \theta_{slack} \leq 0 \quad (2.82)$$

Donde:

\bar{g} : Vector de generación máxima g_i en MW.

\bar{d} : Vector de deslastre de carga máximo d_i en pu.

\bar{n}_{ij} : Número máximo de circuitos que se pueden construir.

$\bar{\theta}_{ij}$ y $\underline{\theta}_{ij}$: Valor angular máximo y mínimo del voltaje en las barras en rad.

2.1.5 Problema de Planificación óptima de la Expansión del Sistema Eléctrico de Transmisión Considerando Restricciones de Seguridad, Formulación matricial

La sección 2.1.4 considera la matriz de incidencia como base para el desarrollo del modelo de planificación por lo que puede expresar el problema en función de la variable n_{ij} , número de líneas en el ramal $i - j$.

Mas la modelación matricial llevada a cabo tiene un enfoque diferente por lo que difiere de la capacidad de integrar el vector n_{ij} dentro de la modelación del problema de optimización de la planificación, como en el caso de la modelación clasica.

La formulación desarrollada en la sección 2.1.3 puede ser empleada al considerar el problema de planificación. Para lograrlo, se debe llevar cabo un ajuste de los parámetros del sistema en función del número de ramales del sistema. Propendiendo a mantener la estructura ya trabajada.

2.1.5.1 Consideraciones Matriz Ybarra

Al integrar la variable relativa al número de ramales del sistema en las ecuaciones (2.17), (2.18) y (2.19) es posible definir:

$$\begin{aligned}
 Y_e^{new} &= [n_{ij}][Y_{ee}]C_e + [n_{ij}][Y_{er}]C_r \\
 Y_e^{new} &= [n_{ij}] ([Y_{ee}]C_e + [Y_{er}]C_r) \\
 Y_e^{new} &= [n_{ij}]Y_e
 \end{aligned} \tag{2.83}$$

$$\begin{aligned}
 Y_r^{new} &= [n_{ij}][Y_{re}]C_e + [n_{ij}][Y_{rr}]C_r \\
 Y_r^{new} &= [n_{ij}] ([Y_{re}]C_e + [Y_{rr}]C_r) \\
 Y_r^{new} &= [n_{ij}]Y_r
 \end{aligned} \tag{2.84}$$

$$\begin{aligned}
 Y_{barra}^{new} &= C_e^T [n_{ij}]Y_e + C_r^T [n_{ij}]Y_r \\
 Y_{barra}^{new} &= C_e^T Y_e^{new} + C_r^T Y_r^{new}
 \end{aligned} \tag{2.85}$$

Al igual que las matrices B y S descritas en la sección 2.1.3, son ajustadas tal que:

$$B^{new} = -Imag(Y_{barra}^{new}) \quad (2.86)$$

$$S^{new} = -Imag(Y_e^{new}) \quad (2.87)$$

De esta forma es posible mantener la estructura y modelación previamente definidas. Al solo modificar la construcción de la matriz Ybarra.

2.1.5.2 Función Objetivo

La función objetivo del problema de planificación puede ser descrita como el minimizar el costo de construcción de líneas nuevas y el deslastre de carga.

$$\min Z = C^T_{(1 \times nl)} n_{(nl \times 1)} + \alpha \cdot C_{ENS} \quad (2.88)$$

Donde:

C : Costo de construcción, vectorizado, de cada rama $i - j$ en \$.

$n = n_{ij} - n_{ij}^0$: Circuitos construidos en la rama $i - j$. Con n_{ij}^0 como los circuitos iniciales del sistema, previo al plan de expansión.

α : Factor de penalización de deslastre de carga.

C_{ENS} : Cuantificación económica de la energía no suministrada en \$.

2.1.5.3 Restricciones de Igualdad

Las restricciones de igualdad se encuentran contenidas en la modelación presentada en la sección 2.1.3.

2.1.5.4 Restricciones de Desigualdad

Las restricciones de desigualdad se encuentran contenidas en la modelación presentada en la sección 2.1.3.

2.1.5.5 Límites de Variables

Los límites de las variables internas se encuentran contenidas en la modelación presentada en la sección 2.1.3. Las restricciones relativas al número máximo de circuitos por corredor se presentan a continuación:

$$\underline{n}_{(nl \times 1)} \leq n_{(nl \times 1)} \leq \bar{n}_{(nl \times 1)} \quad (2.89)$$

Donde:

\bar{n} y \underline{n} : Límites máximos y mínimos de los circuitos en cada rama.

2.1.6 Algoritmo de optimización de mapeo por media-varianza - MVMO

Considerando la versión de enjambre de partículas, para cada partícula se define una matriz de resultados, que contiene vectores de resultados, la cantidad de estos depende del tamaño de la población definido. Estos son ordenados desde la mejor solución ubicándose en la primera posición hasta la peor solución ubicándose en la última. La calidad de la solución se determina a partir de la evaluación del vector de resultado en la función objetivo expresada en (2.88).

2.1.6.1 Inicialización de matriz de resultados

Esta matriz es inicializada con valores aleatorios entre el cero y el uno, tal que se desnormaliza para ser evaluada en (2.88). Para ser ordenada conforme las consideraciones presentadas.

De forma general la matriz de resultados para una partícula tiene la forma:

$$M_{(n_{pobl} \times n_{var})} = \begin{bmatrix} m_1^1 & m_2^1 & \dots & m_{n_{var}}^1 \\ m_1^2 & m_2^2 & \dots & m_{n_{var}}^2 \\ m_1^3 & m_2^3 & \dots & m_{n_{var}}^3 \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ m_1^{n_{pobl}} & m_2^{n_{pobl}} & \dots & m_{n_{var}}^{n_{pobl}} \end{bmatrix} \quad (2.90)$$

2.1.6.2 Ejecución del algoritmo

La media y varianza de la población se calcula conforme se presenta a continuación:

Media:

$$\mu = \frac{1}{n_{pobl}} \cdot \left[\sum_{i=1}^{n_{pobl}} m_1^i \quad \sum_{i=1}^{n_{pobl}} m_2^i \quad \dots \quad \sum_{i=1}^{n_{pobl}} m_{n_{var}}^i \right] \quad (2.91)$$

Tal que se obtiene un vector de la media para cada una de las variables del sistema.

Varianza:

$$\sigma^2 = \frac{1}{n_{pobl}} \cdot \left[\sum_{i=1}^{n_{pobl}} (m_1^i - \mu_{(1)})^2 \quad \sum_{i=1}^{n_{pobl}} (m_2^i - \mu_{(2)})^2 \quad \dots \quad \sum_{i=1}^{n_{pobl}} (m_{n_{var}}^i - \mu_{(n_{var})})^2 \right] \quad (2.92)$$

De forma similar para la varianza se obtiene un vector de contiene la varianza para cada variable del sistema.

Estos valores son sometidos a la función de mapeo definida en [11] como:

$$m_i = h_m + (1 - h_1 + h_0) \times m_i^* \quad (2.93)$$

$$h(\bar{m}, s_1, s_2, m) = \bar{m} \times (1 - e^{-m \times s_1}) + (1 - \bar{m}_i) \times e^{-(1-m) \times s_2} \quad (2.94)$$

$$h_m = h(m = m_i^*), h_0 = h(m = 0), h_1 = h(m = 1) \quad (2.95)$$

$$s_i = -\ln(\sigma_i) \times f_s \quad (2.96)$$

Donde:

h : Es la función de mapeo.

m_i : Es el nuevo vector de resultados calculado.

m_i^* : Es un vector de resultados generado aleatoriamente.

s_i : Factor de forma, para la función de mapeo.

f : Es un factor de escala, se considera constante, para la función de mapeo.

La función de mapeo descrita se presenta a continuación, en la figura 2.2, que puede ser modificada en función del factor de escala, f , y forma, s_i , definidos propiamente en el algoritmo.

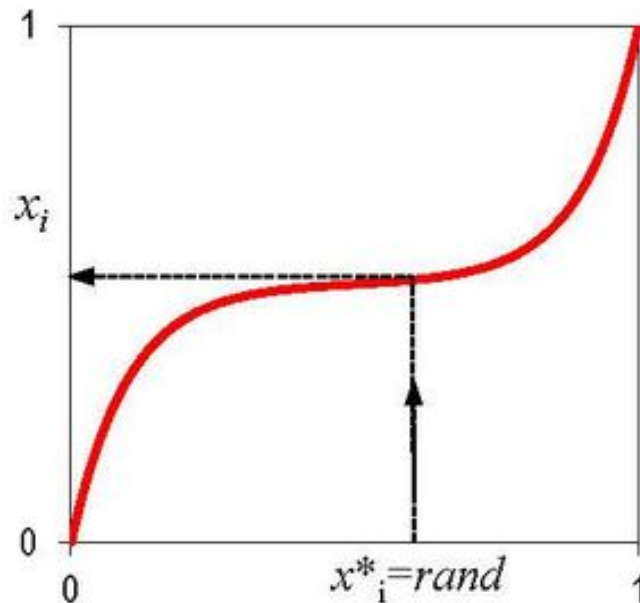


Figura 2.2: Función de mapeo algoritmo MVMO, obtenida de [12].

De esta forma se determina un vector de resultados nuevo que constituirá la base para la mutación y determinación del vector $m_{h,i}^{j,o}$.

Este proceso se realiza de forma iterativa, hasta cumplir el número de iteraciones determinado.

2.1.6.3 Consideración para n partículas

De acuerdo con [7], el algoritmo MVMO tradicional solo se considera una partícula. Pero la versión de enjambre puede considerar más de una por lo que la matriz de resultados (2.90),

puede ser redefinida tal que:

$$M_{(n_{part} \times n_{pobl} \times n_{var})}^{Part} = \begin{bmatrix} M_{(n_{pobl} \times n_{var})}^{P1} \\ M_{(n_{pobl} \times n_{var})}^{P2} \\ M_{(n_{pobl} \times n_{var})}^{P3} \\ \vdots \\ M_{(n_{pobl} \times n_{var})}^{P_{n_{part}}} \end{bmatrix} \quad (2.97)$$

Donde:

$M_{(n_{part} \times n_{pobl} \times n_{var})}^{Part}$: Representa la matriz de partículas que contiene la matriz de resultados para cada una de estas.

$M_{(n_{pobl} \times n_{var})}$: Representa la matriz de resultados que contiene la población de esa partícula.

$m_{(1 \times n_{var})}$: Representa un vector de resultados que contiene los resultados para cada una de las variables del sistema.

n_{part} : Número de partículas.

n_{var} : Número de variables del sistema.

n_{pobl} : Tamaño de la población.

2.1.7 Implementación Python

Bajo la modelación matemática propuesta se implementa en Python un programa que permita la resolución del problema de planificación óptima de los sistemas eléctricos de transmisión considerando restricciones de seguridad.

Al ser implementado de forma modular, a continuación se describirán las etapas más importantes a través del uso de diagramas de flujo.

2.1.7.1 Problema de planificación

En el diagrama de flujo presentado se retrata la estructura básica del programa modelado. Que se constituye de varios subprocesos cuya modulación e implementación es indepen-

diente.

De forma general se presentan los procesos llevados a cabo de forma más explicativa:

1. Se define el caso de estudio al seleccionarlo dentro de la herramienta. Cada caso de estudio presentado se ha modelado de forma que su estructura pueda ser modificada de forma fácil y abarque todas las variables del sistema. Además, de realizar la importación de librerías de Python necesarias para el funcionamiento del programa.
2. La definición de la metodología se describe como la selección del algoritmo heurístico que se desea emplear, las opciones de impresión, modelación del deslastre (continua o discreta), optimizador utilizado, consideraciones sobre la capacidad de redespacho o si se analizará las restricciones de seguridad.
3. Se realizan diversos procesos para el tratamiento de datos, tales como la reenumeración de barras, almacenamiento de datos, identificación de tipo de barras, etc.
4. Dependiendo de la definición de la metodología antes realizada, se modifican variables internas para que el programa pueda trabajar de acuerdo con los requerimientos dados.
5. Se modela el problema utilizando las ecuaciones desarrolladas en la sección 2.1.5.
6. Se selecciona el algoritmo heurístico a ser empleado, o la resolución con herramientas disponibles en distintas librerías de Python, Pymoo.
7. Los resultados obtenidos se presentan junto con la gráfica de convergencia.

El optimizador al que se hace referencia se utiliza para la solución del problema SCDCOPF. También se implementa la librería Pymoo con el objetivo de contar con un mecanismo para validar la eficacia del algoritmo heurístico implementado.

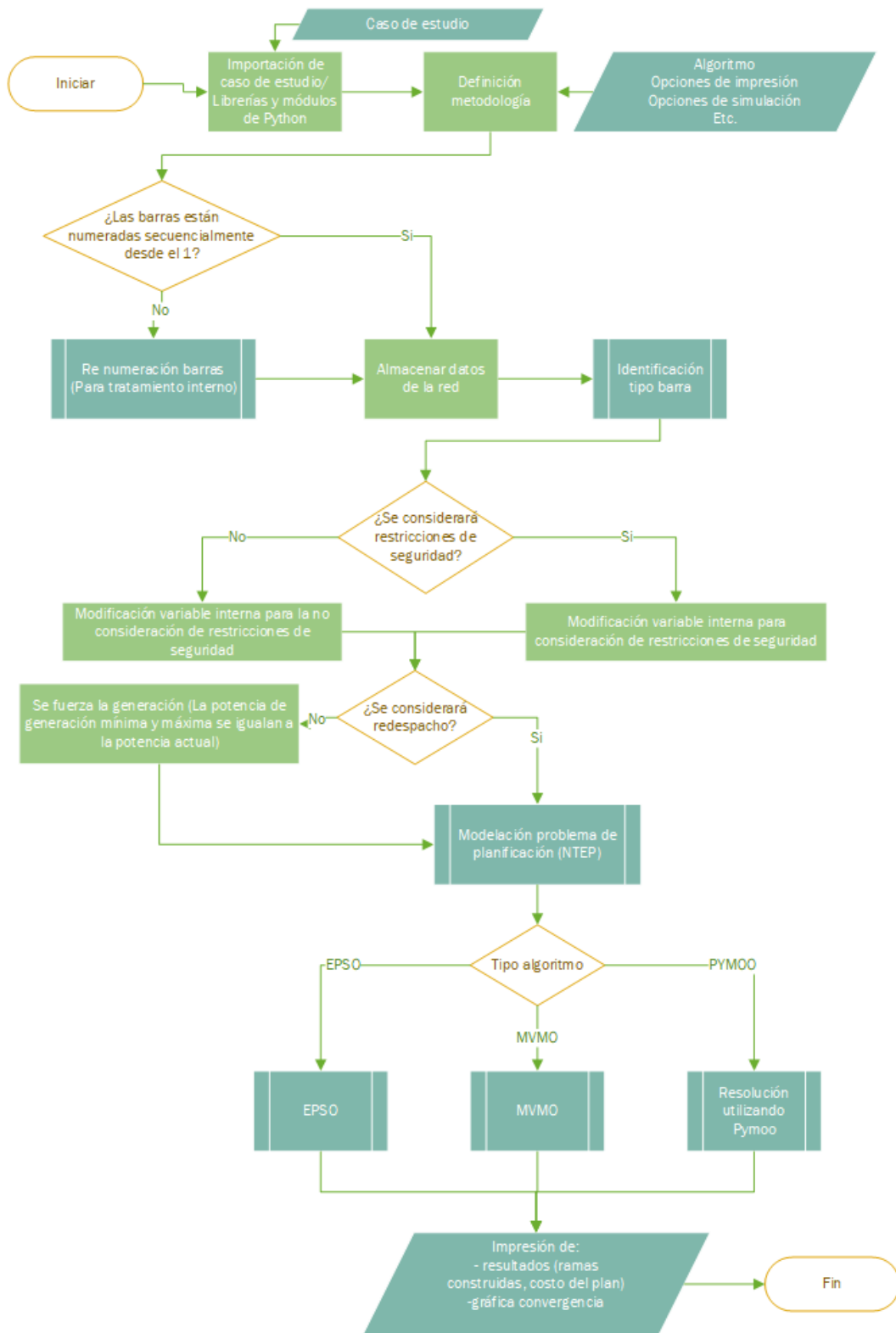


Figura 2.3: Diagrama de flujo planificación óptima.

2.1.7.2 SCDCOPF

De igual forma para la solución del problema SCDCOPF evidencia el esquema de resolución utilizado dentro del algoritmo implementado en Python.

1. Se importa el caso de estudio y se eliminan las líneas no construidas.
2. Se verifica la topología del sistema, únicamente analizando casos donde el sistema no se divida en islas.
3. Se define el caso base y los casos de (restricciones de seguridad).
4. Se modifica los parámetros del sistema para el caso base y las contingencias a través de un proceso iterativo. Del cual se construye la modelación desarrollada en 2.1.3.
5. A través del optimizador se determinan y almacenan los resultados del sistema, conforme a las variables detalladas en (2.44).

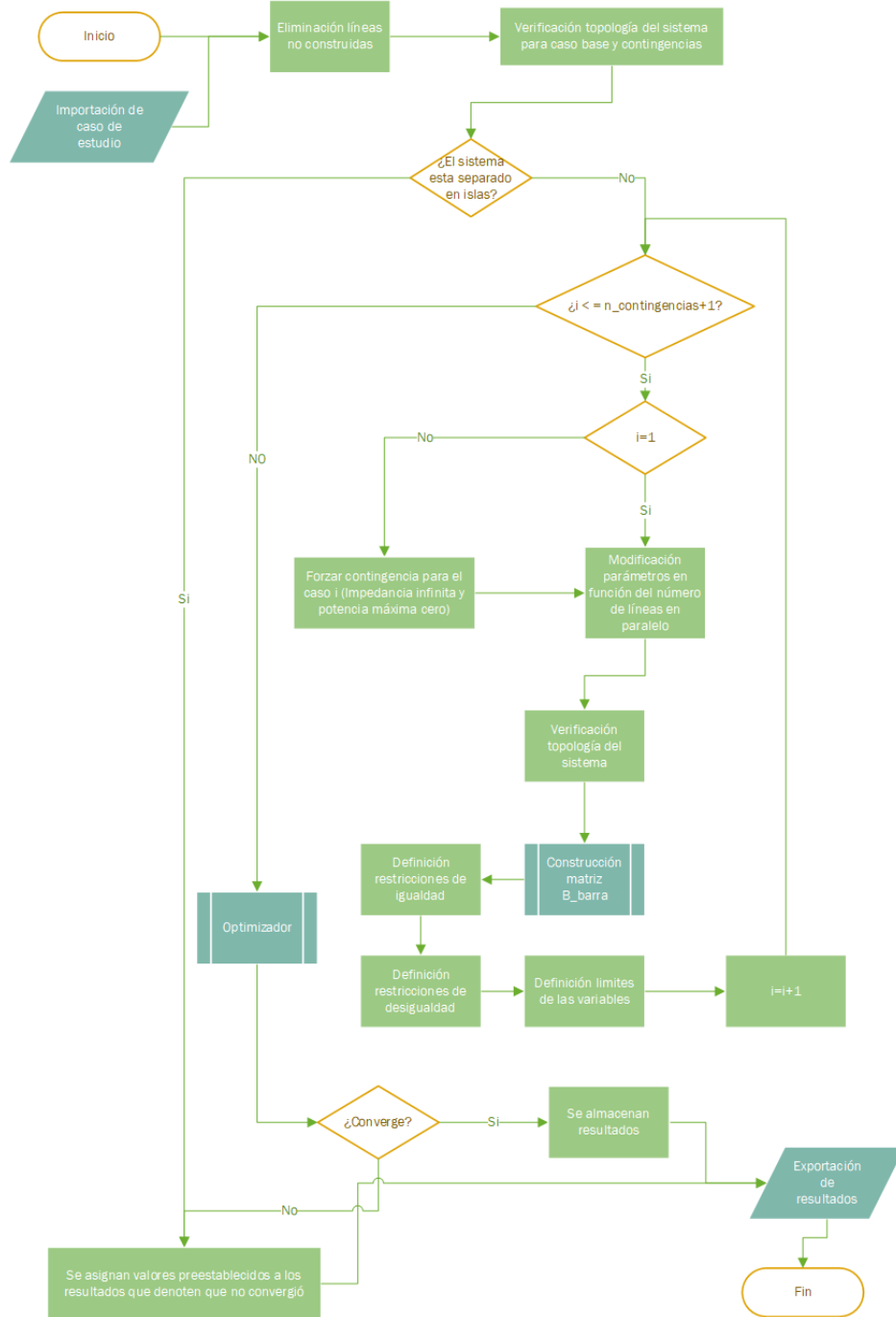


Figura 2.4: Diagrama de flujo modelación para la solución del SDCOPF.

2.1.7.3 Algoritmo MVMO

La modelación matemática del MVMO descrita en 2.1.6 se implementa en Python siguiendo el diagrama de flujo presentado.

1. Se inicializan las variables dentro de la matriz de resultados mediante la asignación aleatoria de valores dentro del intervalo de cero a uno.
2. Se evalúa la matriz de resultados desnormalizada.
3. Mediante un proceso iterativo se ordena la matriz de resultados, desde el mejor resultado al peor, para cada partícula.
4. Se genera un resultado a partir de las funciones de mapeo mediante la media y varianza de la población para cada partícula.
5. Se mutan variables del mejor resultado global, mejor entre todas las partículas, con el resultado generado y se determina el nuevo resultado.
6. Se evalúa este nuevo resultado desnormalizado y se actualiza la matriz de resultados.

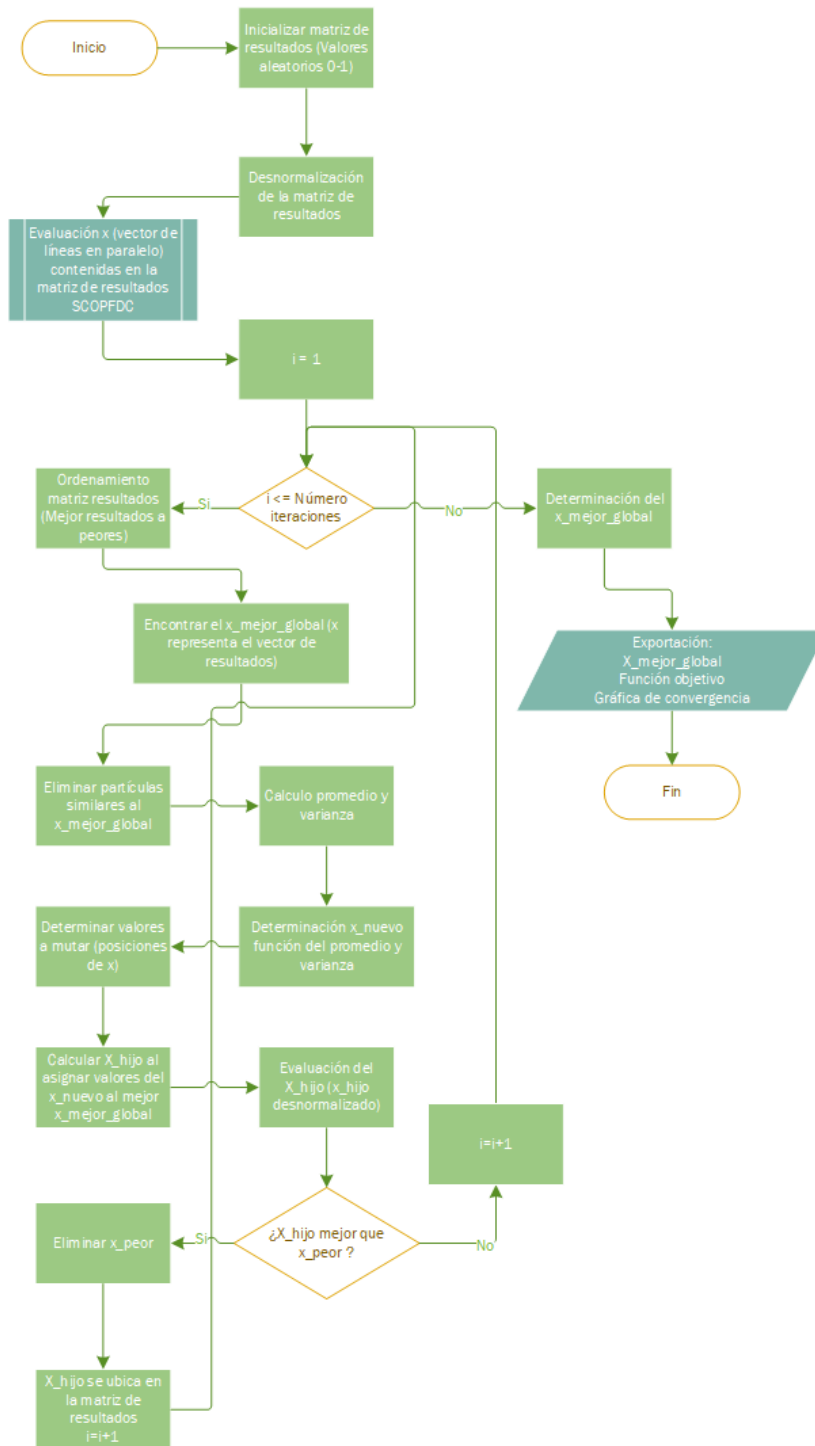


Figura 2.5: Diagrama de flujo MVMO.

2.1.7.4 Modelación

En la etapa presentada se retrata como, una vez generados planes de expansión, por el algoritmo heurístico, se modifican las variables del sistema para la posterior evaluación y

calificación de la calidad del plan, en términos económicos.

1. Se importa el caso de estudio definido por la heurística del algoritmo.
2. Se modifican los parámetros del sistema, utilizando las ecuaciones (2.83) a (2.87). Tal que se consideren el efecto del número de líneas en paralelo.
3. Se evalúa el plan de expansión mediante la herramienta presentada en 2.1.7.2. Y se determinan los costos de energía no suministrada y del plan de expansión.
4. Se penalizan los costos asociados a la energía no suministrada.

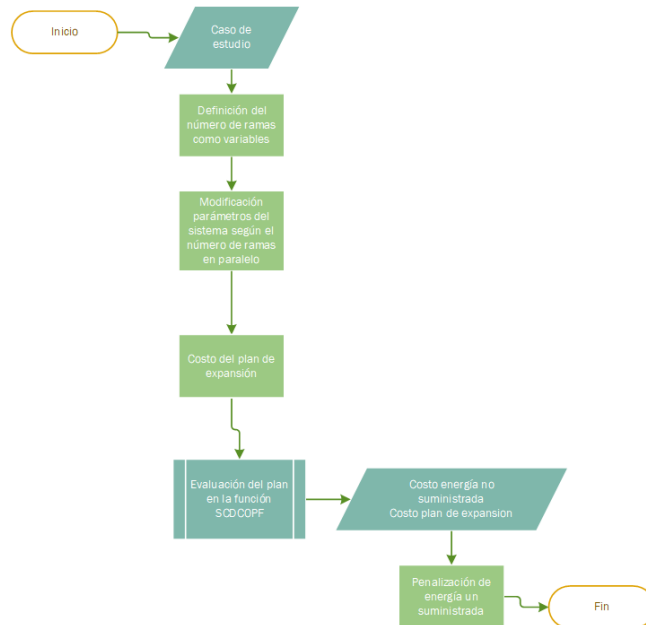


Figura 2.6: Diagrama de flujo modelación para la evaluación de los planes de expansión.

3 RESULTADOS Y DISCUSIÓN

En este capítulo, se presentarán los resultados obtenidos de la herramienta computacional desarrollada. Con el fin de verificar la eficacia de la herramienta alase corroborar los resultados obtenidos con los determinados en la literatura para redes de prueba. Además, de presentar diversos casos de estudio al aprovechar la versatilidad de la herramienta modelada.

El análisis presentado a continuación permitirá la elaboración de conclusiones respecto a la metodología aplicada para la determinación de planes óptimos de la expansión de la transmisión eléctrica para distintas redes eléctricas.

3.1 RED DE GARVER

La red de Garver consiste en una red de prueba compuesta por 5 barras interconectadas por 6 líneas de transmisión cuya carga se encuentra descrita por demanda de potencia total igual a 760 MW. A este sistema se le pretende incorporar un nuevo generador en una barra nueva, barra 6, que requiere su interconexión con el sistema a través de nuevas líneas, [13].

Bajo esta premisa se plantean 15 líneas candidatas, que incluyen circuitos en paralelo a los ya existentes o líneas nuevas, para poder determinar el plan óptimo de expansión considerando las distintas restricciones técnicas del sistema, así como las consideradas respecto a las restricciones de seguridad.

El sistema descrito se ilustra más adelante.

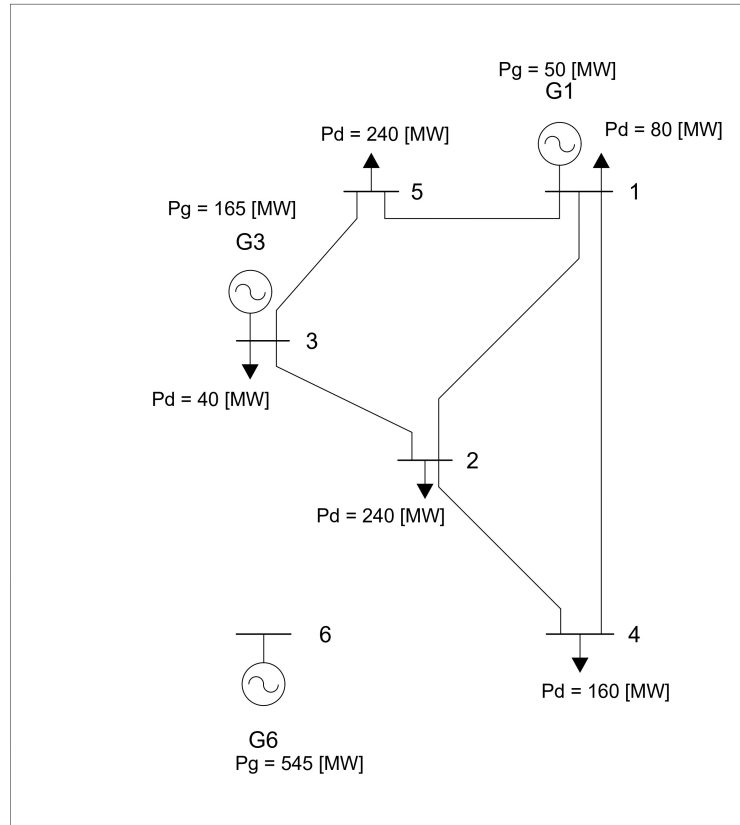


Figura 3.1: Red de Garver.

En la red de Garver presentada en 3.1 es posible realizar la expansión de los corredores actuales hasta un máximo de 4 líneas por corredor. También se considera la construcción de líneas nuevas, tal y como se presenta en la siguiente figura, considerando hasta máximo 4 circuitos por corredor.

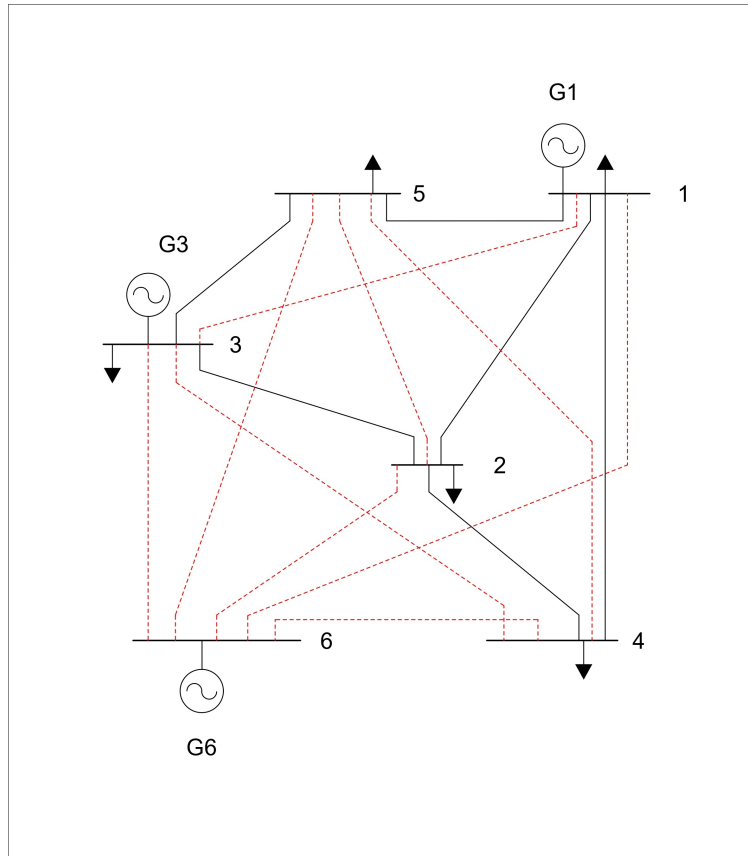


Figura 3.2: Posibles líneas red de Garver.

La versatilidad del algoritmo permite estudiar y analizar el problema desde distintas perspectivas. Dando origen a los casos presentados a continuación.

3.1.1 Planificación óptima - Sin Consideraciones de redespacho ni restricciones de seguridad

Al no considerar el redespacho de los generadores se establece que la potencia generada inicial, sin contar la barra de referencia, se mantiene indistintamente de la nueva configuración del sistema producto del proceso de planificación.

Además, al no considerar restricciones de seguridad ante la pérdida de una línea no es posible garantizar que el sistema no deslastre carga.

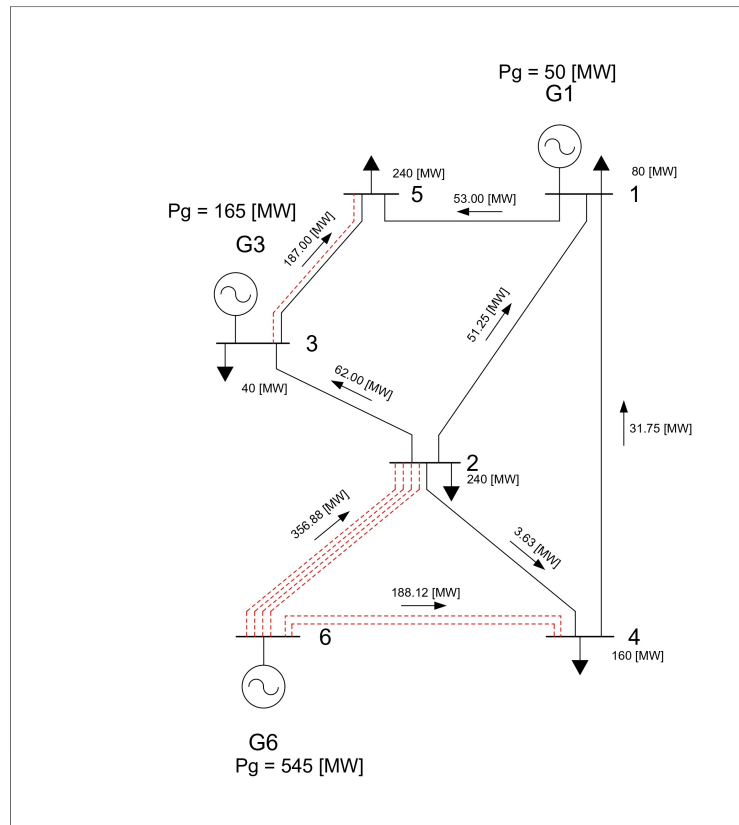


Figura 3.3: Resultados planificación óptima red de Garver - Sin Consideraciones de redespacho ni restricciones de seguridad.

El sistema óptimo obtenido para cuando no se considera el redespacho ni restricciones de seguridad se alcanzó el valor óptimo cerca de la iteración 350. Cuyo costo alcanzo los 200 millones de dólares.

Para brindar claridad sobre este tiempo de simulación, en los anexos se incluyen la salida del programa que detalla el tiempo de simulación, así como un análisis de contingencias para el nuevo sistema obtenido.

Además se presenta la curva de convergencia para el algoritmo MVMO, cuando se tiene 100 partículas, 5 individuos por población y 500 iteraciones.

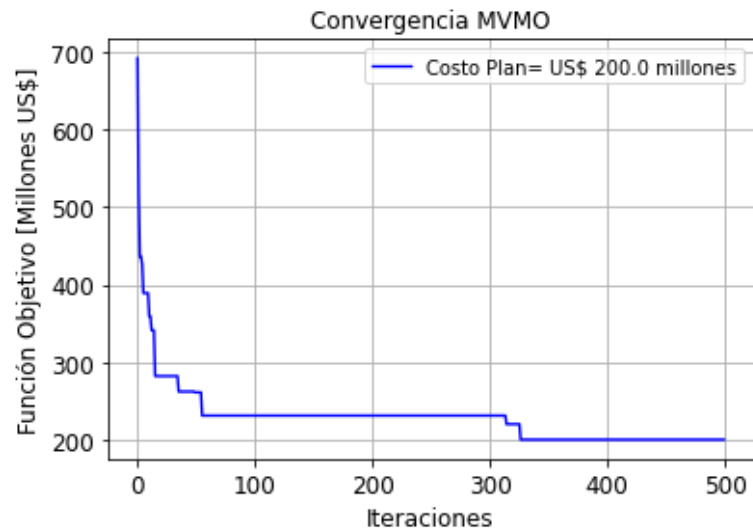


Figura 3.4: Curva de convergencia planificación óptima red de Garver - Sin Consideraciones de redespacho ni restricciones de seguridad.

3.1.2 Planificación óptima - Considerando redespacho y sin considerar restricciones de seguridad

A diferencia del caso presentado en 3.1.1, este caso brinda mayor holgura al permitir variar la potencia generada por cada uno de los generadores.

Para las mismas partículas, población e iteraciones que en 3.1.1, se alcanza el óptimo alrededor de la iteración 50. Cuyo costo alcanzo los 110 millones de dólares. Como se ilustra en la siguiente curva de convergencia.

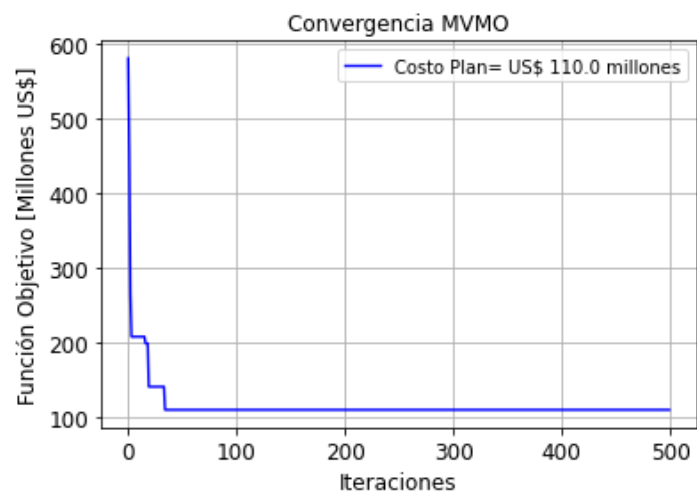


Figura 3.5: Curva de convergencia planificación óptima red de Garver - Considerando redespacho y sin considerar restricciones de seguridad.

El sistema resultante se encuentra presentado a continuación.

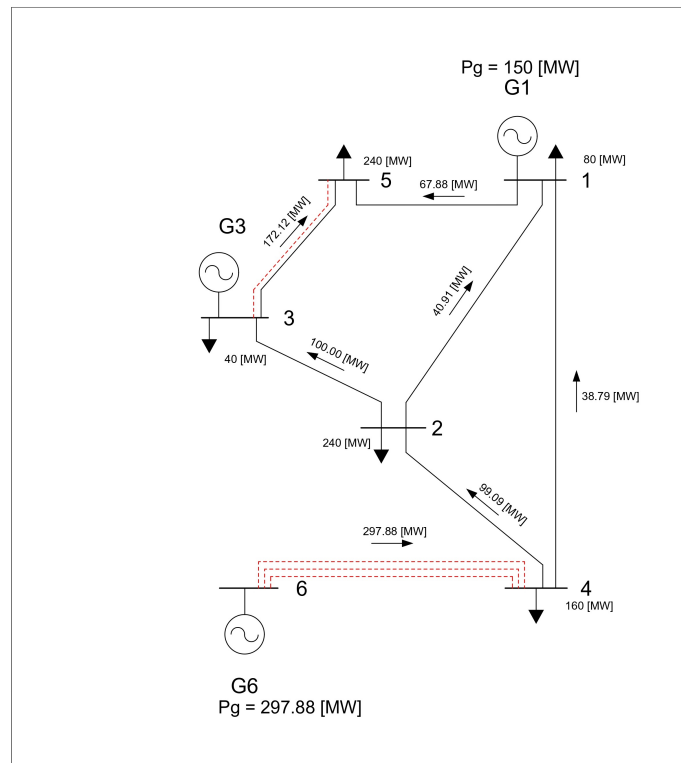


Figura 3.6: Resultados planificación óptima red de Garver - Considerando redespacho y sin considerar restricciones de seguridad.

3.1.3 Planificación óptima - Considerando redespacho y restricciones de seguridad

El caso presentado brinda holgura al sistema al permitirle variar la potencia de generación de los generadores. Mas la complejidad de este problema sera añadida por las consideraciones de seguridad.

En el caso presentado el deslastre de carga no es permisible bajo condiciones de contingencias N-1, es decir ante la perdida de 1 línea de transmisión el sistema no podrá deslastar carga.

Para las mismas partículas, población e iteraciones que en 3.1.1, se alcanza el óptimo alrededor de la iteración 100. Cuyo costo alcanzo los 180 millones de dólares. Como se evidencia en la curva de convergencia presentada.

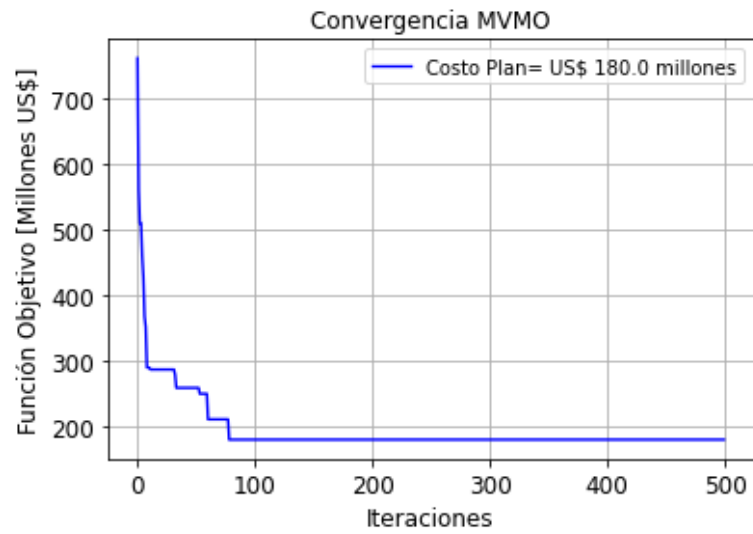


Figura 3.7: Curva de convergencia planificación óptima red de Garver - Considerando redespacho y restricciones de seguridad.

El sistema resultante se encuentra presentado a continuación.

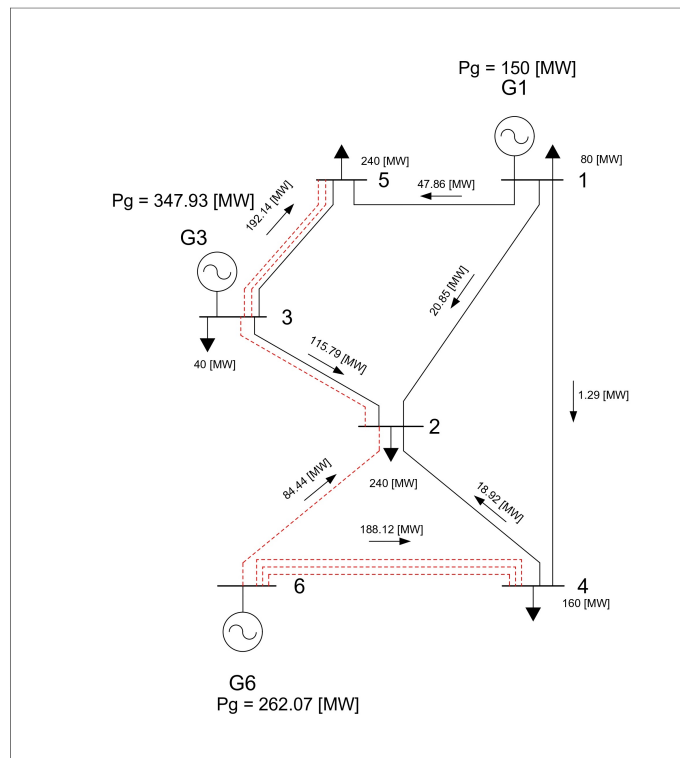


Figura 3.8: Resultados planificación óptima red de Garver - Considerando redespacho y restricciones de seguridad.

3.1.4 Planificación óptima - Considerando restricciones de seguridad y sin considerar redespacho

Finalmente, se presenta el caso mas restrictivo al restringir la potencia de generación a los valores iniciales, sin contar la barra de referencia.

Además, de llevar a cabo las consideraciones de restricciones de seguridad para contingencias del tipo N-1.

Para las mismas partículas, población e iteraciones que en 3.1.1, se alcanza el óptimo alrededor de la iteración 350. Cuyo costo alcanzo los 298 millones de dólares. Como se muestra en la curva de convergencia presentada.

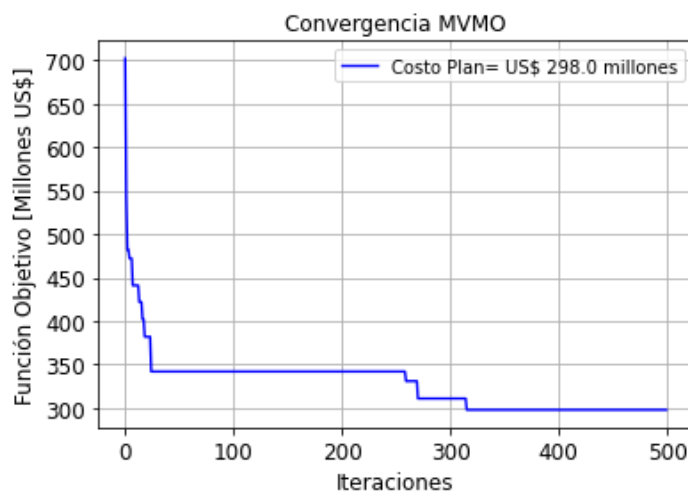


Figura 3.9: Curva de convergencia planificación óptima red de Garver - Considerando restricciones de seguridad y sin considerar redespacho.

El sistema resultante se encuentra presentado a continuación.

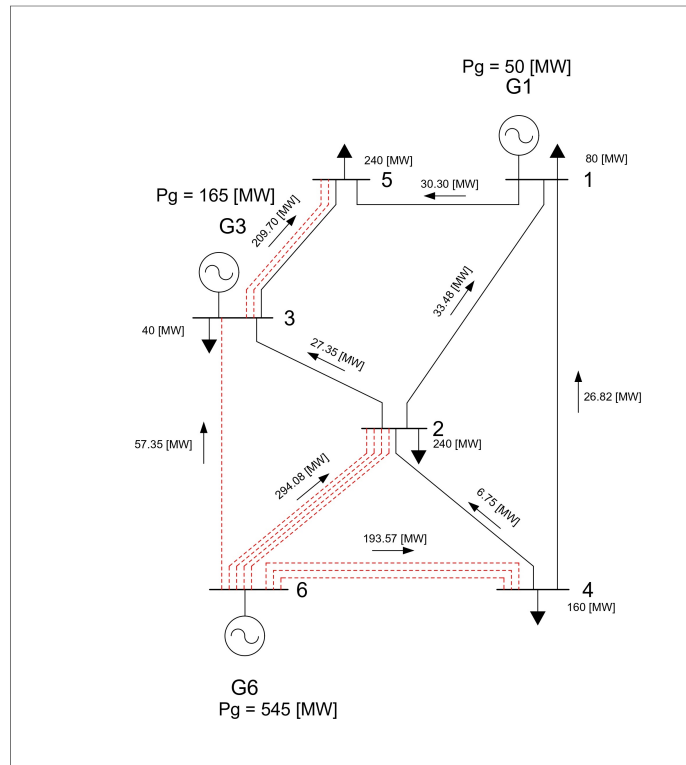


Figura 3.10: Resultados planificación óptima red de Garver - Considerando restricciones de seguridad y sin considerar redespacho.

3.1.5 Planificación óptima - Resumen de resultados

Para los casos simulados y presentados anteriormente en 3.1.1, 3.1.2, 3.1.3 y 3.1.4, se construye la tabla de resultados presentada a continuación.

Donde para el sistema de Garver los casos son definidos como:

Caso 1: Sin Consideraciones de redespacho ni restricciones de seguridad, detallado en la sección 3.1.1.

Caso 2: Considerando redespacho y sin considerar restricciones de seguridad, detallado en la sección 3.1.2.

Caso 3: Considerando redespacho y restricciones de seguridad, detallado en la sección 3.1.3.

Caso 4: Considerando restricciones de seguridad y sin considerar redespacho, detallado en la sección 3.1.4.

Tabla 3.1: Resumen de resultados obtenidos para la red de Garver.

Nombre Líneas	Líneas construidas				Costo unitario [M\$]
	Caso 1	Caso 2	Caso 3	Caso 4	
2-3	0	0	1	0	20
3-5	1	1	2	2	20
2-6	4	0	1	4	30
3-6	0	0	0	1	48
4-6	2	3	3	3	30
Costo total[M\$]	200	110	180	298	

De forma tal que cada uno de los casos estudiados implica realizar un plan de expansión totalmente diferente.

Para verificar la eficacia del algoritmo se obtienen los resultados mediante la biblioteca PYMOO, algoritmo genético, que se corresponden con los obtenidos mediante el algoritmo MVMO.

Los resultados obtenidos también son validados en la literatura disponible para la red de Garver, mediante el análisis comparativo con los resultados presentados en [14]. Donde los resultados coinciden de forma precisa a los presentados en la tabla 3.1.

3.2 SISTEMA IEEE DE 24 BARRAS

El sistema de 24 barras o nodos, propuesto por la IEEE, es un sistema ampliamente utilizado para evaluación de algoritmos de planificación óptima. Este sistema se encuentra compuesto por 24 barras y 41 ramales, [15].

Este sistema ha sido estudiado múltiples veces en la literatura, donde se determinan distintas soluciones óptimas. Mas no se ha demostrado que esas soluciones correspondan al óptimo global, cuando se consideran restricciones de seguridad, según lo detallado en [15].

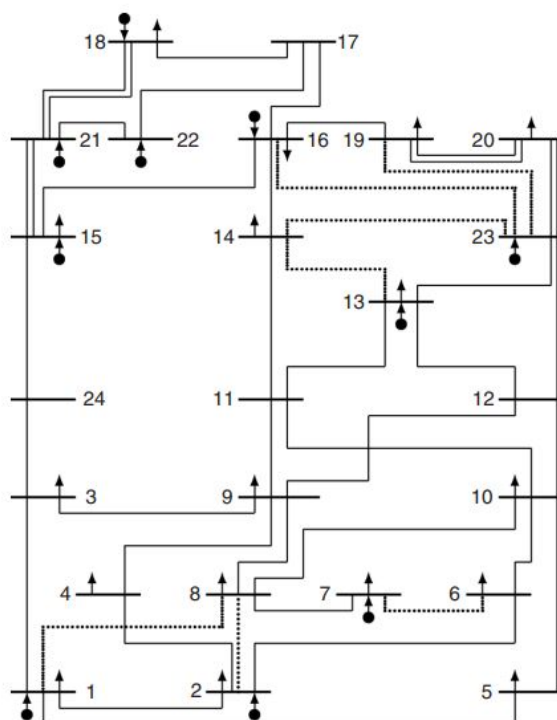


Figura 3.11: Red IEEE de 24 barras, tomado de [14].

Para la solución del problema de planificación solo se consideran la ampliación de los corredores ya existentes al aumentar el número de circuitos hasta un máximo de 3 circuitos por corredor de transmisión para el caso 1 y caso 2. Mientras que para el caso 3 se considerará la adición de nuevas líneas de transmisión caracterizadas adecuadamente en los anexos.

3.2.1 Planificación óptima - Sin considerar restricciones de seguridad

Se somete el sistema de 24 barras de la IEEE al algoritmo de planificación óptima, MVMO, bajo la consideración que no toman en cuenta restricciones de seguridad. Del cual se determina que se deben construir los circuitos que se presentan en la tabla 3.2.

Tabla 3.2: Resultados obtenidos para la red de 24 barras, sin considerar restricciones de seguridad.

Nombre Línea	Líneas nuevas	Costo unitario [M\$]	Costo total [M\$]
6-10	1	16	16
7-8	2	16	32
10-12	1	50	50
14-16	1	54	54
Total [M\$]			152

El gráfica de convergencia del algoritmo MVMO, para el caso expuesto se presenta a continuación.

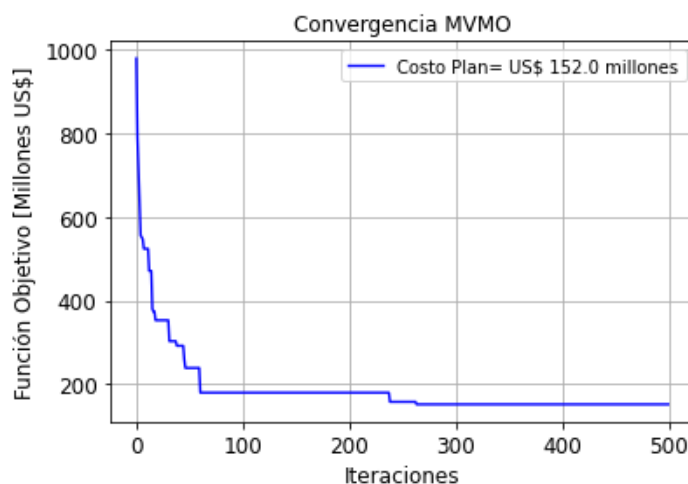


Figura 3.12: Curva de convergencia planificación óptima red de 24 barras - Sin considerar restricciones de seguridad.

Al igual que en el caso de la red de Garver definida en la sección 3.1. Se validan los resultados obtenidos para el sistema de 24 barras. Tal que:

Mediante la utilización de la biblioteca de PYMOO, algoritmo genético, se verifica el funcionamiento del algoritmo al obtener una respuesta idéntica. Además, en [14], se verifica que

los resultados obtenidos para el presente caso coinciden de forma precisa.

3.2.2 Planificación óptima - Considerando restricciones de seguridad

Al considerar restricciones de seguridad el algoritmo logra determinar el valor óptimo en 637 millones de dólares, como se muestra en la gráfica de convergencia en 3.12. Dicho resultado corresponde al utilizar 800 partículas, en 250 iteraciones para una población de 5.

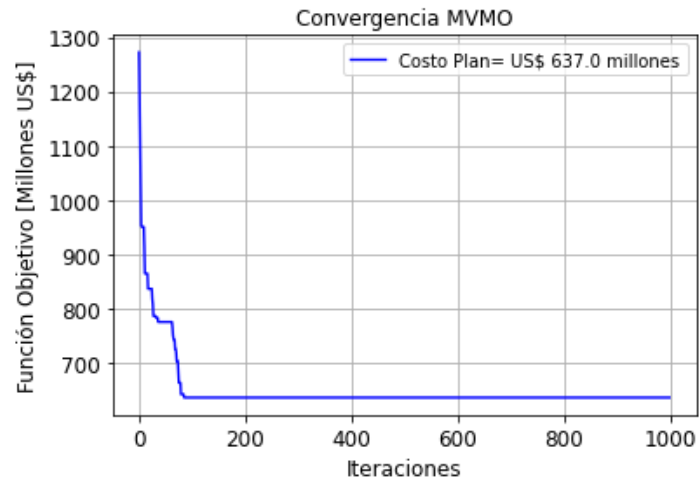


Figura 3.13: Curva de convergencia planificación óptima red de 24 barras - Al considerar restricciones de seguridad.

Dicho plan óptimo se encuentra caracterizado por la construcción de los ramales presentados en la tabla 3.3.

Tabla 3.3: Resultados obtenidos para la red de 24 barras, al considerar restricciones de seguridad.

Nombre línea	Líneas nuevas	Costo unitario [M\$]	Costo total [MW]
1-5	1	22	22
2-4	1	33	33
3-9	2	31	62
6-10	2	16	32
7-8	2	16	32
9-12	1	50	50
10-11	1	50	50
10-12	1	50	50
11-13	1	66	66
12-13	1	66	66
14-16	2	54	108
16-17	1	36	36
20-23	1	30	30
		Total	637

3.2.3 Planificación óptima - Al considerar restricciones de seguridad y la construcción de nuevos corredores

Al considerar la adición de circuitos adicionales en nuevos corredores, se brinda mayor margen de búsqueda al algoritmo. Pero implicando mayor costo de procesamiento para el algoritmo al aumentar el número de variables que intervienen en el problema. Bajo estas consideraciones se obtiene el plan de expansión óptimo en 627 millones de dólares cuando se tiene 400 partículas en 100 iteraciones con una población de 5. La gráfica de convergencia retrata el resultado descrito en 3.14.

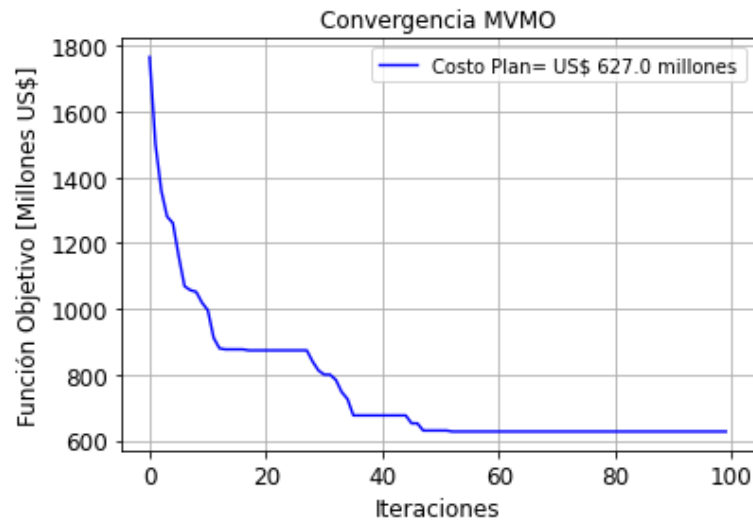


Figura 3.14: Curva de convergencia planificación óptima red de 24 barras - Al considerar restricciones de seguridad y la construcción de nuevos corredores.

Los circuitos determinados para el plan de expansión óptimo descrito se encuentran presentados en la tabla 3.4.

Tabla 3.4: Resultados obtenidos para la red de 24 barras, al considerar restricciones de seguridad y la construcción de nuevos corredores.

Nombre Líneas	Líneas nuevas	Costo unitario [M\$]	Costo total [M\$]
1-5	1	22	22
3-9	2	31	62
4-9	1	27	27
6-10	2	16	32
7-8	2	16	32
9-12	1	50	50
10-11	1	50	50
10-12	1	50	50
11-13	1	66	66
12-13	1	66	66
14-16	1	54	54
14-23	1	86	86
20-23	1	30	30
Total			627

4 CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

4.1 CONCLUSIONES

- La linealización del problema de flujos de potencia permite llevar a cabo la modelación simplificada del problema de optimización del despacho en un sistema eléctrico, que a su vez, a través de una modelación matricial, permite abordar el problema de planificación óptima considerando restricciones de seguridad de forma más práctica al no requerir la precisión y dificultad de la modelación real del flujo de potencia en un sistema eléctrico.
- La modelación matemática realizada permite evitar la utilización de bucles iterativos en el algoritmo implementado. Tanto para la obtención de matrices fundamentales para el cálculo como la Ybarra, la matriz de flujo, definición de contingencias, entre otros. Permitiendo el uso de operaciones vectorizadas, en un entorno paralelo para cada uno de los casos estudiados, contingencias, a través de un código optimizado y de fácil comprensión.
- La utilización de un algoritmo heurístico, el algoritmo de mapeo mediante la media y varianza MVMO, permite evadir el requerimiento de una modelación matemática rígida del problema de planificación, al buscar el plan óptimo mediante la evaluación de posibles planes de expansión en la función objetivo. Función que engloba las restricciones técnicas asociadas al sistema mediante la modelación del flujo óptimo de potencia considerando restricciones de seguridad.
- La consideración de restricciones de seguridad en la optimización de la planificación de la expansión del sistema de transmisión representa un desafío adicional, tanto en su modelación como en su implementación, mas es un requerimiento obligatorio si se desea satisfacer los requerimientos del sistema, considerando que en la realidad no es posible mantener operativos y disponibles todos los sistemas involucrados en la

transmisión de energía.

- La evaluación de la herramienta desarrollada para la solución del problema de planificación de la transmisión eléctrica, basada en el lenguaje de programación Python, es exitosa al verificar los resultados obtenidos, para distintas redes eléctricas, con los planes de expansión de la transmisión disponible en la literatura existente para las redes evaluadas. Destacando la versatilidad introducida para la determinación de múltiples planes de expansión, considerando o no el redespacho de la generación o las restricciones de seguridad.

4.2 RECOMENDACIONES

- En sistemas eléctricos extensos, en cuanto al número de nodos y ramas, no es posible garantizar el óptimo global en cuanto a la solución del problema de planificación de la expansión de los sistemas de transmisión, al contar con un espacio de búsqueda amplio la heurística implementada para la optimización no podrá garantizar su convergencia en el óptimo global. Mas es recomendable, conforme avanza la complejidad del sistema, en tamaño, aumentar el número de partículas y de iteraciones para así encontrar mejores óptimos.
- El problema de planificación óptima de la expansión de la transmisión es un problema en desarrollo que puede ser modelado teniendo en cuenta consideraciones adicionales o distintas a las expuestas en el presente documento. En realidad, la planificación de los sistemas de transmisión se constituye como un problema multidisciplinario que además de las restricciones consideradas en el presente documento relacionadas con las variables técnicas y eléctricas debe considerar las limitantes sociales, medioambientales, tecnológicas, económicas, regulatorias, etc.

5 REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] I. Matulic, «Introducción a los Sistemas Eléctricos de Potencia,» es, *Acta Nova*, vol. 2, n.º 2, págs. 208-215, jun. de 2003, Publisher: Universidad Católica Boliviana, ISSN: 1683-0789. dirección: http://www.scielo.org.bo/scielo.php?script=sci_abstract&pid=S1683-07892003000100005&lng=es&nrm=iso&tlng=es (visitado 13-12-2023).
- [2] L. M. Cruz Moreno, «Optimización del deslastre de carga en un sistema de distribución para mejorar el indicador de calidad SAIDI,» spa, mayo de 2020, Accepted: 2020-06-05T20:57:34Z Publisher: Bogotá - Ingeniería - Maestría en Ingeniería - Ingeniería Eléctrica. dirección: <https://repositorio.unal.edu.co/handle/unal/77619> (visitado 14-12-2023).
- [3] J. A. Caicedo Rivadeneira, «Flujo óptimo de potencia en sistemas eléctricos basado en criterios de mínimas pérdidas de potencia activa usando el método de la gradiente,» spa, Accepted: 2022-03-22T21:52:14Z, bachelorThesis, mar. de 2022. dirección: <http://dspace.ups.edu.ec/handle/123456789/22278> (visitado 14-12-2023).
- [4] S. J. Oliva Henríquez, «Compatibilidad de Métodos de Cálculo de Flujos AC y DC en Sistemas de Potencia,» es, 2008, Accepted: 2012-09-12T18:17:27Z Publisher: Universidad de Chile. dirección: <https://repositorio.uchile.cl/handle/2250/103257> (visitado 14-12-2023).
- [5] J. M. López Lezama y L. A. Gallego Pareja, «Flujo de potencia óptimo con restricciones de seguridad usando un método de punto interior.,» spa, *Scientia et Technica*, vol. 2, n.º 39, págs. 31-36, 2008, Publisher: Universidad Tecnológica de Pereira Section: Scientia et Technica, ISSN: 0122-1701. dirección: <https://dialnet.unirioja.es/servlet/articulo?codigo=4742476> (visitado 15-12-2023).
- [6] V. Flores y W. Almeida, «Índice de Seguridad del Sistema mediante Análisis de Contingencias N-1,» es, *Revista Técnica .energía*, vol. 9, n.º 1, págs. 30-37, ene. de 2013, Number: 1, ISSN: 2602-8492. DOI: 10.37116/revistaenergia.v9.n1.2013.130. direc-

ción: <https://revistaenergia.cenace.gob.ec/index.php/cenace/article/view/130> (visitado 15-12-2023).

- [7] W. M. Villa-Acevedo, J. M. Rodríguez-Serna y J. D. Saldarriaga-Loaiza, «Estimación de Parámetros del Suelo de dos Capas usando el Algoritmo de Optimización de Mapeo Media-Varianza,» es, *Información tecnológica*, vol. 30, n.º 1, págs. 299-310, feb. de 2019, ISSN: 0718-0764. DOI: 10.4067/S0718-07642019000100299. dirección: http://www.scielo.cl/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0718-07642019000100299&lng=en&nrm=iso&tlng=en (visitado 15-12-2023).
- [8] J. L. Rueda e I. Erlich, «Optimal dispatch of reactive power sources by using MV-MOs optimization,» en *2013 IEEE Computational Intelligence Applications in Smart Grid (CIASG)*, ISSN: 2326-7690, abr. de 2013, págs. 29-36. DOI: 10.1109/CIASG.2013.6611495. dirección: <https://ieeexplore.ieee.org/document/6611495> (visitado 15-12-2023).
- [9] W. Vargas Contreras, *Análisis de Funcionamiento de Redes Eléctricas Flujos de Potencia Formulación y Métodos de Solución*, Material no publicado, Curso de Modelación de SEP, EPN, 2022.
- [10] B. O. Nuques Ochoa, «Expansión óptima del sistema nacional de transmisión del Ecuador utilizando algoritmos evolutivos,» spa, Accepted: 2009-09-11T16:03:49Z, bachelorThesis, QUITO/ EPN/ 2008, sep. de 2008. dirección: <http://bibdigital.epn.edu.ec/handle/15000/876> (visitado 15-01-2024).
- [11] J. L. Rueda e I. Erlich, «Optimal dispatch of reactive power sources by using MV-MOs optimization,» en *2013 IEEE Computational Intelligence Applications in Smart Grid (CIASG)*, ISSN: 2326-7690, abr. de 2013, págs. 29-36. DOI: 10.1109/CIASG.2013.6611495. dirección: <https://ieeexplore.ieee.org/document/6611495> (visitado 15-12-2023).
- [12] I. Erlich, *MVMO background*. dirección: <https://www.uni-due.de/mvmo/background>.
- [13] E. G. Morquecho Salto, «Planeamiento de la expansión de sistemas de transmisión usando el modelo AC y algoritmos de estimación de distribución,» spa, Accepted: 2017-11-27T15:43:48Z, bachelorThesis, 2017. dirección: <http://dspace.ucuenca.edu.ec/handle/123456789/28585> (visitado 19-01-2024).
- [14] I. Silva, M. J. Rider, R. Romero, A. Garcia y C. Murari, «Transmission network expansion planning with security constraints,» *Generation, Transmission and Distribu-*

tion, *IEE Proceedings*-, vol. 152, págs. 828-836, dic. de 2005. DOI: 10.1049/ip-gtd:20045217.

- [15] J. A. Sánchez Rodríguez, «Planificación estática de la red eléctrica de transporte mediante algoritmos genéticos,» spa, 2014, Accepted: 2019-05-08T11:32:48Z Publisher: Servicio de Medios Audiovisuales. dirección: <https://digibuo.uniovi.es/dspace/handle/10651/51190> (visitado 21-01-2024).

6 ANEXOS

ANEXO I. Red de 5 barras

- Conjunto de datos red de 5 barras.
- Justificación de la consideración de deslastre de carga en la modelación del problema.

ANEXO II. Red de Garver

- Conjunto de datos red de Garver.
- Resultados problema de planificación óptima.

Caso 1: Sin considerar Redespacho ni restricciones de seguridad

Salida del programa

Análisis de contingencias

Convergencia en PYMOO

Caso 2: Considerando Redespacho sin considerar restricciones de seguridad

Salida del programa

Análisis de contingencias

Convergencia en PYMOO

Caso 3: Sin considerar Redespacho considerando restricciones de seguridad

Salida del programa

Análisis de contingencias

Convergencia en PYMOO

Caso 4: Considerando Redespacho y restricciones de seguridad

Salida del programa

Análisis de contingencias

Convergencia en PYMOO

ANEXO III. Red de 24 barras

- Conjunto de datos red de 24 barras.
- Resultados problema de planificación óptima.

Caso 1: Sin considerar restricciones de seguridad

Salida del programa

Convergencia en PYMOO

Caso 2: Considerando restricciones de seguridad

Salida del programa

Convergencia en PYMOO

Caso 3: Considerando restricciones de seguridad y la construcción de nuevos corredores

Salida del programa

Convergencia en PYMOO

ANEXO I

Datos sistema 5 barras

Datos líneas y transformadores

Tabla I.1: Datos de las ramas de la red de 5 barras.

Barra i	Barra j	Ramas en paralelo	Ramas en paralelo máximas	r [pu]	x [pu]	Potencia Máxima [MW]	Costo por rama [10^3 US\$]
Líneas							
1	2	1	4	0.04	0.25	200	25
1	3	1	4	0.1	0.35	65	10
2	3	1	4	0.08	0.3	200	50
Transformadores							
2	4	1	1	0	0.015	600	50
3	5	1	1	0	0.03	500	30

Datos Generación y carga

Tabla I.2: Datos de los generadores y cargas para la red de 5 barras.

Barra	Potencia generada [MW]	Potencia generada máxima [MW]	Potencia generada mínima [MW]	Potencia de la carga [MW]
1	0	0	0	32
1	0	0	0	32
1	0	0	0	32
1	0	0	0	32
1	0	0	0	32
2	0	0	0	200
3	0	0	0	370
4	500	800	100	0
5	230	800	100	0

Resolución del problema

El sistema descrito anteriormente es modelado para su visualización y posterior análisis dentro de la herramienta de PowerFactory. La siguiente figura ilustra el sistema eléctrico de 5 barras.

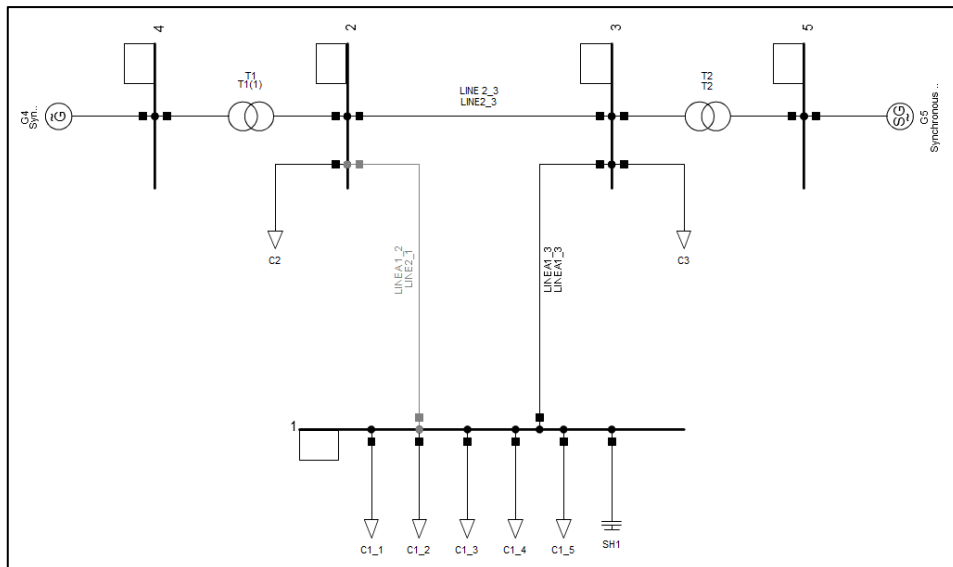


Figura I.1: Red de 5 barras, presentada mediante el uso del software PowerFactory.

Si el sistema es sometido a un problema de optimización para cuando pierde la línea 1-2, mediante el software comercial PowerFactory se determina que el problema es insoluble. Dado que para la pérdida de esa línea de transmisión no existe redespacho capaz de evitar que se superen los límites técnicos, cargabilidad, de los ramales del sistema.

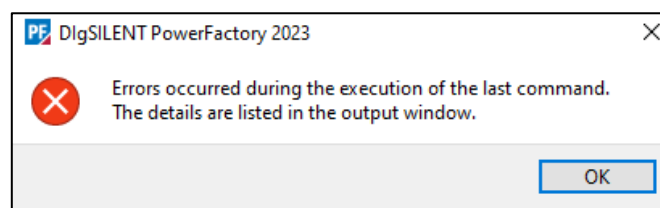


Figura I.2: Mensaje de error obtenido al intentar resolver un problema de flujo óptimo de potencia DC, sin permitir el deslastre de carga, en el software PowerFactory.

De igual forma se presenta la ventana de salida, "output window", de PowerFactory donde especifica que el problema presentado es insoluble.

```
❗ Study Case [Study Case] activated.
❗ Project [5 bus System] activated.
❗ Starting Optimal Power Flow calculation...
❗ Element 'G5' is local reference in separated area of '- 5'
❗ Calculating load flow...
❗ Load flow calculation successful.
❗ Updating 1 Contingencies...
❗ Contingency Cases were updated.
❗ Initialising data for mixed-integer linear program...
❗ Optimisation will be performed with...
❗ ... 2 controls (2 generator-controls; 0 tap-controls; 0 load-controls; 0 scaling-controls)
❗ ... 6 constraints (2 generator-c.; 0 slack-machine-c.; 0 transformer-c.; 4 loading-c.; 0 load-shedding-c.; 0 additional c.; 0 scaling-c.)
❗ ... 1 contingency
❗ Dimension of the coefficient matrix for the corresponding LP formulation: 17 x 2
❗ Calculating data for mixed-integer linear program...
❗ Solving mixed-integer linear program with solver Cbc...
❗ Solver error: model is infeasible
❗ Solving of mixed-integer linear program failed.
❗ Optimisation could not be performed.
```

Figura I.3: Ventana de salida, “*output window*”, obtenido al intentar resolver un problema de flujo óptimo de potencia DC, sin permitir el deslastre de carga, en el software PowerFactory.

ANEXO II

Datos red de Garver

Datos líneas y transformadores

Tabla II.1: Datos de las ramas de la red de Garver.

Barra i	Barra j	Ramas en paralelo	Ramas en paralelo máximas	r [pu]	x [pu]	Potencia Máxima [MW]	Costo por rama [10 ³ US\$]
1	2	1	4	0	0.4	100	40
1	4	1	4	0	0.6	80	60
1	5	1	4	0	0.2	100	20
2	3	1	4	0	0.2	100	20
2	4	1	4	0	0.4	100	40
3	5	1	4	0	0.2	100	20
1	3	0	4	0	0.38	100	38
1	6	0	4	0	0.68	70	68
2	5	0	4	0	0.31	100	31
2	6	0	4	0	0.3	100	30
3	4	0	4	0	0.59	82	59
3	6	0	4	0	0.48	100	48
4	5	0	4	0	0.63	75	63
4	6	0	4	0	0.3	100	30
5	6	0	4	0	0.61	78	61

Datos Generación y carga

Tabla II.2: Datos de los generadores y cargas para la red de Garver.

Barra	Potencia generada [MW]	Potencia generada máxima [MW]	Potencia generada mínima [MW]	Potencia de la carga [MW]
1	50	150	0	80
2	0	0	0	240
3	165	360	0	40
4	0	0	0	160
5	0	0	0	240

6	545	600	0	0
---	-----	-----	---	---

Resultados problema de planificación óptima

Para cada caso se ejemplifica el problema de las contingencias y como afectan al plan de expansión propuesto. El caso 0 corresponde al sistema original sin considerar contingencias.

Sin considerar Redespacho ni restricciones de seguridad

Salida del programa

Al llevar a cabo la ejecución del programa en Python para el caso especificado como salida se obtiene el resumen del plan de expansión.

```

*****
                    ESCUELA POLITÉCNICA NACIONAL
                    Facultad de Ingeniería Eléctrica y Electrónica
                    Trabajo de Integración Curricular
                    Planificación Óptima de la Expansión de Sistemas de Transmisión

Autores: Mario Jínez, Jhon Carvajal
Director: Ing. Walter Vargas Msc.
*****
Tiempo total de ejecución: 0.0 horas, 9.0 minutos, 8.015012264251709 segundos.
=====
|                               Resumen Plan de Expansión                               |
|-----|-----|-----|-----|-----|
|   Desde   |   Hacia   | Corredores Añadidos | Costo Unitario | Costo Total   |
|           |           |                   | (Millones US$) | (Millones US$)|
|-----|-----|-----|-----|-----|
|   bus_3   |   bus_5   |           1.00     |           20.00 |           20.00|
|   bus_2   |   bus_6   |           4.00     |           30.00 |           120.00|
|   bus_4   |   bus_6   |           2.00     |           30.00 |           60.00 |
|-----|-----|-----|-----|-----|
|                                         Total:           |           200.00|
|-----|-----|-----|-----|-----|
Costo despacho Plan de Expansión = 20150.00 $/hr
Costo del Plan de Expansión =200.00 Millones US$

```

Figura II.1: Resumen plan de expansión red de Garver- Sin considerar restricciones de seguridad ni redespacho.

Análisis de contingencias

Bajo las características de la nueva red se presenta el análisis de contingencias obtenido. Con el fin de comprobar las consideraciones tomadas en cuenta para el presente caso.

Costo despacho DCPF = 20150.00 €/hr
 Costo despacho DCOPF = 20150.00 €/hr
 Ahorro despacho DCOPF = 0.00 €/hr
 Costo deslastre DCPF = 0.00 €/hr
 Costo deslastre DCOPF = 0.00 €/hr
 Ahorro deslastre DCOPF = 0.00 €/hr

Resultado Barras Contingencia 0							
Barra	Angulo (deg)		Gen. (MW)		Dem. (MW)		
	PF	DCOPF	PF	DCOPF	PF	DCOPF	
bus_1	-27.08	-27.08	50.00	50.00	80.00	80.00	
bus_2	-15.34	-15.34	-0.00	0.00	240.00	240.00	
bus_3	-22.44	-22.44	165.00	165.00	40.00	40.00	
bus_4	-16.17	-16.17	0.00	0.00	160.00	160.00	
bus_5	-33.15	-33.15	-0.00	0.00	240.00	240.00	
bus_6	0.00	0.00	545.00	545.00	0.00	0.00	
Total:			760.00	760.00	760.00	760.00	

Resultado Líneas Contingencia 0								
Desde	Hacia	PF (MW)		DCOPF (MW)		Cargabilidad (%)		
		Desde	Hacia	Desde	Hacia	PF	DCOPF	
bus_1	bus_2	-51.25	51.25	-51.25	51.25	51.25	51.25	
bus_1	bus_4	-31.75	31.75	-31.75	31.75	39.68	39.68	
bus_1	bus_5	53.00	-53.00	53.00	-53.00	53.00	53.00	
bus_2	bus_3	62.00	-62.00	62.00	-62.00	62.00	62.00	
bus_2	bus_4	3.63	-3.63	3.63	-3.63	3.63	3.63	
bus_3	bus_5	187.00	-187.00	187.00	-187.00	93.50	93.50	
bus_2	bus_6	-356.88	356.88	-356.88	356.88	89.22	89.22	
bus_4	bus_6	-188.12	188.12	-188.12	188.12	94.06	94.06	

Costo despacho DCPF = 20150.00 €/hr
 Costo despacho DCOPF = 19414.73 €/hr
 Ahorro despacho DCOPF = 735.27 €/hr
 Costo deslastre DCPF = 0.00 €/hr
 Costo deslastre DCOPF = 24.51 €/hr
 Ahorro deslastre DCOPF = -24.51 €/hr

Resultado Barras Contingencia 1							
Barra	Angulo (deg)		Gen. (MW)		Dem. (MW)		
	PF	DCOPF	PF	DCOPF	PF	DCOPF	
bus_1	-27.08	-32.31	50.00	50.00	80.00	80.00	
bus_2	-15.34	-14.03	-0.00	0.00	240.00	240.00	
bus_3	-22.44	-22.63	165.00	165.00	40.00	40.00	
bus_4	-16.17	-16.67	0.00	0.00	160.00	160.00	
bus_5	-33.15	-34.08	-0.00	0.00	240.00	215.49	
bus_6	0.00	0.00	545.00	520.49	0.00	0.00	
Total:			760.00	735.49	760.00	735.49	

Resultado Líneas Contingencia 1								
Desde	Hacia	PF (MW)		DCOPF (MW)		Cargabilidad (%)		
		Desde	Hacia	Desde	Hacia	PF	DCOPF	
bus_1	bus_2	-51.25	51.25	0.00	-0.00	51.25	0.00	
bus_1	bus_4	-31.75	31.75	-45.49	45.49	39.68	56.86	
bus_1	bus_5	53.00	-53.00	15.49	-15.49	53.00	15.49	
bus_2	bus_3	62.00	-62.00	75.00	-75.00	62.00	75.00	
bus_2	bus_4	3.63	-3.63	11.52	-11.52	3.63	11.52	
bus_3	bus_5	187.00	-187.00	200.00	-200.00	93.50	100.00	
bus_2	bus_6	-356.88	356.88	-326.52	326.52	89.22	81.63	
bus_4	bus_6	-188.12	188.12	-193.97	193.97	94.06	96.99	

Costo despacho DCPF = 20150.00 €/hr
 Costo despacho DCOPF = 20100.00 €/hr
 Ahorro despacho DCOPF = 50.00 €/hr
 Costo deslastre DCPF = 0.00 €/hr
 Costo deslastre DCOPF = 1.67 €/hr
 Ahorro deslastre DCOPF = -1.67 €/hr

Resultado Barras Contingencia 2							
Barra	Angulo (deg)		Gen. (MW)		Dem. (MW)		
	PF	DCOPF	PF	DCOPF	PF	DCOPF	
bus_1	-27.08	-31.81	50.00	50.00	80.00	80.00	
bus_2	-15.34	-16.15	-0.00	0.00	240.00	240.00	
bus_3	-22.44	-24.74	165.00	165.00	40.00	40.00	
bus_4	-16.17	-14.40	0.00	0.00	160.00	160.00	
bus_5	-33.15	-36.20	-0.00	0.00	240.00	238.33	
bus_6	0.00	0.00	545.00	543.33	0.00	0.00	
Total:			760.00	758.33	760.00	758.33	

Resultado Líneas Contingencia 2								
Desde	Hacia	PF (MW)		DCOPF (MW)		Cargabilidad (%)		
		Desde	Hacia	Desde	Hacia	PF	DCOPF	
bus_1	bus_2	-51.25	51.25	-68.33	68.33	51.25	68.33	
bus_1	bus_4	-31.75	31.75	0.00	-0.00	39.68	0.00	
bus_1	bus_5	53.00	-53.00	38.33	-38.33	53.00	38.33	
bus_2	bus_3	62.00	-62.00	75.00	-75.00	62.00	75.00	
bus_2	bus_4	3.63	-3.63	-7.60	7.60	3.63	7.60	
bus_3	bus_5	187.00	-187.00	200.00	-200.00	93.50	100.00	
bus_2	bus_6	-356.88	356.88	-375.73	375.73	89.22	93.93	
bus_4	bus_6	-188.12	188.12	-167.60	167.60	94.06	83.80	

Costo despacho DCPF = 20150.00 €/hr
 Costo despacho DCOPF = 18950.00 €/hr
 Ahorro despacho DCOPF = 1200.00 €/hr
 Costo deslastre DCPF = 0.00 €/hr
 Costo deslastre DCOPF = 40.00 €/hr
 Ahorro deslastre DCOPF = -40.00 €/hr

Resultado Barras Contingencia 3							
Barra	Angulo (deg)		Gen. (MW)		Dem. (MW)		
	PF	DCOPF	PF	DCOPF	PF	DCOPF	
bus_1	-27.08	-18.61	50.00	50.00	80.00	80.00	
bus_2	-15.34	-14.38	-0.00	0.00	240.00	240.00	
bus_3	-22.44	-22.97	165.00	165.00	40.00	40.00	
bus_4	-16.17	-14.64	0.00	0.00	160.00	160.00	
bus_5	-33.15	-34.43	-0.00	0.00	240.00	200.00	
bus_6	0.00	0.00	545.00	505.00	0.00	0.00	
Total:			760.00	720.00	760.00	720.00	

Resultado Líneas Contingencia 3								
Desde	Hacia	PF (MW)		DCOPF (MW)		Cargabilidad (%)		
		Desde	Hacia	Desde	Hacia	PF	DCOPF	
bus_1	bus_2	-51.25	51.25	-18.46	18.46	51.25	18.46	
bus_1	bus_4	-31.75	31.75	-11.54	11.54	39.68	14.42	
bus_1	bus_5	53.00	-53.00	0.00	-0.00	53.00	0.00	
bus_2	bus_3	62.00	-62.00	75.00	-75.00	62.00	75.00	
bus_2	bus_4	3.63	-3.63	1.15	-1.15	3.63	1.15	
bus_3	bus_5	187.00	-187.00	200.00	-200.00	93.50	100.00	
bus_2	bus_6	-356.88	356.88	-334.62	334.62	89.22	83.65	
bus_4	bus_6	-188.12	188.12	-170.38	170.38	94.06	85.19	

Costo despacho DCPF = 20150.00 €/hr
 Costo despacho DCOFP = 19700.00 €/hr
 Ahorro despacho DCOFP = 450.00 €/hr
 Costo deslastre DCPF = 0.00 €/hr
 Costo deslastre DCOFP = 15.00 €/hr
 Ahorro deslastre DCOFP = -15.00 €/hr

Resultado Barras Contingencia 4							
Barra	Angulo (deg)		Gen. (MW)		Dem. (MW)		
	PF	DCOFP	PF	DCOFP	PF	DCOFP	
bus_1	-27.08	-33.23	50.00	50.00	80.00	80.00	
bus_2	-15.34	-14.33	-0.00	0.00	240.00	240.00	
bus_3	-22.44	-37.53	165.00	165.00	40.00	40.00	
bus_4	-16.17	-16.88	0.00	0.00	160.00	160.00	
bus_5	-33.15	-44.69	-0.00	0.00	240.00	225.00	
bus_6	0.00	0.00	545.00	530.00	0.00	0.00	
Total:			760.00	745.00	760.00	745.00	

Resultado Líneas Contingencia 4							
Desde	Hacia	PF (MW)		DCOFP (MW)		Cargabilidad (%)	
		Desde	Hacia	Desde	Hacia	PF	DCOFP
bus_1	bus_2	-51.25	51.25	-82.45	82.45	51.25	82.45
bus_1	bus_4	-31.75	31.75	-47.55	47.55	39.68	59.44
bus_1	bus_5	53.00	-53.00	100.00	-100.00	53.00	100.00
bus_2	bus_3	62.00	-62.00	0.00	-0.00	62.00	0.00
bus_2	bus_4	3.63	-3.63	11.12	-11.12	3.63	11.12
bus_3	bus_5	187.00	-187.00	125.00	-125.00	93.50	62.50
bus_2	bus_6	-356.88	356.88	-333.57	333.57	89.22	83.39
bus_4	bus_6	-188.12	188.12	-196.43	196.43	94.06	98.22

Costo despacho DCPF = 20150.00 €/hr
 Costo despacho DCOFP = 20150.00 €/hr
 Ahorro despacho DCOFP = 0.00 €/hr
 Costo deslastre DCPF = 0.00 €/hr
 Costo deslastre DCOFP = 0.00 €/hr
 Ahorro deslastre DCOFP = 0.00 €/hr

Resultado Barras Contingencia 5							
Barra	Angulo (deg)		Gen. (MW)		Dem. (MW)		
	PF	DCOFP	PF	DCOFP	PF	DCOFP	
bus_1	-27.08	-27.06	50.00	50.00	80.00	80.00	
bus_2	-15.34	-15.21	-0.00	0.00	240.00	240.00	
bus_3	-22.44	-22.36	165.00	165.00	40.00	40.00	
bus_4	-16.17	-16.41	0.00	0.00	160.00	160.00	
bus_5	-33.15	-33.09	-0.00	0.00	240.00	240.00	
bus_6	0.00	0.00	545.00	545.00	0.00	0.00	
Total:			760.00	760.00	760.00	760.00	

Resultado Líneas Contingencia 5							
Desde	Hacia	PF (MW)		DCOFP (MW)		Cargabilidad (%)	
		Desde	Hacia	Desde	Hacia	PF	DCOFP
bus_1	bus_2	-51.25	51.25	-51.68	51.68	51.25	51.68
bus_1	bus_4	-31.75	31.75	-30.97	30.97	39.68	38.71
bus_1	bus_5	53.00	-53.00	52.65	-52.65	53.00	52.65
bus_2	bus_3	62.00	-62.00	62.35	-62.35	62.00	62.35
bus_2	bus_4	3.63	-3.63	0.00	-0.00	3.63	0.00
bus_3	bus_5	187.00	-187.00	187.35	-187.35	93.50	93.67
bus_2	bus_6	-356.88	356.88	-354.03	354.03	89.22	88.51
bus_4	bus_6	-188.12	188.12	-190.97	190.97	94.06	95.48

Costo despacho DCPF = 20150.00 €/hr
 Costo despacho DCOPF = 16351.74 €/hr
 Ahorro despacho DCOPF = 3798.26 €/hr
 Costo deslastre DCPF = 0.00 €/hr
 Costo deslastre DCOPF = 126.61 €/hr
 Ahorro deslastre DCOPF = -126.61 €/hr

Resultado Barras Contingencia 6							
Barra	Angulo (deg)		Gen. (MW)		Dem. (MW)		
	PF	DCOPF	PF	DCOPF	PF	DCOPF	
bus_1	-27.08	-18.13	50.00	50.00	80.00	80.00	
bus_2	-15.34	-11.08	-0.00	0.00	240.00	240.00	
bus_3	-22.44	-8.21	165.00	165.00	40.00	40.00	
bus_4	-16.17	-13.81	0.00	0.00	160.00	160.00	
bus_5	-33.15	-19.67	-0.00	0.00	240.00	113.39	
bus_6	0.00	0.00	545.00	418.39	0.00	0.00	
Total:			760.00	633.39	760.00	633.39	

Resultado Líneas Contingencia 6							
Desde	Hacia	PF (MW)		DCOPF (MW)		Cargabilidad (%)	
		Desde	Hacia	Desde	Hacia	PF	DCOPF
bus_1	bus_2	-51.25	51.25	-30.80	30.80	51.25	30.80
bus_1	bus_4	-31.75	31.75	-12.59	12.59	39.68	15.73
bus_1	bus_5	53.00	-53.00	13.39	-13.39	53.00	13.39
bus_2	bus_3	62.00	-62.00	-25.00	25.00	62.00	25.00
bus_2	bus_4	3.63	-3.63	11.92	-11.92	3.63	11.92
bus_3	bus_5	187.00	-187.00	100.00	-100.00	93.50	50.00
bus_2	bus_6	-356.88	356.88	-257.73	257.73	89.22	64.43
bus_4	bus_6	-188.12	188.12	-160.66	160.66	94.06	80.33

Costo despacho DCPF = 20150.00 €/hr
 Costo despacho DCOPF = 18675.05 €/hr
 Ahorro despacho DCOPF = 1474.95 €/hr
 Costo deslastre DCPF = 0.00 €/hr
 Costo deslastre DCOPF = 49.16 €/hr
 Ahorro deslastre DCOPF = -49.16 €/hr

Resultado Barras Contingencia 7							
Barra	Angulo (deg)		Gen. (MW)		Dem. (MW)		
	PF	DCOPF	PF	DCOPF	PF	DCOPF	
bus_1	-27.08	-28.61	50.00	50.00	80.00	80.00	
bus_2	-15.34	-17.19	-0.00	0.00	240.00	190.84	
bus_3	-22.44	-24.16	165.00	165.00	40.00	40.00	
bus_4	-16.17	-16.83	0.00	0.00	160.00	160.00	
bus_5	-33.15	-34.81	-0.00	0.00	240.00	240.00	
bus_6	0.00	0.00	545.00	495.84	0.00	0.00	
Total:			760.00	710.84	760.00	710.84	

Resultado Líneas Contingencia 7							
Desde	Hacia	PF (MW)		DCOPF (MW)		Cargabilidad (%)	
		Desde	Hacia	Desde	Hacia	PF	DCOPF
bus_1	bus_2	-51.25	51.25	-49.85	49.85	51.25	49.85
bus_1	bus_4	-31.75	31.75	-34.27	34.27	39.68	42.84
bus_1	bus_5	53.00	-53.00	54.12	-54.12	53.00	54.12
bus_2	bus_3	62.00	-62.00	60.88	-60.88	62.00	60.88
bus_2	bus_4	3.63	-3.63	-1.56	1.56	3.63	1.56
bus_3	bus_5	187.00	-187.00	185.88	-185.88	93.50	92.94
bus_2	bus_6	-356.88	356.88	-300.00	300.00	89.22	75.00
bus_4	bus_6	-188.12	188.12	-195.84	195.84	94.06	97.92

```

Costo despacho DCPF = 20150.00 €/hr
Costo despacho DCOPF = 17661.82 €/hr
Ahorro despacho DCOPF = 2488.18 €/hr
Costo deslastre DCPF = 0.00 €/hr
Costo deslastre DCOPF = 82.94 €/hr
Ahorro deslastre DCOPF = -82.94 €/hr

```

Resultado Barras Contingencia 8							
Barra	Angulo (deg)		Gen. (MW)		Dem. (MW)		
	PF	DCOPF	PF	DCOPF	PF	DCOPF	
bus_1	-27.08	-27.52	50.00	50.00	80.00	80.00	
bus_2	-15.34	-15.56	-0.00	0.00	240.00	240.00	
bus_3	-22.44	-22.75	165.00	165.00	40.00	40.00	
bus_4	-16.17	-17.19	0.00	0.00	160.00	77.06	
bus_5	-33.15	-33.51	-0.00	0.00	240.00	240.00	
bus_6	0.00	0.00	545.00	462.06	0.00	0.00	
Total:			760.00	677.06	760.00	677.06	

Resultado Líneas Contingencia 8							
Desde	Hacia	PF (MW)		DCOPF (MW)		Cargabilidad (%)	
		Desde	Hacia	Desde	Hacia	PF	DCOPF
bus_1	bus_2	-51.25	51.25	-52.19	52.19	51.25	52.19
bus_1	bus_4	-31.75	31.75	-30.05	30.05	39.68	37.57
bus_1	bus_5	53.00	-53.00	52.25	-52.25	53.00	52.25
bus_2	bus_3	62.00	-62.00	62.75	-62.75	62.00	62.75
bus_2	bus_4	3.63	-3.63	7.11	-7.11	3.63	7.11
bus_3	bus_5	187.00	-187.00	187.75	-187.75	93.50	93.88
bus_2	bus_6	-356.88	356.88	-362.06	362.06	89.22	90.52
bus_4	bus_6	-188.12	188.12	-100.00	100.00	94.06	50.00

Figura II.2: Análisis de contingencias - Sin considerar restricciones de seguridad ni redespacho.

Convergencia en PYMOO

Como se mencionó anteriormente se comprueba la eficacia del algoritmo al utilizar un algoritmo desarrollado de forma externa, en una de las bibliotecas disponibles en Python. Específicamente PYMOO mediante el algoritmo genético.

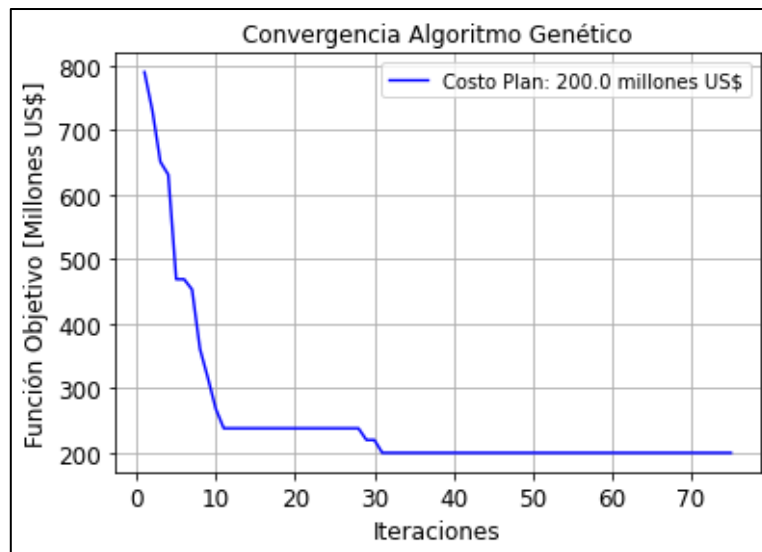


Figura II.3: Validación mediante PYMOO - Sin considerar restricciones de seguridad ni redespacho.

Considerando Redespacho sin considerar restricciones de seguridad

Salida del programa

Al llevar a cabo la ejecución del programa en Python para el caso especificado como salida se obtiene el resumen del plan de expansión.

```

*****
                ESCUELA POLITÉCNICA NACIONAL
                Facultad de Ingeniería Eléctrica y Electrónica
                Trabajo de Integración Curricular
                Planificación Óptima de la Expansión de Sistemas de Transmisión

Autores: Mario Jínez, Jhon Carvajal
Director: Ing. Walter Vargas Msc.
*****
Tiempo total de ejecución: 0.0 horas, 9.0 minutos, 11.904212474822998 segundos.
=====
|                               Resumen Plan de Expansión                               |
=====
      Desde      Hacia      Corredores Añadidos      Costo Unitario      Costo Total
      -----      -----      -----      (Millones US$)      (Millones US$)
      bus_3      bus_5      1.00      20.00      20.00
      bus_4      bus_6      3.00      30.00      90.00
                                          Total:      110.00

Costo despacho Plan de Expansión = 16678.79 $/hr
Costo del Plan de Expansión =110.00 Millones US$

```

Figura II.4: Resumen plan de expansión red de Garver- Sin considerar restricciones de seguridad y considerando redespacho.

Análisis de contingencias

Bajo las características de la nueva red se presenta el análisis de contingencias obtenido. Con el fin de comprobar las consideraciones tomadas en cuenta para el presente caso.

```

Costo despacho DCPF = 20150.00 €/hr
Costo despacho DCOPF = 15300.00 €/hr
Ahorro despacho DCOPF = 4850.00 €/hr
Costo deslastre DCPF = 0.00 €/hr
Costo deslastre DCOPF = 70.00 €/hr
Ahorro deslastre DCOPF = -70.00 €/hr
=====
|                               Resultado Barras                               |
|                               Contingencia 0                               |
=====
      Barra      Angulo (deg)      Gen. (MW)      Dem. (MW)
      -----      -----      -----      -----
      PF      DCOPF      PF      DCOPF      PF      DCOPF
      bus_1      -82.29      -33.36      50.00      150.00      80.00      80.00
      bus_2      -85.42      -40.11      -0.00      0.00      240.00      177.03
      bus_3      -86.57      -34.66      165.00      240.00      40.00      40.00
      bus_4      -31.23      -17.19      0.00      0.00      160.00      152.97
      bus_5      -94.31      -43.39      0.00      0.00      240.00      240.00
      bus_6      0.00      0.00      545.00      300.00      0.00      0.00
                                          Total:      760.00      690.00      760.00      690.00
=====
|                               Resultado Líneas                               |
|                               Contingencia 0                               |
=====
      Desde      Hacia      PF (MW)      DCOPF (MW)      Cargabilidad (%)
      -----      -----      -----      -----      -----
      PF      DCOPF      Desde      Hacia      Desde      Hacia      PF      DCOPF
      bus_1      bus_2      13.64      -13.64      29.46      -29.46      13.64      29.46
      bus_1      bus_4      -148.55      148.55      -47.03      47.03      185.68      58.78
      bus_1      bus_5      104.91      -104.91      87.57      -87.57      104.91      87.57
      bus_2      bus_3      10.09      -10.09      -47.57      47.57      10.09      47.57
      bus_2      bus_4      -236.45      236.45      -100.00      100.00      236.45      100.00
      bus_3      bus_5      135.09      -135.09      152.43      -152.43      67.55      76.22
      bus_4      bus_6      -545.00      545.00      -300.00      300.00      181.67      100.00

```

Costo despacho DCPF = 20150.00 €/hr
 Costo despacho DCOFP = 15000.00 €/hr
 Ahorro despacho DCOFP = 5150.00 €/hr
 Costo deslastre DCPF = 0.00 €/hr
 Costo deslastre DCOFP = 80.00 €/hr
 Ahorro deslastre DCOFP = -80.00 €/hr

Resultado Barras Contingencia 1							
Barra	Angulo (deg)		Gen. (MW)		Dem. (MW)		
	PF	DCOFP	PF	DCOFP	PF	DCOFP	
bus_1	-82.29	-26.93	50.00	150.00	80.00	80.00	
bus_2	-85.42	-39.53	-0.00	0.00	240.00	180.00	
bus_3	-86.57	-30.37	165.00	240.00	40.00	20.00	
bus_4	-31.23	-16.62	0.00	0.00	160.00	160.00	
bus_5	-94.31	-38.39	0.00	0.00	240.00	240.00	
bus_6	0.00	0.00	545.00	290.00	0.00	0.00	
Total:			760.00	680.00	760.00	680.00	

Resultado Líneas Contingencia 1							
Desde	Hacia	PF (MW)		DCOFP (MW)		Cargabilidad (%)	
		Desde	Hacia	Desde	Hacia	PF	DCOFP
bus_1	bus_2	13.64	-13.64	0.00	-0.00	13.64	0.00
bus_1	bus_4	-148.55	148.55	-30.00	30.00	185.68	37.50
bus_1	bus_5	104.91	-104.91	100.00	-100.00	104.91	100.00
bus_2	bus_3	10.09	-10.09	-80.00	80.00	10.09	80.00
bus_2	bus_4	-236.45	236.45	-100.00	100.00	236.45	100.00
bus_3	bus_5	135.09	-135.09	140.00	-140.00	67.55	70.00
bus_4	bus_6	-545.00	545.00	-290.00	290.00	181.67	96.67

Costo despacho DCPF = 20150.00 €/hr
 Costo despacho DCOFP = 14100.00 €/hr
 Ahorro despacho DCOFP = 6050.00 €/hr
 Costo deslastre DCPF = 0.00 €/hr
 Costo deslastre DCOFP = 110.00 €/hr
 Ahorro deslastre DCOFP = -110.00 €/hr

Resultado Barras Contingencia 2							
Barra	Angulo (deg)		Gen. (MW)		Dem. (MW)		
	PF	DCOFP	PF	DCOFP	PF	DCOFP	
bus_1	-82.29	-35.01	50.00	150.00	80.00	80.00	
bus_2	-85.42	-37.82	-0.00	0.00	240.00	170.00	
bus_3	-86.57	-31.19	165.00	240.00	40.00	0.00	
bus_4	-31.23	-14.90	0.00	0.00	160.00	160.00	
bus_5	-94.31	-41.63	0.00	0.00	240.00	240.00	
bus_6	0.00	0.00	545.00	260.00	0.00	0.00	
Total:			760.00	650.00	760.00	650.00	

Resultado Líneas Contingencia 2							
Desde	Hacia	PF (MW)		DCOFP (MW)		Cargabilidad (%)	
		Desde	Hacia	Desde	Hacia	PF	DCOFP
bus_1	bus_2	13.64	-13.64	12.22	-12.22	13.64	12.22
bus_1	bus_4	-148.55	148.55	0.00	-0.00	185.68	0.00
bus_1	bus_5	104.91	-104.91	57.78	-57.78	104.91	57.78
bus_2	bus_3	10.09	-10.09	-57.78	57.78	10.09	57.78
bus_2	bus_4	-236.45	236.45	-100.00	100.00	236.45	100.00
bus_3	bus_5	135.09	-135.09	182.22	-182.22	67.55	91.11
bus_4	bus_6	-545.00	545.00	-260.00	260.00	181.67	86.67

Costo despacho DCPF = 20150.00 €/hr
 Costo despacho DCOPF = 14460.00 €/hr
 Ahorro despacho DCOPF = 5690.00 €/hr
 Costo deslastre DCPF = 0.00 €/hr
 Costo deslastre DCOPF = 98.00 €/hr
 Ahorro deslastre DCOPF = -98.00 €/hr

Resultado Barras Contingencia 3							
Barra	Angulo (deg)		Gen. (MW)		Dem. (MW)		
	PF	DCOPF	PF	DCOPF	PF	DCOPF	
bus_1	-82.29	-19.71	50.00	150.00	80.00	80.00	
bus_2	-85.42	-38.50	-0.00	0.00	240.00	182.00	
bus_3	-86.57	-38.50	165.00	240.00	40.00	40.00	
bus_4	-31.23	-15.58	0.00	0.00	160.00	160.00	
bus_5	-94.31	-49.96	0.00	0.00	240.00	200.00	
bus_6	0.00	0.00	545.00	272.00	0.00	0.00	
Total:			760.00	662.00	760.00	662.00	

Resultado Líneas Contingencia 3							
Desde	Hacia	PF (MW)		DCOPF (MW)		Cargabilidad (%)	
		Desde	Hacia	Desde	Hacia	PF	DCOPF
bus_1	bus_2	13.64	-13.64	82.00	-82.00	13.64	82.00
bus_1	bus_4	-148.55	148.55	-12.00	12.00	185.68	15.00
bus_1	bus_5	104.91	-104.91	0.00	-0.00	104.91	0.00
bus_2	bus_3	10.09	-10.09	0.00	-0.00	10.09	0.00
bus_2	bus_4	-236.45	236.45	-100.00	100.00	236.45	100.00
bus_3	bus_5	135.09	-135.09	200.00	-200.00	67.55	100.00
bus_4	bus_6	-545.00	545.00	-272.00	272.00	181.67	90.67

Costo despacho DCPF = 20150.00 €/hr
 Costo despacho DCOPF = 14940.00 €/hr
 Ahorro despacho DCOPF = 5210.00 €/hr
 Costo deslastre DCPF = 0.00 €/hr
 Costo deslastre DCOPF = 82.00 €/hr
 Ahorro deslastre DCOPF = -82.00 €/hr

Resultado Barras Contingencia 4							
Barra	Angulo (deg)		Gen. (MW)		Dem. (MW)		
	PF	DCOPF	PF	DCOPF	PF	DCOPF	
bus_1	-82.29	-26.13	50.00	150.00	80.00	80.00	
bus_2	-85.42	-39.42	-0.00	0.00	240.00	158.00	
bus_3	-86.57	-19.25	165.00	240.00	40.00	40.00	
bus_4	-31.23	-16.50	0.00	0.00	160.00	160.00	
bus_5	-94.31	-30.71	0.00	0.00	240.00	240.00	
bus_6	0.00	0.00	545.00	288.00	0.00	0.00	
Total:			760.00	678.00	760.00	678.00	

Resultado Líneas Contingencia 4							
Desde	Hacia	PF (MW)		DCOPF (MW)		Cargabilidad (%)	
		Desde	Hacia	Desde	Hacia	PF	DCOPF
bus_1	bus_2	13.64	-13.64	58.00	-58.00	13.64	58.00
bus_1	bus_4	-148.55	148.55	-28.00	28.00	185.68	35.00
bus_1	bus_5	104.91	-104.91	40.00	-40.00	104.91	40.00
bus_2	bus_3	10.09	-10.09	0.00	-0.00	10.09	0.00
bus_2	bus_4	-236.45	236.45	-100.00	100.00	236.45	100.00
bus_3	bus_5	135.09	-135.09	200.00	-200.00	67.55	100.00
bus_4	bus_6	-545.00	545.00	-288.00	288.00	181.67	96.00


```

*****
                ESCUELA POLITÉCNICA NACIONAL
                Facultad de Ingeniería Eléctrica y Electrónica
                Trabajo de Integración Curricular
                Planificación Óptima de la Expansión de Sistemas de Transmisión

Autores: Mario Jínez, Jhon Carvajal
Director: Ing. Walter Vargas Msc.
*****
Tiempo total de ejecución: 1.0 horas, 43.0 minutos, 7.9710564613342285 segundos.
*****
                Resumen Plan de Expansión
*****
                Desde                Hacia                Corredores Añadidos                Costo Unitario
                (Millones US$)                Costo Total
                (Millones US$)
-----
                bus_3                bus_5                2.00                20.00                40.00
                bus_2                bus_6                4.00                30.00                120.00
                bus_3                bus_6                1.00                48.00                48.00
                bus_4                bus_6                3.00                30.00                90.00
                Total:                298.00

Costo despacho Plan de Expansión = 20150.00 $/hr
Costo del Plan de Expansión =298.00 Millones US$

```

Figura II.7: Resumen plan de expansión red de Garver- Sin considerar redespacho y considerando restricciones de seguridad.

Análisis de contingencias

Bajo las características de la nueva red se presenta el análisis de contingencias obtenido. Con el fin de comprobar las consideraciones tomadas en cuenta para el presente caso.

```

Costo despacho DCPF = 20150.00 €/hr
Costo despacho DCOPF = 20150.00 €/hr
Ahorro despacho DCOPF = 0.00 €/hr
Costo deslastre DCPF = 0.00 €/hr
Costo deslastre DCOPF = 0.00 €/hr
Ahorro deslastre DCOPF = 0.00 €/hr
*****
                Resultado Barras
                Contingencia 0
*****
                Barra                Angulo (deg)                Gen. (MW)                Dem. (MW)
                PF                DCOPF                PF                DCOPF                PF                DCOPF
-----
                bus_1                -20.31                -20.31                50.00                50.00                80.00                80.00
                bus_2                -12.64                -12.64                -0.00                0.00                240.00                240.00
                bus_3                -15.77                -15.77                165.00                165.00                40.00                40.00
                bus_4                -11.09                -11.09                -0.00                0.00                160.00                160.00
                bus_5                -23.78                -23.78                -0.00                0.00                240.00                240.00
                bus_6                0.00                0.00                545.00                545.00                0.00                0.00
                Total:                760.00                760.00                760.00                760.00
*****
                Resultado Líneas
                Contingencia 0
*****
                Desde                Hacia                PF (MW)                DCOPF (MW)                Cargabilidad (%)
                Desde                Hacia                Desde                Hacia                PF                DCOPF
-----
                bus_1                bus_2                -33.48                33.48                -33.48                33.48                33.48                33.48
                bus_1                bus_4                -26.82                26.82                -26.82                26.82                33.52                33.52
                bus_1                bus_5                30.30                -30.30                30.30                -30.30                30.30                30.30
                bus_2                bus_3                27.35                -27.35                27.35                -27.35                27.35                27.35
                bus_2                bus_4                -6.75                6.75                -6.75                6.75                6.75                6.75
                bus_3                bus_5                209.70                -209.70                209.70                -209.70                69.90                69.90
                bus_2                bus_6                -294.08                294.08                -294.08                294.08                73.52                73.52
                bus_3                bus_6                -57.35                57.35                -57.35                57.35                57.35                57.35
                bus_4                bus_6                -193.57                193.57                -193.57                193.57                64.52                64.52

```



```

*****
                ESCUELA POLITÉCNICA NACIONAL
                Facultad de Ingeniería Eléctrica y Electrónica
                Trabajo de Integración Curricular
                Planificación Óptima de la Expansión de Sistemas de Transmisión

Autores: Mario Jinez, Jhon Carvajal
Director: Ing. Walter Vargas Msc.
*****
Tiempo total de ejecución: 1.0 horas, 29.0 minutos, 9.792815923690796 segundos.
=====
|                               Resumen Plan de Expansión                               |
|-----|-----|-----|-----|-----|
| Desde      |      Hacia      | Corredores Añadidos | Costo Unitario | Costo Total   |
|            |                 |                    | (Millones US$) | (Millones US$)|
|-----|-----|-----|-----|-----|
| bus_2      | bus_3           | 1.00                | 20.00           | 20.00         |
| bus_3      | bus_5           | 2.00                | 20.00           | 40.00         |
| bus_2      | bus_6           | 1.00                | 30.00           | 30.00         |
| bus_4      | bus_6           | 3.00                | 30.00           | 90.00         |
|            |                 |                    |                 | Total:        |
|            |                 |                    |                 | 180.00       |
=====
Costo despacho Plan de Expansión = 16320.69 $/hr
Costo del Plan de Expansión =180.00 Millones US$

```

Figura II.10: Resumen plan de expansión red de Garver- Considerando redespacho y restricciones de seguridad.

Análisis de contingencias

Bajo las características de la nueva red se presenta el análisis de contingencias obtenido. Con el fin de comprobar las consideraciones tomadas en cuenta para el presente caso.

```

Costo despacho DCPF = 20150.00 €/hr
Costo despacho DCOPF = 16320.69 €/hr
Ahorro despacho DCOPF = 3829.31 €/hr
Costo deslastre DCPF = 0.00 €/hr
Costo deslastre DCOPF = 0.00 €/hr
Ahorro deslastre DCOPF = 0.00 €/hr
=====
|                               Resultado Barras                               |
|                               Contingencia 0                               |
|-----|-----|-----|-----|-----|
| Barra      | Angulo (deg) | Gen. (MW) | Dem. (MW) |              |
|            | PF           | DCOPF     | PF         | DCOPF        |
|-----|-----|-----|-----|-----|
| bus_1      | -42.53      | -9.73     | 50.00     | 150.00       |
| bus_2      | -38.74      | -14.51    | -0.00     | 0.00         |
| bus_3      | -42.07      | -7.88     | 165.00    | 347.93       |
| bus_4      | -18.31      | -10.18    | -0.00     | 0.00         |
| bus_5      | -49.06      | -15.22    | 0.00      | 0.00         |
| bus_6      | 0.00        | 0.00     | 545.00    | 262.07       |
|            |             |           |           |             |
| Total:     |             |           |           |             |
|            |             |           |           |             |
|-----|-----|-----|-----|-----|
|                               Resultado líneas                               |
|                               Contingencia 0                               |
|-----|-----|-----|-----|-----|
| Desde      |      Hacia      | PF (MW)   | DCOPF (MW)  | Cargabilidad (%) |
|            |                 | Desde     | Hacia        | Desde             | Hacia        | PF           | DCOPF        |
|-----|-----|-----|-----|-----|-----|
| bus_1      | bus_2           | -16.52    | 16.52        | 20.85             | -20.85       | 16.52        | 20.85        |
| bus_1      | bus_4           | -70.45    | 70.45        | 1.29              | -1.29        | 88.06        | 1.61         |
| bus_1      | bus_5           | 56.97     | -56.97       | 47.86             | -47.86       | 56.97        | 47.86        |
| bus_2      | bus_3           | 58.03     | -58.03       | -115.79           | 115.79       | 29.01        | 57.89        |
| bus_2      | bus_4           | -89.15    | 89.15        | -18.92            | 18.92        | 89.15        | 18.92        |
| bus_3      | bus_5           | 183.03    | -183.03      | 192.14            | -192.14      | 61.01        | 64.05        |
| bus_2      | bus_6           | -225.40   | 225.40       | -84.44            | 84.44        | 225.40       | 84.44        |
| bus_4      | bus_6           | -319.60   | 319.60       | -177.63           | 177.63       | 106.53       | 59.21        |
|-----|-----|-----|-----|-----|

```

Costo despacho DCPF = 20150.00 €/hr
 Costo despacho DCOPF = 16320.69 €/hr
 Ahorro despacho DCOPF = 3829.31 €/hr
 Costo deslastre DCPF = 0.00 €/hr
 Costo deslastre DCOPF = 0.00 €/hr
 Ahorro deslastre DCOPF = 0.00 €/hr

Resultado Barras Contingencia 1							
Barra	Angulo (deg)		Gen. (MW)		Dem. (MW)		
	PF	DCOPF	PF	DCOPF	PF	DCOPF	
bus_1	-42.53	-7.29	50.00	150.00	80.00	80.00	
bus_2	-38.74	-15.08	-0.00	0.00	240.00	240.00	
bus_3	-42.07	-7.62	165.00	347.93	40.00	40.00	
bus_4	-18.31	-9.99	-0.00	0.00	160.00	160.00	
bus_5	-49.06	-14.42	0.00	0.00	240.00	240.00	
bus_6	0.00	0.00	545.00	262.07	0.00	0.00	
Total:			760.00	760.00	760.00	760.00	

Resultado Líneas Contingencia 1							
Desde	Hacia	PF (MW)		DCOPF (MW)		Cargabilidad (%)	
		Desde	Hacia	Desde	Hacia	PF	DCOPF
bus_1	bus_2	-16.52	16.52	0.00	-0.00	16.52	0.00
bus_1	bus_4	-70.45	70.45	7.84	-7.84	88.06	9.80
bus_1	bus_5	56.97	-56.97	62.16	-62.16	56.97	62.16
bus_2	bus_3	58.03	-58.03	-130.09	130.09	29.01	65.04
bus_2	bus_4	-89.15	89.15	-22.20	22.20	89.15	22.20
bus_3	bus_5	183.03	-183.03	177.84	-177.84	61.01	59.28
bus_2	bus_6	-225.40	225.40	-87.71	87.71	225.40	87.71
bus_4	bus_6	-319.60	319.60	-174.35	174.35	106.53	58.12

Costo despacho DCPF = 20150.00 €/hr
 Costo despacho DCOPF = 16320.69 €/hr
 Ahorro despacho DCOPF = 3829.31 €/hr
 Costo deslastre DCPF = 0.00 €/hr
 Costo deslastre DCOPF = 0.00 €/hr
 Ahorro deslastre DCOPF = 0.00 €/hr

Resultado Barras Contingencia 2							
Barra	Angulo (deg)		Gen. (MW)		Dem. (MW)		
	PF	DCOPF	PF	DCOPF	PF	DCOPF	
bus_1	-42.53	-9.48	50.00	150.00	80.00	80.00	
bus_2	-38.74	-14.40	-0.00	0.00	240.00	240.00	
bus_3	-42.07	-7.73	165.00	347.93	40.00	40.00	
bus_4	-18.31	-10.21	-0.00	0.00	160.00	160.00	
bus_5	-49.06	-15.04	0.00	0.00	240.00	240.00	
bus_6	0.00	0.00	545.00	262.07	0.00	0.00	
Total:			760.00	760.00	760.00	760.00	

Resultado Líneas Contingencia 2							
Desde	Hacia	PF (MW)		DCOPF (MW)		Cargabilidad (%)	
		Desde	Hacia	Desde	Hacia	PF	DCOPF
bus_1	bus_2	-16.52	16.52	21.47	-21.47	16.52	21.47
bus_1	bus_4	-70.45	70.45	0.00	-0.00	88.06	0.00
bus_1	bus_5	56.97	-56.97	48.53	-48.53	56.97	48.53
bus_2	bus_3	58.03	-58.03	-116.46	116.46	29.01	58.23
bus_2	bus_4	-89.15	89.15	-18.28	18.28	89.15	18.28
bus_3	bus_5	183.03	-183.03	191.47	-191.47	61.01	63.82
bus_2	bus_6	-225.40	225.40	-83.79	83.79	225.40	83.79
bus_4	bus_6	-319.60	319.60	-178.28	178.28	106.53	59.43

Costo despacho DCPF = 20150.00 €/hr
 Costo despacho DCOPF = 16320.69 €/hr
 Ahorro despacho DCOPF = 3829.31 €/hr
 Costo deslastre DCPF = 0.00 €/hr
 Costo deslastre DCOPF = 0.00 €/hr
 Ahorro deslastre DCOPF = 0.00 €/hr

Resultado Barras Contingencia 3							
Barra	Angulo (deg)		Gen. (MW)		Dem. (MW)		
	PF	DCOPF	PF	DCOPF	PF	DCOPF	
bus_1	-42.53	-3.79	50.00	150.00	80.00	80.00	
bus_2	-38.74	-15.88	-0.00	0.00	240.00	240.00	
bus_3	-42.07	-11.99	165.00	347.93	40.00	40.00	
bus_4	-18.31	-9.72	-0.00	0.00	160.00	160.00	
bus_5	-49.06	-21.16	0.00	0.00	240.00	240.00	
bus_6	0.00	0.00	545.00	262.07	0.00	0.00	
Total:			760.00	760.00	760.00	760.00	

Resultado Líneas Contingencia 3							
Desde	Hacia	PF (MW)		DCOPF (MW)		Cargabilidad (%)	
		Desde	Hacia	Desde	Hacia	PF	DCOPF
bus_1	bus_2	-16.52	16.52	52.76	-52.76	16.52	52.76
bus_1	bus_4	-70.45	70.45	17.24	-17.24	88.06	21.55
bus_1	bus_5	56.97	-56.97	0.00	-0.00	56.97	0.00
bus_2	bus_3	58.03	-58.03	-67.93	67.93	29.01	33.97
bus_2	bus_4	-89.15	89.15	-26.90	26.90	89.15	26.90
bus_3	bus_5	183.03	-183.03	240.00	-240.00	61.01	80.00
bus_2	bus_6	-225.40	225.40	-92.41	92.41	225.40	92.41
bus_4	bus_6	-319.60	319.60	-169.66	169.66	106.53	56.55

Costo despacho DCPF = 20150.00 €/hr
 Costo despacho DCOPF = 16320.69 €/hr
 Ahorro despacho DCOPF = 3829.31 €/hr
 Costo deslastre DCPF = 0.00 €/hr
 Costo deslastre DCOPF = 0.00 €/hr
 Ahorro deslastre DCOPF = 0.00 €/hr

Resultado Barras Contingencia 4							
Barra	Angulo (deg)		Gen. (MW)		Dem. (MW)		
	PF	DCOPF	PF	DCOPF	PF	DCOPF	
bus_1	-42.53	-7.77	50.00	150.00	80.00	80.00	
bus_2	-38.74	-14.97	-0.00	0.00	240.00	240.00	
bus_3	-42.07	-3.51	165.00	347.93	40.00	40.00	
bus_4	-18.31	-10.03	-0.00	0.00	160.00	160.00	
bus_5	-49.06	-11.45	0.00	0.00	240.00	240.00	
bus_6	0.00	0.00	545.00	262.07	0.00	0.00	
Total:			760.00	760.00	760.00	760.00	

Resultado Líneas Contingencia 4							
Desde	Hacia	PF (MW)		DCOPF (MW)		Cargabilidad (%)	
		Desde	Hacia	Desde	Hacia	PF	DCOPF
bus_1	bus_2	-16.52	16.52	31.38	-31.38	16.52	31.38
bus_1	bus_4	-70.45	70.45	6.55	-6.55	88.06	8.19
bus_1	bus_5	56.97	-56.97	32.07	-32.07	56.97	32.07
bus_2	bus_3	58.03	-58.03	-100.00	100.00	29.01	50.00
bus_2	bus_4	-89.15	89.15	-21.55	21.55	89.15	21.55
bus_3	bus_5	183.03	-183.03	207.93	-207.93	61.01	69.31
bus_2	bus_6	-225.40	225.40	-87.07	87.07	225.40	87.07
bus_4	bus_6	-319.60	319.60	-175.00	175.00	106.53	58.33

Costo despacho DCPF = 20150.00 €/hr
 Costo despacho DCOPF = 16320.69 €/hr
 Ahorro despacho DCOPF = 3829.31 €/hr
 Costo deslastre DCPF = 0.00 €/hr
 Costo deslastre DCOPF = 0.00 €/hr
 Ahorro deslastre DCOPF = 0.00 €/hr

Resultado Barras Contingencia 5							
Barra	Angulo (deg)		Gen. (MW)		Dem. (MW)		
	PF	DCOPF	PF	DCOPF	PF	DCOPF	
bus_1	-42.53	-11.20	50.00	150.00	80.00	80.00	
bus_2	-38.74	-16.67	-0.00	0.00	240.00	240.00	
bus_3	-42.07	-9.85	165.00	347.93	40.00	40.00	
bus_4	-18.31	-9.46	-0.00	0.00	160.00	160.00	
bus_5	-49.06	-17.06	0.00	0.00	240.00	240.00	
bus_6	0.00	0.00	545.00	262.07	0.00	0.00	
Total:			760.00	760.00	760.00	760.00	

Resultado Líneas Contingencia 5								
Desde	Hacia	PF (MW)		DCOPF (MW)		Cargabilidad (%)		
		Desde	Hacia	Desde	Hacia	PF	DCOPF	
bus_1	bus_2	-16.52	16.52	23.89	-23.89	16.52	23.89	
bus_1	bus_4	-70.45	70.45	-5.06	5.06	88.06	6.33	
bus_1	bus_5	56.97	-56.97	51.17	-51.17	56.97	51.17	
bus_2	bus_3	58.03	-58.03	-119.10	119.10	29.01	59.55	
bus_2	bus_4	-89.15	89.15	0.00	-0.00	89.15	0.00	
bus_3	bus_5	183.03	-183.03	188.83	-188.83	61.01	62.94	
bus_2	bus_6	-225.40	225.40	-97.00	97.00	225.40	97.00	
bus_4	bus_6	-319.60	319.60	-165.06	165.06	106.53	55.02	

Costo despacho DCPF = 20150.00 €/hr
 Costo despacho DCOPF = 16320.69 €/hr
 Ahorro despacho DCOPF = 3829.31 €/hr
 Costo deslastre DCPF = 0.00 €/hr
 Costo deslastre DCOPF = 0.00 €/hr
 Ahorro deslastre DCOPF = 0.00 €/hr

Resultado Barras Contingencia 6							
Barra	Angulo (deg)		Gen. (MW)		Dem. (MW)		
	PF	DCOPF	PF	DCOPF	PF	DCOPF	
bus_1	-42.53	-10.93	50.00	150.00	80.00	80.00	
bus_2	-38.74	-14.24	-0.00	0.00	240.00	240.00	
bus_3	-42.07	-7.05	165.00	347.93	40.00	40.00	
bus_4	-18.31	-10.27	-0.00	0.00	160.00	160.00	
bus_5	-49.06	-17.51	0.00	0.00	240.00	240.00	
bus_6	0.00	0.00	545.00	262.07	0.00	0.00	
Total:			760.00	760.00	760.00	760.00	

Resultado Líneas Contingencia 6								
Desde	Hacia	PF (MW)		DCOPF (MW)		Cargabilidad (%)		
		Desde	Hacia	Desde	Hacia	PF	DCOPF	
bus_1	bus_2	-16.52	16.52	14.45	-14.45	16.52	14.45	
bus_1	bus_4	-70.45	70.45	-1.91	1.91	88.06	2.39	
bus_1	bus_5	56.97	-56.97	57.47	-57.47	56.97	57.47	
bus_2	bus_3	58.03	-58.03	-125.40	125.40	29.01	62.70	
bus_2	bus_4	-89.15	89.15	-17.32	17.32	89.15	17.32	
bus_3	bus_5	183.03	-183.03	182.53	-182.53	61.01	60.84	
bus_2	bus_6	-225.40	225.40	-82.84	82.84	225.40	82.84	
bus_4	bus_6	-319.60	319.60	-179.23	179.23	106.53	59.74	

Costo despacho DCPF = 20150.00 €/hr
 Costo despacho DCOPF = 16320.69 €/hr
 Ahorro despacho DCOPF = 3829.31 €/hr
 Costo deslastre DCPF = 0.00 €/hr
 Costo deslastre DCOPF = 0.00 €/hr
 Ahorro deslastre DCOPF = 0.00 €/hr

Resultado Barras Contingencia 7							
Barra	Angulo (deg)		Gen. (MW)		Dem. (MW)		
	PF	DCOPF	PF	DCOPF	PF	DCOPF	
bus_1	-42.53	-24.32	50.00	150.00	80.00	80.00	
bus_2	-38.74	-32.21	-0.00	0.00	240.00	240.00	
bus_3	-42.07	-24.72	165.00	347.93	40.00	40.00	
bus_4	-18.31	-15.02	-0.00	0.00	160.00	160.00	
bus_5	-49.06	-31.50	0.00	0.00	240.00	240.00	
bus_6	0.00	0.00	545.00	262.07	0.00	0.00	
Total:			760.00	760.00	760.00	760.00	

Resultado Líneas Contingencia 7								
Desde	Hacia	PF (MW)		DCOPF (MW)		Cargabilidad (%)		
		Desde	Hacia	Desde	Hacia	PF	DCOPF	
bus_1	bus_2	-16.52	16.52	34.41	-34.41	16.52	34.41	
bus_1	bus_4	-70.45	70.45	-27.06	27.06	88.06	33.83	
bus_1	bus_5	56.97	-56.97	62.65	-62.65	56.97	62.65	
bus_2	bus_3	58.03	-58.03	-130.58	130.58	29.01	65.29	
bus_2	bus_4	-89.15	89.15	-75.01	75.01	89.15	75.01	
bus_3	bus_5	183.03	-183.03	177.35	-177.35	61.01	59.12	
bus_2	bus_6	-225.40	225.40	0.00	-0.00	225.40	0.00	
bus_4	bus_6	-319.60	319.60	-262.07	262.07	106.53	87.36	

Costo despacho DCPF = 20150.00 €/hr
 Costo despacho DCOPF = 16320.69 €/hr
 Ahorro despacho DCOPF = 3829.31 €/hr
 Costo deslastre DCPF = 0.00 €/hr
 Costo deslastre DCOPF = 0.00 €/hr
 Ahorro deslastre DCOPF = 0.00 €/hr

Resultado Barras Contingencia 8							
Barra	Angulo (deg)		Gen. (MW)		Dem. (MW)		
	PF	DCOPF	PF	DCOPF	PF	DCOPF	
bus_1	-42.53	-12.32	50.00	150.00	80.00	80.00	
bus_2	-38.74	-16.65	-0.00	0.00	240.00	240.00	
bus_3	-42.07	-10.14	165.00	347.93	40.00	40.00	
bus_4	-18.31	-14.20	-0.00	0.00	160.00	160.00	
bus_5	-49.06	-17.56	0.00	0.00	240.00	240.00	
bus_6	0.00	0.00	545.00	262.07	0.00	0.00	
Total:			760.00	760.00	760.00	760.00	

Resultado Líneas Contingencia 8								
Desde	Hacia	PF (MW)		DCOPF (MW)		Cargabilidad (%)		
		Desde	Hacia	Desde	Hacia	PF	DCOPF	
bus_1	bus_2	-16.52	16.52	18.86	-18.86	16.52	18.86	
bus_1	bus_4	-70.45	70.45	5.46	-5.46	88.06	6.82	
bus_1	bus_5	56.97	-56.97	45.68	-45.68	56.97	45.68	
bus_2	bus_3	58.03	-58.03	-113.62	113.62	29.01	56.81	
bus_2	bus_4	-89.15	89.15	-10.68	10.68	89.15	10.68	
bus_3	bus_5	183.03	-183.03	194.32	-194.32	61.01	64.77	
bus_2	bus_6	-225.40	225.40	-96.85	96.85	225.40	96.85	
bus_4	bus_6	-319.60	319.60	-165.22	165.22	106.53	55.07	

Figura II.11: Análisis de contingencias - Considerando redespacho y restricciones de seguridad.

Convergencia en PYMOO

Se verifica la validez del algoritmo para el caso especificado mediante la utilización de la librería PYMOO en Python.

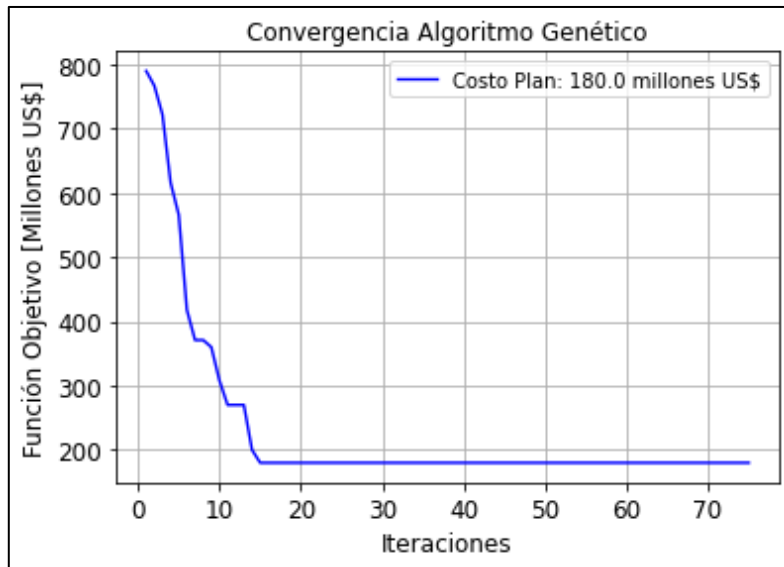


Figura II.12: Validación mediante PYMOO - Considerando redespacho y restricciones de seguridad.

ANEXO III

Datos red IEEE 24 barras

Datos líneas y transformadores

Tabla III.1: Datos de las ramas de la red de 24 barras.

Barra i	Barra j	Ramas en paralelo	Ramas en paralelo máximas	r [pu]	x [pu]	Potencia Máxima [MW]	Costo por rama [10 ³ US\$]
1	2	1	3	0.0026	0.0139	175	3
1	3	1	3	0.0546	0.2112	175	55
1	5	1	3	0.0218	0.0845	175	22
2	4	1	3	0.0338	0.1267	175	33
2	6	1	3	0.0497	0.1920	175	50
3	9	1	3	0.0308	0.1190	175	31
3	24	1	3	0.0023	0.0839	400	50
4	9	1	3	0.0268	0.1037	175	27
5	10	1	3	0.0228	0.0883	175	23
6	10	1	3	0.0139	0.0605	175	16
7	8	1	3	0.0159	0.0614	175	16
8	9	1	3	0.0427	0.1651	175	43
8	10	1	3	0.0427	0.1651	175	43
9	11	1	3	0.0023	0.0839	400	50
9	12	1	3	0.0023	0.0839	400	50
10	11	1	3	0.0023	0.0839	400	50
10	12	1	3	0.0023	0.0839	400	50
11	13	1	3	0.0061	0.0476	500	66
11	14	1	3	0.0054	0.0418	500	58
12	13	1	3	0.0061	0.0476	500	66
12	23	1	3	0.0124	0.0966	500	134
13	23	1	3	0.0111	0.0865	500	120
14	16	1	3	0.0050	0.0389	500	54
15	16	1	3	0.0022	0.0173	500	24
15	21	2	3	0.0063	0.0490	500	68
15	24	1	3	0.0067	0.0519	500	72
16	17	1	3	0.0033	0.0259	500	36

16	19	1	3	0.0030	0.0231	500	32
17	18	1	3	0.0018	0.0144	500	20
17	22	1	3	0.0135	0.1053	500	146
18	21	2	3	0.0033	0.0259	500	36
19	20	2	3	0.0051	0.0396	500	55
20	23	2	3	0.0028	0.0216	500	30
21	22	1	3	0.0087	0.0678	500	94

Tabla III.2: Datos de las ramas nuevas de la red de 24 barras.

Barra i	Barra j	Ramas en paralelo	Ramas en paralelo máximas	r [pu]	x [pu]	Potencia Máxima [MW]	Costo por rama [10 ³ US\$]
1	8	0	3	0.0348	0.1344	175	35
2	8	0	3	0.0328	0.1267	175	33
6	7	0	3	0.0497	0.1920	175	50
13	14	0	3	0.0057	0.0447	500	62
14	23	0	3	0.0080	0.0620	500	86
16	23	0	3	0.0105	0.0822	500	114
19	23	0	3	0.0078	0.0606	500	84

Datos Generación y carga

Tabla III.3: Datos de los generadores y cargas para la red de 24 barras.

Barra	Potencia generada [MW]	Potencia generada máxima [MW]	Potencia generada mínima [MW]	Potencia de la carga [MW]
1	576	576	0	324
2	576	576	0	391
3	0	0	0	540
4	0	0	0	222
5	0	0	0	213
6	0	0	0	408
7	900	900	0	375
8	0	0	0	513
9	0	0	0	525

10	0	0	0	585
11	0	0	0	0
12	0	0	0	0
13	1773	1773	0	795
14	0	0	0	582
15	645	645	0	951
16	465	465	0	300
17	0	0	0	0
18	1200	1200	0	999
19	0	0	0	543
20	0	0	0	384
21	1200	1200	0	0
22	900	900	0	0
23	315	1980	0	0
24	0	0	0	0

Resultados problema de planificación óptima

Sin considerar restricciones de seguridad

Salida del programa

Al llevar a cabo la ejecución del programa en Python para el caso especificado como salida se obtiene el resumen del plan de expansión.

```

*****
                          ESCUELA POLITÉCNICA NACIONAL
                          Facultad de Ingeniería Eléctrica y Electrónica
                          Trabajo de Integración Curricular
                          Planificación Óptima de la Expansión de Sistemas de Transmisión

Autores: Mario Jinez, Jhon Carvajal
Director: Ing. Walter Vargas Msc.
*****
Tiempo total de ejecución: 0.0 horas, 19.0 minutos, 5.931891441345215 segundos.
=====
|                               Resumen Plan de Expansión                               |
=====
|
|-----|-----|-----|-----|-----|
| Desde   |   Hacia   | Corredores Añadidos | Costo Unitario | Costo Total   |
|-----|-----|-----|-----|-----|
|         |         |         | (Millones US$) | (Millones US$) |
|-----|-----|-----|-----|-----|
| bus_6   | bus_10    | 1.00      | 16.00           | 16.00         |
| bus_7   | bus_8     | 2.00      | 16.00           | 32.00         |
| bus_10  | bus_12    | 1.00      | 50.00           | 50.00         |
| bus_14  | bus_16    | 1.00      | 54.00           | 54.00         |
|         |         |         |         | Total: 152.00 |
|-----|-----|-----|-----|-----|
Costo despacho Plan de Expansión = 109572.66 $/hr
Costo del Plan de Expansión =152.00 Millones US$

```

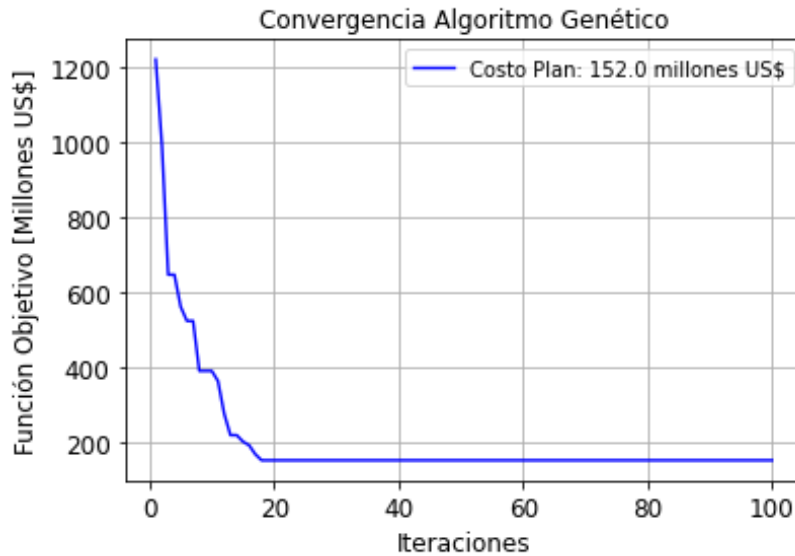



Figura III.2: Validación mediante PYMOO - Sin considerar restricciones de seguridad.

Al considerar restricciones de seguridad

Salida del programa

Al llevar a cabo la ejecución del programa en Python para el caso especificado como salida se obtiene el resumen del plan de expansión.

```

*****
                ESCUELA POLITÉCNICA NACIONAL
                Facultad de Ingeniería Eléctrica y Electrónica
                Trabajo de Integración Curricular
                Planificación Óptima de la Expansión de Sistemas de Transmisión

Autores: Mario Jinez, Jhon Carvajal
Director: Ing. Walter Vargas Msc.
*****
Tiempo total de ejecución: 32.0 horas, 53.0 minutos, 14.600193500518799 segundos.
=====
|                               Resumen Plan de Expansión                               |
=====
Desde      Hacia      Corredores Añadidos      Costo Unitario      Costo Total
(Millones US$)      (Millones US$)
-----
bus_1      bus_5      1.00      22.00      22.00
bus_2      bus_4      1.00      33.00      33.00
bus_3      bus_9      2.00      31.00      62.00
bus_6      bus_10     2.00      16.00      32.00
bus_7      bus_8      2.00      16.00      32.00
bus_9      bus_12     1.00      50.00      50.00
bus_10     bus_11     1.00      50.00      50.00
bus_10     bus_12     1.00      50.00      50.00
bus_11     bus_13     1.00      66.00      66.00
bus_12     bus_13     1.00      66.00      66.00
bus_14     bus_16     2.00      54.00      108.00
bus_16     bus_17     1.00      36.00      36.00
bus_20     bus_23     1.00      30.00      30.00
Total:      637.00

Costo despacho Plan de Expansión = 115914.25 $/hr
Costo del Plan de Expansión =637.00 Millones US$

```

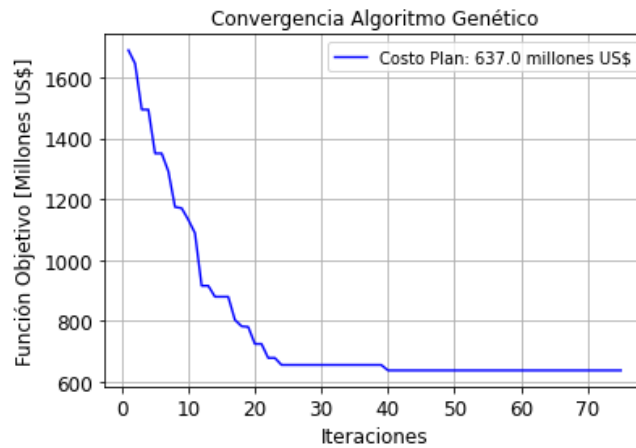



Figura III.4: Validación mediante PYMOO - Al considerar restricciones de seguridad.

Al considerar restricciones de seguridad y la construcción de nuevos corredores

Salida del programa

Al llevar a cabo la ejecución del programa en Python para el caso especificado como salida se obtiene el resumen del plan de expansión.

```

*****
                          ESCUELA POLITÉCNICA NACIONAL
                          Facultad de Ingeniería Eléctrica y Electrónica
                          Trabajo de Integración Curricular
                          Planificación Óptima de la Expansión de Sistemas de Transmisión

Autores: Mario Jinez, Jhon Carvajal
Director: Ing. Walter Vargas Msc.
*****
Tiempo total de ejecución: 5.0 horas, 58.0 minutos, 34.08101749420166 segundos.
=====
                          Resumen Plan de Expansión
=====

```

Desde	Hacia	Corredores Añadidos	Costo Unitario (Millones US\$)	Costo Total (Millones US\$)
bus_1	bus_5	1.00	22.00	22.00
bus_3	bus_9	2.00	31.00	62.00
bus_4	bus_9	1.00	27.00	27.00
bus_6	bus_10	2.00	16.00	32.00
bus_7	bus_8	2.00	16.00	32.00
bus_9	bus_12	1.00	50.00	50.00
bus_10	bus_11	1.00	50.00	50.00
bus_10	bus_12	1.00	50.00	50.00
bus_11	bus_13	1.00	66.00	66.00
bus_12	bus_13	1.00	66.00	66.00
bus_14	bus_16	1.00	54.00	54.00
bus_14	bus_23	1.00	86.00	86.00
bus_20	bus_23	1.00	30.00	30.00
Total:				627.00

```

Costo despacho Plan de Expansión = 114521.88 $/hr
Costo del Plan de Expansión =627.00 Millones US$

```

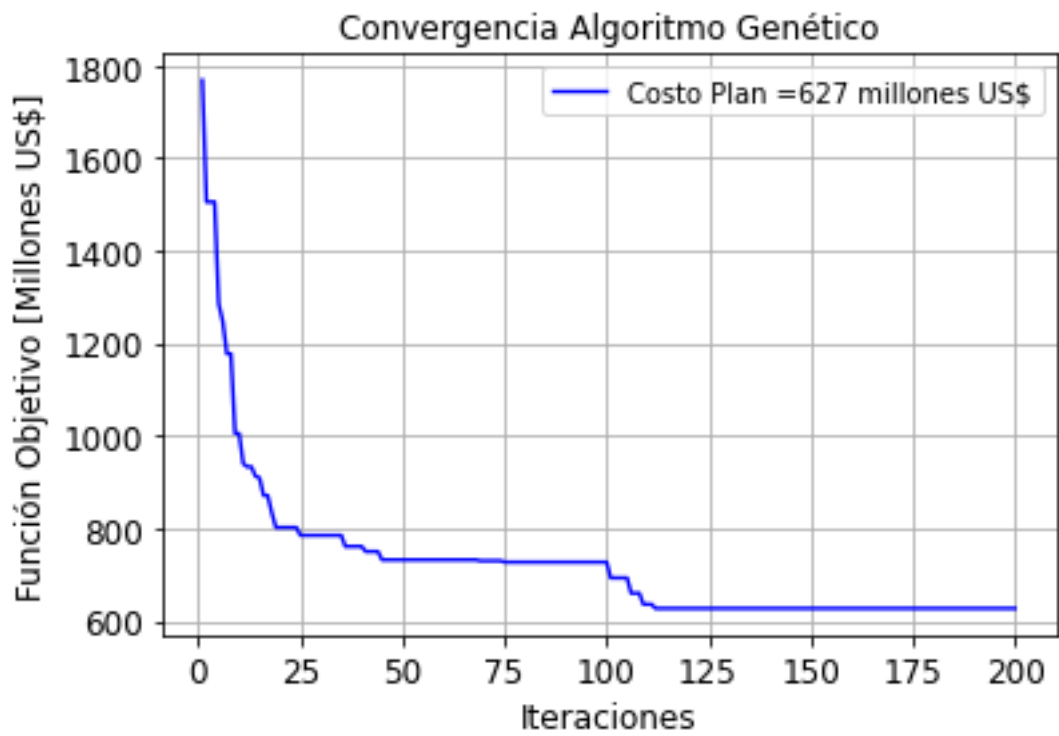



Figura III.6: Validación mediante PYMOO - Al considerar restricciones de seguridad y la construcción de nuevos corredores.