

UCUENCA

Facultad de Ingeniería

Carrera de Ingeniería Eléctrica

Planeamiento Estático de la Expansión del Sistema de Transmisión utilizando enlaces de Corriente Directa

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

Modalidad: Artículo académico

Autor:

Jorge Esteban Idrovo Quilambaqui
CI: 0104654876
jorge.ei15@hotmail.com

Director:

Ing. Santiago Patricio Torres Contreras, PhD.
C.I.: 0102448958
santiago.torres@ucuenca.edu.ec

Cuenca - Ecuador

16-Junio-2022

Resumen:

En los últimos años, la transmisión de corriente directa de alto voltaje (HVDC) se ha vuelto viable técnica y económicamente, a tal punto que se desarrollan redes HVDC integradas a los sistemas de corriente alterna (AC). Sin embargo, solamente pocos trabajos de investigación abordan la Planificación de la Expansión de Redes de Transmisión (PET) considerando tanto redes AC como DC. Para desarrollar el PET AC/DC se requiere de modelos precisos que describan el comportamiento de las líneas de transmisión y sus convertidores asociados en DC. En este trabajo se plantea desarrollar una formulación y un método heurístico de optimización para resolver el PET AC/DC basado en el modelo no-convexo. La implementación se la realiza en Julia usando sistemas de prueba AC muy conocidos: Garver 6-buses e IEEE 24-buses, y sistemas de prueba híbridos: Garver AC/DC, sistema de 14 buses AC/DC, y sistema de 39 buses AC/DC.

Palabras clave: Heurísticas. HVDC. Optimización. Planeamiento de la expansión del Sistema de Transmisión. Redes AC/DC.

Abstract:

In recent years, high voltage direct current (HVDC) transmission has become technically and economically feasible, to the point that HVDC networks integrated with alternating current (AC) systems are being developed. However, only few research works address Transmission Expansion Planning (TEP) considering both AC and DC networks. To develop an AC/DC TEP, precise models are required that describe the behavior of the transmission lines and their associated converter stations in DC. In this work, it is proposed a formulation and an optimization heuristic method to solve the AC/DC TEP based on the non-convex model. The implementation is performed in Julia using well-known AC test systems: Garver 6-bus and IEEE 24-bus, and hybrid test systems: Garver AC/DC, 14-bus AC/DC system, and 39-bus AC/DC system.

Keywords: AC/DC Networks. Heuristics. HVDC. Optimization. Transmission Expansion Planning.

Cláusula de Propiedad Intelectual

Jorge Esteban Idrovo Quilambaqui, autor del trabajo de titulación "Planeamiento Estático de la Expansión del Sistema de Transmisión utilizando enlaces de Corriente Directa", certifico que todas las ideas, opiniones y contenidos expuestos en la presente investigación son de exclusiva responsabilidad de su autor.

Cuenca, 16 de junio de 2022



Jorge Esteban Idrovo Quilambaqui

C.I: 0104654876

Cláusula de licencia y autorización para publicación en el Repositorio Institucional

Jorge Esteban Idrovo Quilambaqui en calidad de autor y titular de los derechos morales y patrimoniales del trabajo de titulación "Planeamiento Estático de la Expansión del Sistema de Transmisión utilizando enlaces de Corriente Directa", de conformidad con el Art. 114 del CÓDIGO ORGÁNICO DE LA ECONOMÍA SOCIAL DE LOS CONOCIMIENTOS, CREATIVIDAD E INNOVACIÓN reconozco a favor de la Universidad de Cuenca una licencia gratuita, intransferible y no exclusiva para el uso no comercial de la obra, con fines estrictamente académicos.

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

Cuenca, 16 de junio de 2022



Jorge Esteban Idrovo Quilambaqui

C.I: 0104654876

Conjuntos

$lij \in \Gamma^{ac}$	Topología AC
Γ^{ac}	Conjunto de líneas AC nuevas
$def \in \Gamma^{dc}$	Topología DC
Γ^{dc}	Conjunto de líneas DC nuevas
$cie \in CV$	Topología del convertor AC/DC
Λ	Conjunto de nodos

Índices

i, j	Nodos AC
l	Líneas AC
e, f	Nodos DC
d	Líneas DC
c	Estación de conversión
cv	Convertor AC/DC
tf	Transformador
pr	Reactor de fase
f	Filtro
$g \in G$	Generadores
$l \in L$	Carga-demanda

Funciones

v	Función objetivo, costo total de los circuitos de transmisión
c	Costo de circuitos y convertidores añadidos
n	Número de circuitos
w	Costo de desconexión de la carga, penalización

Parámetros

α_1	Costo de la potencia activa no suministrada.
α_2	Costo de la potencia reactiva no suministrada.
\bar{n}	Número de circuitos máximos añadidos
$\frac{P_g}{\bar{P}_g}$	Min./Max. potencia activa de generación
$\frac{Q_g}{\bar{Q}_g}$	Min./Max. potencia reactiva de generación
$\frac{R_P}{\bar{R}_P}$	Min./Max. potencia activa de generación ficticia
$\frac{R_Q}{\bar{R}_Q}$	Min./Max. potencia reactiva de generación ficticia
$\frac{U}{\bar{U}}$	Min./Max. magnitud de voltaje
$\frac{I}{\bar{I}}$	Min./Max. magnitud de corriente
\bar{S}	Flujo máximo de potencia aparente(MVA)
z_c	Impedancia del núcleo
r_d	Resistencia serie
p_d	Número de polos DC
G_{ij}	Conductancia en serie entre los nodos i y j
B_{ij}	Susceptancia en serie entre los nodos i y j

Variables (Heurística)

d	Tasa de destrucción
st	Variación de la tasa de destrucción
d_{LB}/d_{UB}	Min./Max. tasa de destrucción
s	Vector solución Inicial
s^p	Vector destrucción parcial
s'	Vector solución reconstruida

I. INTRODUCCIÓN

El problema del PET se puede formular como un problema de optimización no-convexo, que tiene como objetivo determinar todos los cambios en la infraestructura de transmisión necesarios para cumplir con el equilibrio entre la demanda y la generación en un horizonte predefinido de planificación, a un menor costo [1], satisfaciendo la creciente demanda de electricidad. Sin embargo, los problemas relacionados al PET han cambiado a lo largo de los años a medida que evoluciona el sistema de energía.

Una de las tecnologías que actualmente resulta viable técnica y económicamente es la relacionada a los HVDCs. Esta tecnología tiene características excepcionales en comparación con la transmisión de corriente alterna de alto voltaje (HVAC) y es preferida principalmente por el suministro de grandes cantidades de energía a través de cables subterráneos, no presenta problemas de estabilidad al transmitir en largas distancias, y la conexión asíncrona de sistemas de corriente alterna AC [2]. La transmisión de corriente directa (DC) se utiliza también por su capacidad para controlar el flujo de energía, lo que puede mejorar la operación del sistema, aliviar la congestión de la red, y evitar cortes en cascada [3].

Para integrar efectivamente la transmisión DC con los sistemas de energía AC, es necesario desarrollar un modelo PET integral que considere los convertidores asociados a los enlaces HVDC. Para lograr esto se requiere usar herramientas relacionadas con el flujo óptimo de potencia para redes híbridas AC/DC. El problema del flujo de potencia se resuelve iterativamente, resolviendo las ecuaciones de red AC y DC en cada paso, teniendo en cuenta el convertor, el transformador y los filtros, despreciando las pérdidas en los elementos basados en electrónicas de potencia [4].

Este trabajo se centra en el desarrollo de un modelo matemático y su método de solución para resolver el PET híbrido AC/DC. Para demostrar los beneficios de tal modelo, se consideran casos de estudio para examinar los beneficios económicos de la transmisión DC, que es un factor importante en los proyectos de PET AC/DC. En la Sección II se analiza los métodos utilizados para resolver el PET y las ventajas de los sistemas HVDC. La Sección III presenta el modelo matemático. El método de solución basado en una técnica heurística se presenta en la Sección IV. En la Sección V se presentan los resultados usando varios sistemas de prueba. Las conclusiones se resumen en la Sección VI.

II. GENERALIDADES

A. Ventajas y desventajas de los sistemas HVDC

Además de proporcionar flexibilidad adicional al sistema a través del control de flujo, la tecnología HVDC proporciona capacidad de transmisión adicional en sí mismo, transmiten energía eléctrica a frecuencia cero y utilizan convertidores con electrónica de potencia para interactuar entre la red AC y la red DC, estos convertidores pueden ser de línea conmutada (LCC), de fuente de voltaje (VSC) y modular multinivel (MMC) [5]. En la Sección III se muestra el modelo general de una estación de conversión.

El convertor LCC utiliza tiristores como interruptores y funciona con una característica de corriente continua constante. El voltaje DC se controla para alterar el flujo de energía. El convertor VSC utiliza IGBT's y tiene una serie de ventajas sobre la tecnología LCC. El convertor VSC entrega un voltaje DC constante y la corriente se controla para alterar el flujo de energía. Es la tecnología más apropiada para aplicaciones multiterminales.

La tecnología HVDC se desempeña bien para líneas de transmisión largas (más de 300km) y para enlazar sistemas con diferentes frecuencias; sus principales ventajas son:

- La corriente de carga producida por el efecto capacitivo es cero, por tener frecuencia 0 Hz, a diferencia de los sistemas AC donde la corriente de carga no se puede despreciar.
- En líneas de transmisión AC largas pueden ocurrir efectos de reflexión debido a cambios en el voltaje, esto provoca sobretensiones al final de la línea y, por tanto, problemas de estabilidad. Esto no ocurre en líneas DC.
- Las pérdidas de línea de DC son menores (sin efecto piel, sin efecto de proximidad).
- Los recursos en alta mar, así como las conexiones fuera del continente principal, son prácticamente inaccesibles cuando se usa AC.
- HVDC ofrece un control de potencia activo inherente, lo que lo hace más flexible en su uso y más fácil de limitar las sobrecargas en el sistema. En el caso de la transmisión de AC, el control del flujo de energía solo es posible con el uso de dispositivos FACTS y transformadores de cambio de fase.
- Utilizan cables que no generan contaminación visual y no emiten campos electromagnéticos variables.
- Al utilizar convertidores, puede conectar dos sistemas que están operando en una frecuencia fundamental diferente, conocido también como conexión de redes asíncronas.
- El derecho de transmisión necesario para un circuito de DC es generalmente más pequeño que el de una conexión de AC equivalente.
- Económicamente, los sistemas HVDC son viables a partir de los 300km para líneas aéreas, 250km para cables subterráneos y menos de 200km para conexiones submarinas.

Las principales desventajas del sistema HVDC son:

- La mayor limitante de la tecnología HVDC son los costos ya que, en promedio, el precio es mayor que la transmisión AC, aunque conforme se hace la línea más larga el precio disminuye significativamente.
- En un sistema monopolar, un retorno por tierra puede inducir una corriente en tuberías o conductores metálicos que se encuentren cerca de las estaciones de conversión, lo cual puede producir la oxidación o corrosión de estos elementos.
- La tecnología HVDC puede transmitir energía de punto a punto. Sin embargo, con los convertidores VSC esta desventaja poco a poco se va eliminando.

B. Métodos para resolver el PET

Aunque hay varios trabajos de investigación sobre el problema del PET AC en los sistemas eléctricos [6], los trabajos relacionados al problema PET AC/DC son relativamente escasos. En [7] se estudia una metodología de planificación orientada a la confiabilidad para obtener topologías confiables para redes malladas de corriente continua de alto voltaje (HVDC). La conversión de líneas de transmisión HVAC a HVDC como una alternativa de expansión de los sistemas de potencia se estudia en [8]; el problema del PET incluye el costo de inversión para convertir líneas de HVAC a HVDC. Además, en [9] se presentan análisis de estabilidad para redes AC y DC que no sólo consideran cargas estáticas, sino que analizan las cargas dinámicas. Las cargas dinámicas influyen significativamente en la estabilidad de las redes debido a su naturaleza dependiente del voltaje y la frecuencia. Por lo tanto, una pequeña variación en el voltaje y la frecuencia puede tener un impacto significativo en la estabilidad de las redes con la presencia de cargas dinámicas. En [10] se presenta un método para resolver el problema del PET con restricciones de seguridad de múltiples etapas, incorporando líneas basadas en alternativas HVAC y HVDC. Este modelo utiliza la programación lineal entera-mixta, que incorpora pérdidas de transmisión utilizando una linealización por partes. En [11] se estudia una metodología para resolver el problema del PET utilizando redes HVDC con estaciones de conversión multiterminales o grandes sistemas HVAC convencionales. El uso de estaciones de conversión multiterminales resulta clave para la evolución de los sistemas HVDC. El desarrollo de un modelo de programación lineal entera mixta (MILP) para resolver el problema de planificación de la expansión de la red de transmisión considerando los enlaces HVAC/HVDC y las pérdidas del sistema eléctrico se presenta en [12]. En [13] se presenta un modelo de optimización que contiene diferentes relajaciones y aproximaciones del problema PET DC.

En este artículo se plantea diseñar un modelo matemático basado en técnicas heurísticas para resolver el problema estático del PET considerando enlaces AC y DC, incluyendo los modelos de estaciones de conversión multiterminales que enlacen las redes AC y DC. El trabajo utiliza como base los modelos de flujo óptimo de potencia AC/DC implementados en JULIA.

III. FORMULACIÓN Y MÉTODO DE SOLUCIÓN

A. Modelo estático de Red DC

En la Figura 1 se encuentra el modelo de una línea DC, donde el único elemento presente es la resistencia r_d dividido para el número de polos p_d (2 para este trabajo).

El modelo del flujo de potencia en las líneas DC es definido como:

$$P_d^{dc,loss} = (r_d/p_d) \cdot (I_{def}^{dc})^2 \quad (1)$$

$$P_{\Lambda^{dc}}^{dc} = U_e^{dc} \cdot p_d \sum_{f \in \Lambda^{dc}} (U_e^{dc} - U_f^{dc}) / (r_d) \quad (2)$$

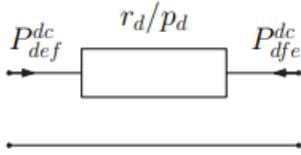


Figura 1. Modelo de línea DC.

$$\underline{P}_{def}^{dc} \leq P_{def}^{dc} \leq \overline{P}_{def}^{dc} \quad (3)$$

$$\underline{I}_{def}^{dc} \leq I_{def}^{dc} \leq \overline{I}_{def}^{dc} \quad (4)$$

donde P_{def}^{dc} es el flujo de potencia desde el nodo e hacia el nodo f , el flujo de potencia DC en sentido contrario es P_{dfe}^{dc} . De manera similar para las corrientes I_{def}^{dc} y I_{dfe}^{dc} .

B. Modelo estático de la Estación de Conversión AC/DC

El modelo de la estación de conversión AC/DC se compone de 1) un transformador con tomas e impedancia en serie, 2) un filtro como susceptancia en derivación, 3) un reactor de fase como impedancia en serie y 4) un convertor AC/DC basado en electrónica de potencia. El transformador, el filtro y el reactor de fase son componentes pasivos, mientras que el convertor electrónico es activo. Los componentes pasivos se describen utilizando las clásicas ecuaciones de flujo de potencia. El convertor puede ser de distintos tipos y puede operar como inversor y/o rectificador [14].

La Figura 2 resume el modelo del convertor AC/DC y mapea los símbolos variables.

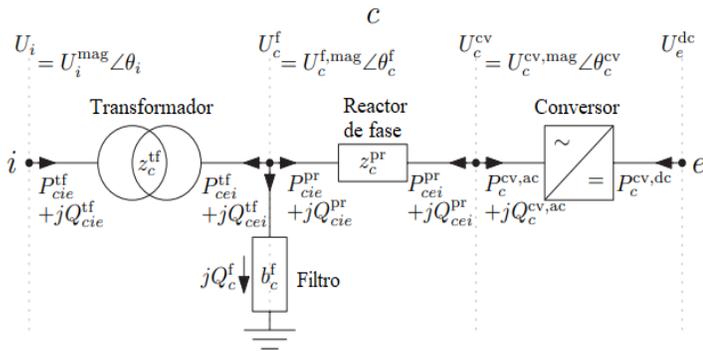


Figura 2. Parámetros y variables en el modelo de la estación de conversión [14].

Los modelos matemáticos de cada elemento del convertor se encuentran detallados en [14]. En este artículo se utiliza una representación genérica de un modelo del convertor. Al no omitir ningún componente es posible modelar los convertidores LCC y VSC.

C. Modelo matemático del PET

En la formulación propuesta, la función objetivo del PET clásico se divide en dos sub-problemas: i) el problema económico de la expansión de la transmisión y ii) el problema

operacional, este último es útil para penalizar la función objetivo cuando la topología del sistema no sea operacionalmente factible.

Para el PET AC/DC esta definición se expande considerando los costos de la adición de líneas de transmisión DC y de los convertidores DC. De esta manera el problema económico para la expansión de la transmisión se define de la siguiente manera:

$$\text{mín } v = \sum_{lij \in \Gamma^{ac}} c_{lij}^{ac} \cdot n_{lij} + \sum_{def \in \Gamma^{dc}} c_{def}^{dc} \cdot n_{def} + \sum_{cv \in CV} c_{cv}^{dc} + w \quad (5)$$

sujeto a:

$$0 \leq n_{lij} \leq \overline{n}_{lij} \quad (6)$$

$$0 \leq n_{def} \leq \overline{n}_{def} \quad (7)$$

El sub-problema operacional se formula a continuación:

$$\text{mín } w = \sum_{k \in \Lambda} (\alpha_1 \cdot R_{Pk} + \alpha_2 \cdot R_{Qk}) \quad (8)$$

sujeto a:

$$P_{CV}^{dc} + P_{\Lambda^{dc}}^{dc} + P_L = 0 \quad (9)$$

$$P_{CV}^{tf} + P_{\Lambda^{ac}}^{ac} - P_G + P_L - R_{P\Lambda^{ac}} = 0 \quad (10)$$

$$Q_{CV}^{tf} + Q_{\Lambda^{ac}}^{ac} - Q_G + P_L - R_{Q\Lambda^{ac}} = 0 \quad (11)$$

$$\underline{P}_g \leq P_g \leq \overline{P}_g \quad (12)$$

$$\underline{Q}_g \leq Q_g \leq \overline{Q}_g \quad (13)$$

$$\underline{R}_P \leq R_P \leq \overline{R}_P \quad (14)$$

$$\underline{R}_Q \leq R_Q \leq \overline{R}_Q \quad (15)$$

$$\underline{U}_i \leq U_i \leq \overline{U}_i \quad (16)$$

$$\underline{U}_e^{dc} \leq U_e^{dc} \leq \overline{U}_e^{dc} \quad (17)$$

$$S \leq \overline{S} \quad (18)$$

Las leyes de Kirchoff son utilizadas para modelar las ecuaciones de balance tanto para el nodo DC (e) como para el nodo AC (i). Para formular correctamente estas ecuaciones, es necesario considerar los flujos de potencia en el convertor tanto del nodo DC ($P_c^{cv,dc}$) como del nodo AC ($P_c^{cie,tf}$ y $Q_c^{cie,tf}$). Las ecuaciones se encuentran formuladas en el modelo matemático del PET (9), (10) y (11). Los términos R_P y R_Q modelan la desconexión de la carga, estos son vectores de potencia activa y reactiva de los Generadores Ficticios, respectivamente. α_1 y α_2 son coeficientes de penalización debido a la contribución de los generadores ficticios de potencia activa y reactiva, respectivamente. Para este trabajo α_2 se considera 0 debido a que los generadores ficticios contribuyen únicamente con potencia activa.

El balance de potencia nodal respecto a todos los flujos de potencia activa y reactiva son utilizadas en (10) y (11) y se definen de la siguiente manera.

$$P_{\Lambda^{ac}}^{ac} = U_i \cdot \sum_{j \in \Lambda^{ac}} U_j \cdot (G_{ij} \cdot \cos\theta_{ij} + B_{ij} \cdot \sin\theta_{ij}) \quad (19)$$

$$Q_{\Lambda^{ac}}^{ac} = U_i \cdot \sum_{j \in \Lambda^{ac}} U_j \cdot (G_{ij} \cdot \sin\theta_{ij} - B_{ij} \cdot \cos\theta_{ij}) \quad (20)$$

D. Herramienta Computacional

Para desarrollar el modelo computacional se utilizó un lenguaje de programación diferente al utilizado académicamente, Matlab, el lenguaje se denomina Julia. Se ha escogido Julia debido a que es un lenguaje de programación de código abierto de alto rendimiento y alto nivel para el cálculo numérico [15].

Julia está diseñado para la computación científica, manteniendo un rendimiento similar al de C, además integra librerías que se adaptan muy bien para resolver problemas de optimización haciendo de esta una herramienta muy práctica.

La segunda razón principal es que Julia posee una capa de modelado denominado JuMP que es un lenguaje de modelado de optimización muy amigable, admite una amplia variedad de *solvers* diferentes por lo que trabaja con programación lineal (LP), programación de cono de segundo orden (SOCP), programación semidefinida (SDP), programación no lineal (NLP) y programación no lineal entera mixta (MINLP) [16]. Es uno de los pocos lenguajes de modelado que abarca todas las diferentes clases de problemas encontradas en las formulaciones de los Sistemas de Energía Eléctrica. Esto convierte a Julia junto con JuMP en el candidato ideal para trabajar con problemas de optimización en Sistemas de Energía Eléctrica.

La capa de optimización de redes eléctricas se denomina PowerModels, se puede comparar con Matpower en Matlab. PowerModels es un conjunto de herramientas gratuito y de código abierto para la optimización de redes de transmisión, se enfoca en establecer una implementación básica de problemas de optimización de la red eléctrica de estado estable e incluye el flujo de potencia (PF), flujo óptimo de potencia (OPF) y planificación de la expansión de redes de transmisión [17]. Esta capa captura la estructura de los programas matemáticos de los sistemas de potencia, como ecuaciones sobre números complejos y objetos de componentes de red, como buses, generadores y líneas de transmisión. La Figura 3 representa el sistema de capas que posee Julia comparado con el entorno de Matlab, siendo PowerModels la capa más general, ideal para trabajar con redes eléctricas.

PowerModels junto con JuMP proporcionan todas las herramientas necesarias para desarrollar un modelo PET considerando la expansión en líneas de corriente alterna. Más información detallada de este paquete de código abierto se encuentra en [18].

PowerModels posee una aproximación a redes DC, pero no es lo suficientemente completa como para considerar líneas DC candidatas, nodos candidatos y convertidores candidatos. Para ello es necesario el paquete complemento denominado PowerModelsACDC. PowerModelsACDC amplía PowerModels con un conjunto de nodos de red DC y con convertidores AC/DC para conectar los nodos de la red DC a los nodos

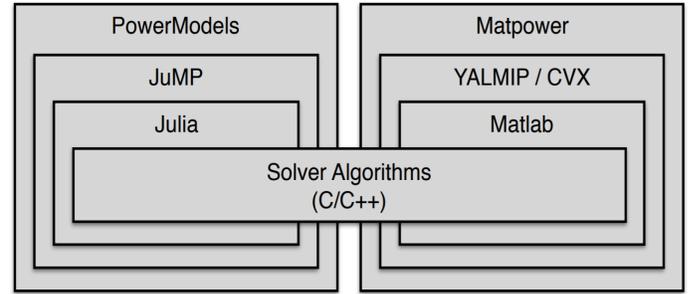


Figura 3. Capas de programación matemática.

de la red AC. Información más detallada de este paquete se encuentra en [19].

JuMP puede trabajar con distintos *solvers* como Ipopt, CPLX, Gurobi, Mosek, entre otros, de esta variedad de *solvers* se ha seleccionado Ipopt por ser no lineal y de código abierto. Ipopt es un optimizador de punto interior disponible en [20]. Además, se puede editar las características internas de Ipopt como el número máximo de iteraciones, gracias a su relación con JuMP. Estos paquetes son necesarios para desarrollar el modelo de optimización, sin embargo, no se encuentran por defecto dentro de Julia. Cada uno de los paquetes deberán ser incorporados a las librerías de Julia. Se debe mencionar que también se utilizó el editor de código *Visual Studio Code* [21]. Este editor de código es compatible con Julia y un sinnúmero de lenguajes de programación. Principalmente fue utilizado para hacer que las estructuras de código sean más familiares y fáciles de codificar.

IV. MODELO DE OPTIMIZACIÓN

El modelo de optimización implementado consta principalmente de dos secciones: la obtención de la solución inicial y el algoritmo de optimización.

A. Obtención de la solución inicial

La técnica utilizada para obtener la solución inicial se denomina *Forward* [22]. Esta técnica heurística consiste en añadir todas las líneas de transmisión candidatas, una por una, al sistema para posteriormente compararlas y seleccionar aquella línea candidata que refleje la mejor función objetivo.

Esta técnica se repite varias veces, añadiendo las líneas necesarias para obtener la mejor solución denominada mínimo local. El *Forward* es el motor del Algoritmo de Optimización y la solución inicial deberá ser mejorada hasta encontrar la solución final.

En ocasiones para sistemas muy pequeños, la técnica *Forward* es suficiente para encontrar la solución final. En la Figura 4 se puede entender el funcionamiento del *Forward*.

B. Algoritmo de Optimización

La técnica metaheurística utilizada se denomina *Iterated Greedy* (IG). El IG genera una secuencia de soluciones al iterar sobre heurísticas constructivas utilizando dos fases principales:

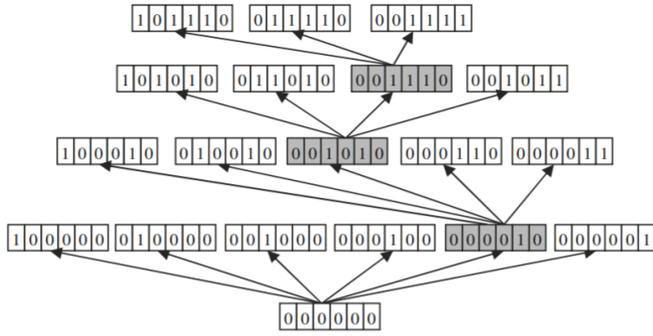


Figura 4. *Forward* para un caso de prueba [23]

destrucción y construcción. Durante la fase de destrucción, algunos componentes de la solución se eliminan de una solución candidata construida previamente. Luego, el procedimiento de construcción aplica una heurística constructiva para reconstruir una solución candidata. Una vez que se ha completado una solución candidata, un criterio de aceptación decide si la solución recién construida reemplazará a la solución existente. IG sigue estos pasos hasta que se cumple un criterio de parada [24].

El Algoritmo 1 muestra el pseudocódigo del IG implementado. La tasa de destrucción varía de acuerdo al experimento realizado.

Algoritmo 1 Pseudo-código para un IG con rango de destrucción variable.

```

1: input: rango de destrucción  $[d_{LB}, d_{UB}]$ 
2:  $d := d_{LB}$ 
3:  $s := Forward()$ 
4: while condición de terminación no cumplida do
5:   while mejora la solución do
6:      $s^p := DestrucciónParcial(s, d)$ 
7:      $s' := Construcción(s^p)$ 
8:     if Mejora la solución then
9:       salir
10:    end if
11:  end while
12:  if  $s'$  es mejor que  $s$  then
13:     $s := s'$ 
14:     $d := d_{LB}$ 
15:  else
16:     $d := d + st$ 
17:    if  $d > d_{UB}$  then
18:       $d := d_{LB}$ 
19:    end if
20:  end if
21: end while
22: output: mejor solución

```

El IG implementado tiene una mejora comparada con la definición del IG mencionada anteriormente. Esta mejora fue diseñada con el objetivo de evitar estancamientos en la solución inicial y en mínimos locales. Debido a que la selección de las líneas a eliminar es aleatoria, hay la posibilidad de eliminar una línea tal que el resultado no mejore. Si esto sucede, con la misma solución candidata previa se elimina una línea diferente a la eliminada anteriormente abriendo la posibilidad de que mejore el resultado.

V. RESULTADOS

En este trabajo, se han utilizado sistemas AC y sistemas AC/DC de prueba. De los sistemas AC se han seleccionado dos sistemas bien conocidos en la literatura del PET: A) el sistema Garver 6-buses y B) el sistema IEEE 24-buses. Estos sistemas AC tienen el objetivo de mostrar el desempeño y la robustez del PET implementado comparando sus resultados con los obtenidos en otros trabajos de investigación. Los detalles de estos modelos pueden ser encontrados en [1], [25] y [26].

Posteriormente, se realizaron las pruebas para tres sistemas de prueba AC/DC: C) sistema Garver 6-buses, D) sistema de 14-buses y E) sistema de 39-buses. La información completa de estos sistemas se encuentra en [20].

Para todos los casos de estudio se realizó un análisis estadístico con 10 experimentos variando la tasa porcentual de destrucción, elemento clave para el éxito del IG. También se analizó el comportamiento del modelo utilizando el procesamiento paralelo de Julia con 2 y 8 procesadores. El modelo fue ejecutado en un computador Intel i7, 2.80GHz, 16GB RAM.

Los criterios utilizados para comparar los resultados son:

1. Robustez, la capacidad de obtener la misma solución de menor costo para todos los ensayos, tasa de éxito definida. En este documento, una tasa de éxito superior al 90% se considera un resultado robusto.
2. Rendimiento, el tiempo de cálculo requerido para encontrar la solución óptima. El rendimiento también se puede medir por el número promedio de evaluaciones de la función objetivo o el número promedio de iteraciones necesarias para obtener la mejor solución.

A. Sistema Garver 6-buses

Este sistema cuenta con 6 buses con una demanda de potencia total de 720 MW y 152 Mvar, 6 líneas de transmisión y una capacidad instalada de 1140 MW. Posee 15 líneas candidatas para la expansión. Con este sistema se plantea analizar dos escenarios: 1) Generación con redespacho, y 2) Generación sin redespacho.

1. *Generación con redespacho:* Este escenario permite que los generadores entreguen un diferente nivel de potencia al preestablecido, haciendo que la potencia de generación varía entre sus límites. La Tabla I presenta las líneas que el sistema debe agregar para lograr la convergencia al menor costo. El menor costo encontrado es 160 unidades monetarias, este costo coincide con el encontrado en [25] y [26].

Tabla I
LÍNEAS AGREGADAS PARA EL MENOR COSTO. GARVER 6-BUSES CON REDESPACHO

Buses: Inicio - Fin	Líneas agregadas	Costo por línea (\$ × 10 ³)
2 - 6	2	30
3 - 5	2	20
4 - 6	2	30
Líneas nuevas		6
Total (\$ × 10³)		160

2. *Generación sin redespacho:* En este escenario la generación de potencia es constante durante todo el proceso de optimización, este escenario se asemeja a la generación renovable donde no es posible el redespacho de energía, esto hace que el sistema requiera de un mayor número de líneas que el primer escenario.

La Tabla II presenta las líneas agregadas y a diferencia del primer escenario se tienen 2 líneas l_{2-6} extras, sólo 1 línea l_{3-5} y 1 línea l_{5-6} nueva, resultando en una topología con 8 circuitos nuevos. Esto se debe a que, al tener una potencia fija, el sistema requiere de más elementos para llegar a la convergencia. El costo mínimo encontrado es de 261 ($\$ \times 10^3$).

Tabla II
LÍNEAS AGREGADAS PARA EL MENOR COSTO. GARVER 6-BUSES SIN REDESPACHO

Buses: Inicio - Fin	Líneas agregadas	Costo por línea ($\$ \times 10^3$)
2 - 6	4	30
3 - 5	1	20
4 - 6	2	30
5 - 6	1	61
Líneas nuevas		8
Total ($\\$ \times 10^3$)		261

B. Sistema IEEE 24-buses

Este sistema cuenta con 24 buses, una demanda de potencia total de 8550 MW y 1740 Mvar, 34 líneas de transmisión y una potencia de generación máxima de 8866 MW. Posee 41 líneas candidatas para la expansión. Con este sistema se plantea analizar únicamente el escenario: Generación sin redespacho.

La Tabla III presenta aquellas líneas agregadas al sistema para obtener el mínimo costo. El mínimo costo encontrado cuando se tiene potencia fija es de 110 ($\$ \times 10^3$).

Tabla III
LÍNEAS AGREGADAS PARA EL MENOR COSTO. IEEE 24-BUSES SIN REDESPACHO

Buses: Inicio - Fin	Líneas agregadas	Costo por línea ($\$ \times 10^3$)
6 - 10	1	16
7 - 8	2	16
13 - 14	1	62
Líneas nuevas		4
Total ($\\$ \times 10^3$)		110

C. Discusión sistemas de prueba AC

La Tabla IV presenta resultados más a fondo del sistema Garver: Generación con Redespacho. Se puede observar que el modelo es muy robusto y tiene un rendimiento satisfactorio con 2 iteraciones para obtener la solución óptima. Para la tasa del 50 % el número de evaluaciones de la función objetivo tiene un mayor valor respecto a las otras tasas, consecuentemente el tiempo de operación también incrementa. Esto demuestra que no es necesario valores altos para la tasa de destrucción. El mejor comportamiento se obtiene con una tasa del 20 %.

El número de procesadores influye directamente en los tiempos de operación donde el menor tiempo promedio obtenido es 2 segundos con 8 procesadores.

Por otra parte, la Tabla V contiene los resultados para el escenario: Generación sin Redespacho. En ésta se puede destacar que para una tasa de destrucción del 30 % el modelo es robusto y tiene un excelente rendimiento, con un promedio de 4 iteraciones para encontrar la solución óptima. No se requiere de porcentajes altos para converger. Le precede la tasa del 20 % igual de robusta y con un muy buen rendimiento. La tasa del 50 % es la que peor se desenvuelve con el mayor tiempo y mayor número de evaluaciones de la función objetivo.

En este escenario es más evidente el efecto de los procesadores, mejorando los tiempos de ejecución de un promedio 23 segundos con los 2 procesadores a un promedio de 10 segundos con 8 procesadores para encontrar la solución óptima.

Finalmente, los resultados de los experimentos en el sistema IEEE 24-buses se presentan en la Tabla VI. De esta tabla se puede observar que para todas las tasas de destrucción el modelo es muy robusto. Sin embargo, la tasa del 30 % es la que tiene el mejor rendimiento para obtener la solución óptima al menor tiempo. El resto de tasas de destrucción requieren de mayores tiempos para encontrar la solución óptima.

Con los 8 procesadores trabajando se tiene un tiempo aproximado de 24 segundos teniendo en cuenta el gran incremento en líneas candidatas.

D. Sistema AC/DC Garver 6-buses

Este sistema tiene ciertas variaciones al sistema en A); consiste de 6 buses con una carga total de 760 MW y 152 MVar, una capacidad instalada de 1110 MW y 6 líneas de transmisión AC que interconectan los buses, originalmente no posee ningún circuito DC. El escenario analizado corresponde a aquel con generación despachable.

El sistema AC se puede expandir únicamente con 1 línea de transmisión. Al no tener originalmente ningún circuito DC, la expansión DC consiste de 6 buses DC, 6 convertidores DC (1 para cada bus) y 11 líneas de transmisión DC que interconectan los 6 buses DC. De entre todos estos candidatos AC y DC para la expansión, el modelo obtendrá aquellos que satisfacen el sistema con el menor costo posible. Cabe mencionar que para obtener los costos también se consideraron los costos de cada convertidor en el extremo de la línea DC.

La Tabla VII muestra las líneas agregadas al sistema, tomando como mejor solución a la adición de 3 nuevas líneas con un costo general de 22.7 ($\$ \times 10^3$).

E. Sistema AC/DC 14-buses

Este sistema posee 14 buses con una carga total de 777 MW y 220.5 MVar, una capacidad instalada de 1197 MW y 20 líneas de transmisión AC. Este sistema, al igual que el sistema anterior, no posee ningún circuito DC por lo que el modelo deberá integrar estos circuitos al sistema. La generación se considera que puede ser redespachada.

Tabla IV
SISTEMA GARVER 6-BUSES: I) GENERACIÓN CON REDESPACHO. 10 EXPERIMENTOS

NÚMERO DE PROCESADORES										
2 Procesadores						8 Procesadores				
Tasa de destrucción	Éxito (%)	Prom. N. Eval	Prom. Iter	Min. Cost. (\$ × 10 ³)	Prom. Tiempo (s)	Éxito (%)	Prom. N. Eval	Prom. Iter	Min. Cost. (\$ × 10 ³)	Prom. Tiempo (s)
20 %	100	135	2	160	5	100	135	2	160	2
30 %	100	150	2	160	6	100	150	2	160	2
40 %	100	150	2	160	6	100	150	2	160	2
50 %	100	165	2	160	7	100	165	2	160	2
30 %-60 %	100	150	2	160	6	100	150	2	160	2

Tabla V
SISTEMA GARVER 6-BUSES: II) GENERACIÓN SIN REDESPACHO. 10 EXPERIMENTOS

NÚMERO DE PROCESADORES										
2 Procesadores						8 Procesadores				
Tasa de destrucción	Éxito (%)	Prom. N. Eval	Prom. Iter	Min. Cost. (\$ × 10 ³)	Prom. Tiempo (s)	Éxito (%)	Prom. N. Eval	Prom. Iter	Min. Cost. (\$ × 10 ³)	Prom. Tiempo (s)
20 %	100	331	5	261	26	100	375	5	261	10
30 %	100	291	4	261	23	100	371	5	261	10
40 %	90	603	7	261	53	90	483	6	261	13
50 %	60	727	8	261	58	70	723	8	261	21
30 %-60 %	90	342	5	261	28	70	531	7	261	16

Tabla VI
SISTEMA IEEE 24-BUSES: GENERACIÓN SIN REDESPACHO. 10 EXPERIMENTOS

NÚMERO DE PROCESADORES										
2 Procesadores						8 Procesadores				
Tasa de destrucción	Éxito (%)	Prom. N. Eval	Prom. Iter	Min. Cost. (\$ × 10 ³)	Prom. Tiempo (s)	Éxito (%)	Prom. N. Eval	Prom. Iter	Min. Cost. (\$ × 10 ³)	Prom. Tiempo (s)
20 %	100	599	6	110	82	100	580	6	110	26
30 %	100	554	4	110	75	100	549	4	110	24
40 %	100	615	5	110	93	100	676	5	110	29
50 %	100	607	5	110	94	100	886	6	110	38
30 %-60 %	100	574	4	110	83	100	652	5	110	28

Tabla VII
LÍNEAS AGREGADAS PARA EL MENOR COSTO. GARVER AC/DC 6-BUSES CON REDESPACHO

	Buses: Inicio-Fin	Líneas agregadas	Costo por línea (\$ × 10 ³)	Costos convertidores (\$ × 10 ³)
Línea AC	5 - 6	1	5	-
Líneas DC	2 - 6	1	2.4	8.5
	4 - 6	1	2.8	4
Líneas nuevas		3	10.3	12.5
Total (\$ × 10 ³)			22.7	

Tabla VIII
LÍNEAS AGREGADAS PARA EL MENOR COSTO. SISTEMA AC/DC 14-BUSES CON REDESPACHO

	Buses: Inicio-Fin	Líneas agregadas	Costo por línea (\$ × 10 ³)	Costos convertidores (\$ × 10 ³)
Líneas DC	1 - 3	1	1.0	6.4
	1 - 9	1	1.5	3.9
Líneas nuevas		2	2.5	10.3
Total (\$ × 10 ³)			12.8	

El sistema de expansión para esta red no contiene ninguna línea de transmisión AC candidata, entonces se plantea una expansión meramente DC.

La planificación de la expansión DC consiste de 14 buses DC, 14 convertidores DC (1 para cada bus DC) y un total de 213 líneas de transmisión DC candidatas que interconectan los buses DC, siendo este el sistema con el espacio de búsqueda más grande de entre todos los analizados. Cabe mencionar que para obtener los costos también se consideraron los costos de cada convertidor multiterminal en los extremos de las líneas DC.

La Tabla VIII presenta la topología final del sistema, con dos líneas agregadas, el costo mínimo de estas líneas es de 12.8 (\$ × 10³).

F. Sistema AC/DC 39-buses

El último caso de estudio es el de 39 buses. Este caso, similar al anterior, posee redes AC y la planificación de la expansión consiste únicamente de redes DC. El caso de estudio consta de 39 buses con una demanda total de 8657.23 MW y 2073.6 MVar, una capacidad instalada de 10684 MW y 46 líneas de transmisión AC. Se considera generación con redespacho.

La planificación de la expansión consta de todos los elementos necesarios para la transmisión DC, estos son: un total de 8 buses DC, 8 convertidores DC (1 para cada bus) y 48 líneas de transmisión DC.

En las especificaciones de los convertidores se detallan los buses AC y DC que se interconectan con el convertidor, para

evitar incongruencias. Las líneas agregadas para obtener el mínimo costo se presentan en la Tabla IX.

Tabla IX
LÍNEAS AGREGADAS PARA EL MENOR COSTO. SISTEMA AC/DC 39-BUSES CON REDESPACHO

	Buses: Inicio-Fin	Líneas agregadas	Costo por línea (\$ × 10 ³)	Costos convertidores (\$ × 10 ³)
Líneas DC	2 - 7	1	1.7	6.9
	1 - 6	1	3.2	6.7
	4 - 5	1	6.3	6.9
Líneas nuevas		3	11.2	20.5
Total (\$ × 10 ³)			31.7	

G. Discusión sistemas de prueba AC/DC

Los resultados del primer sistema híbrido Garver AC/DC se encuentran en la Tabla X y se puede destacar que para una tasa del 50% el modelo definitivamente no encuentra el costo mínimo por lo que posee un éxito del 0%, no mejora de su mínimo local de 23.7. Las tasas del 20-30-40% presentan resultados muy robustos y de mayor rendimiento, destacando aquel con una tasa del 30%. Este escenario presenta mayores tiempos de solución que su análogo AC, esto se debe principalmente a que el flujo óptimo AC/DC requiere mayor tiempo de ejecución que el flujo óptimo AC.

Por otra parte, los resultados del sistema AC/DC 14-buses se encuentran en la Tabla XI. Al ser un sistema muy grande, los tiempos de análisis se presentan en minutos. La tasa del 20% presenta un rendimiento nulo al no encontrar el menor costo, esto se debe a que la selección correcta para la tasa de destrucción es importante y que no siempre valores muy altos o muy bajos son los mejores. El método presenta resultados bastante robustos, exceptuando aquel con la tasa del 20%, y el mejor rendimiento con el menor tiempo empleado se presenta para una tasa del 30%.

Para este sistema el procesamiento en paralelo, dado el gran número de caminos candidatos (213), permite obtener el resultado en un tiempo de 104 segundos, lo cual demuestra la calidad del modelo implementado.

Finalmente, los resultados del sistema AC/DC 39-buses contenidos en la Tabla XII. A primera vista se puede notar que el método es muy robusto. Las variaciones más destacadas en este escenario son el número de evaluaciones de la función objetivo y el tiempo. El mejor rendimiento posee la tasa del 30%. El procesamiento en paralelo resuelve este escenario en un tiempo aproximado de 26 segundos.

H. Comportamiento de los sistemas

La Figura 5 presenta las curvas del convergencia de los sistemas más representativos, estas curvas muestran cómo los costos van mejorando a medida que las iteraciones aumentan. Se puede notar que en los sistemas Garver AC sin redespacho y Garver ACDC la solución óptima se encuentra en menos de 15 iteraciones demostrando su rendimiento ante la mejor tasa de destrucción.

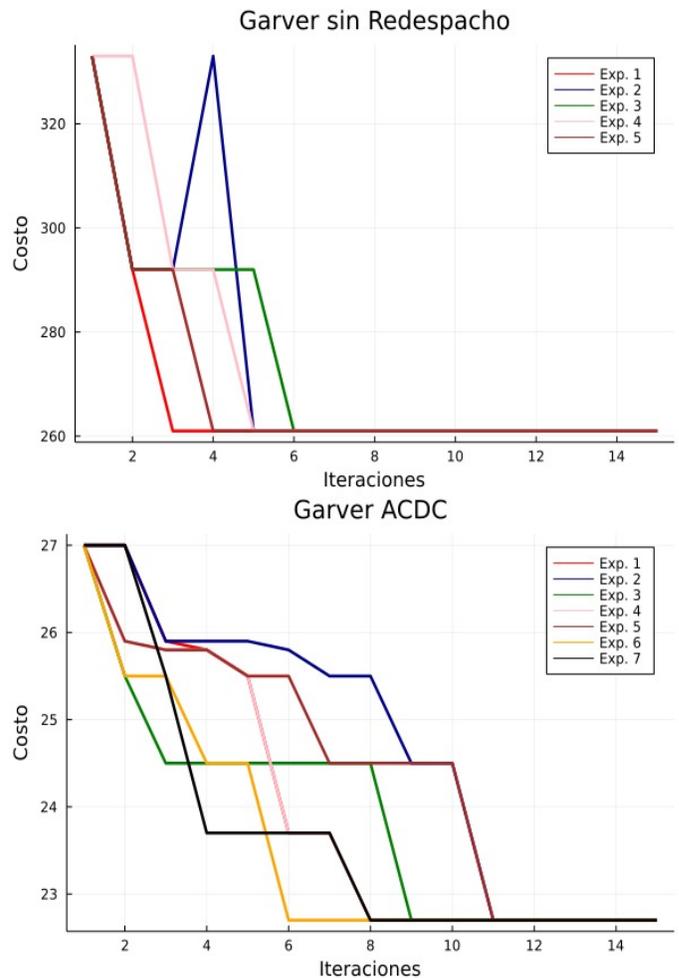


Figura 5. Curvas de comportamiento para dos escenarios representativos.

Para representar estas gráficas se optó por utilizar la tasa de destrucción que representa el mejor rendimiento, 30%.

En el experimento 2 (color azul) del sistema Garver sin redespacho se puede observar que el costo baja para la iteración 3 y vuelve a subir para la iteración 4. Esto se debe a que la heurística sigue una eliminación aleatoria y existe la posibilidad de eliminar una línea que empeora el sistema, pese a esto la nueva fase de destrucción elimina la línea correcta, llegando a la solución óptima para la iteración 5.

VI. CONCLUSIONES

Las continuas mejoras tecnológicas, la creciente necesidad de energía y las ventajas de la tecnología HVDC, entre otros factores, inciden directamente en el problema de planificación de la expansión de los sistemas de transmisión. Esto hace necesario que se deban proponer formulaciones que consideren estas variables, y métodos de solución que tengan potencial de resolver las formulaciones matemáticas correspondientes al problema PET. Este trabajo propone una formulación matemática que puede ser resuelta utilizando la técnica heurística *Iterated Greedy*. Se usa la heurística *Forward* como motor de construcción para las soluciones candidatas. Los resultados

Tabla X
SISTEMA AC/DC GARVER 6-BUSES: GENERACIÓN CON REDESPACHO. 10 EXPERIMENTOS

NÚMERO DE PROCESADORES										
2 Procesadores						8 Procesadores				
Tasa de destrucción	Éxito (%)	Prom. N. Eval	Prom. Iter	Min. Cost. (\$ × 10 ³)	Prom. Tiempo (s)	Éxito (%)	Prom. N. Eval	Prom. Iter	Min. Cost. (\$ × 10 ³)	Prom. Tiempo (s)
20 %	90	230	9	22.7	57	90	228	9	22.7	18
30 %	100	206	8	22.7	48	100	218	8	22.7	16
40 %	90	218	8	22.7	54	90	230	9	22.7	16
50 %	0	419	11	23.7	103	0	404	11	23.7	36
30 %-60 %	80	260	9	22.7	64	80	280	10	22.7	20

Tabla XI
SISTEMA AC/DC 14-BUSES: GENERACIÓN CON REDESPACHO. 10 EXPERIMENTOS

NÚMERO DE PROCESADORES										
2 Procesadores						8 Procesadores				
Tasa de destrucción	Éxito (%)	Prom. N. Eval	Prom. Iter	Min. Cost. (\$ × 10 ³)	Prom. Tiempo (min)	Éxito (%)	Prom. N. Eval	Prom. Iter	Min. Cost. (\$ × 10 ³)	Prom. Tiempo (s)
20 %	0	2343	9	27.0	12	0	2343	9	27.0	240
30 %	100	1150	2	12.8	6.4	100	1324	3	12.8	104
40 %	100	1235	2	12.8	6.7	100	1363	3	12.8	145
50 %	100	1405	3	12.8	8.2	100	1448	3	12.8	143
30 %-60 %	100	1491	3	12.8	9.3	100	1406	3	12.8	138

Tabla XII
SISTEMA AC/DC 39-BUSES: GENERACIÓN CON REDESPACHO. 10 EXPERIMENTOS

NÚMERO DE PROCESADORES										
2 Procesadores						8 Procesadores				
Tasa de destrucción	Éxito (%)	Prom. N. Eval	Prom. Iter	Min. Cost. (\$ × 10 ³)	Prom. Tiempo (s)	Éxito (%)	Prom. N. Eval	Prom. Iter	Min. Cost. (\$ × 10 ³)	Prom. Tiempo (s)
20 %	100	288	2	31.7	110	100	288	2	31.7	31
30 %	100	288	2	31.7	102	100	288	2	31.7	26
40 %	100	288	2	31.7	111	100	288	2	31.7	27
50 %	100	336	2	31.7	126	100	336	2	31.7	31
30 %-60 %	100	288	2	31.7	111	100	288	2	31.7	27

muestran robustez y un muy buen rendimiento ante los casos de estudio analizados.

Para los sistemas AC, se obtuvieron los resultados esperados con tiempos relativamente bajos comparados con los obtenidos en [25] y [26], demostrando el alto rendimiento del algoritmo. Para los sistemas AC/DC, los resultados son igualmente alentadores, obteniendo tasas de éxitos en tiempos de cálculo relativamente bajos, demostrando un muy buen rendimiento y robustez.

El elemento que más incide en el rendimiento del modelo es la tasa de destrucción; después de observar los resultados en todos los sistemas, se concluye que la tasa del 30 % es la que mejor resultados presenta. Se debe realizar un análisis estadístico, conocido como ajuste de parámetros, para obtener el parámetro que represente el mejor rendimiento.

El procesamiento paralelo que posee Julia es una herramienta necesaria cuando se desea resolver problemas de optimización y ayudó notablemente a reducir el tiempo de cálculo. Además, gracias a Julia el modelo es capaz de trabajar con sistemas con un gran espacio de búsqueda y aún así obtener resultados en tiempos de cálculo razonables.

La formulación planteada en este artículo resulta ser una formulación general para el planeamiento AC/DC, es decir, si se omiten los términos DC y los que engloben al convertidor, se obtiene la formulación clásica AC; y también es capaz de trabajar sistemas híbridos AC/DC. El trabajo futuro incluye

trabajar con redes eléctricas de mayor tamaño, y formulaciones que incluyan otras nuevas tecnologías en el sistema de transmisión (i.e. FACTS, Sistemas de almacenamiento, etc).

REFERENCIAS

- [1] M. J. Rider, A. V. Garcia, and R. Romero, "Power system transmission network expansion planning using AC model," *Generation, Transmission & Distribution, IET*, vol. 1, pp. 731–742, Oct. 2007.
- [2] K. R. Padiyar, *HVDC Power Transmission*. New York: Wiley, 1990.
- [3] A. Lotfjou, Y. Fu, and M. Shahidehpour, "Hybrid AC/DC Transmission Expansion Planning," *IEEE Trans. Power Del.*, vol. 27, no. 3, pp. 1620–1628, 2012.
- [4] H. Ergun, J. Dave, D. Van Hertem and F. Geth, "Optimal Power Flow for AC–DC Grids: Formulation, Convex Relaxation, Linear Approximation, and Implementation," *IEEE Transactions on Power Systems*, vol. 34, no. 4, pp. 2980–2990, July 2019.
- [5] D. V. Hertem, O. Gomis-Bellmunt and J. Liang, *HVDC Grids: For Offshore and Supergrid of the Future*. IEEE Press, 2016.
- [6] P. V. Gomes and J. T. Saraiva, "State-of-the-art of transmission expansion planning: A survey from restructuring to renewable and distributed electricity markets," *International Journal of Electrical Power & Energy Systems*, vol. 111, pp. 411–424, 2019.
- [7] H. Xie, Z. Bie and G. Li, "Reliability-Oriented Networking Planning for Meshed VSC-HVDC Grids," *IEEE Transactions on Power Systems*, vol. 34, no. 2, pp. 1342–1351, March 2019.
- [8] J. Novoa, M. Rios, "Conversion of HVAC Lines into HVDC in Transmission Expansion Planning," *World Academy of Science, Engineering and Technology, Open Science Index 132, International Journal of Energy and Power Engineering*, 11(12), 1190 - 1196, 2017.
- [9] M. Ahmed, A. Vahidnia, L. Meegahapola and M. Datta, "Small signal stability analysis of a hybrid AC/DC microgrid with static and dynamic loads," *2017 Australasian Universities Power Engineering Conference (AUPEC)*, 2017, pp. 1-6.

- [10] A. H. Dominguez, L. H. Macedo, A. H. Escobar and R. Romero, "Multistage Security-Constrained HVAC/HVDC Transmission Expansion Planning With a Reduced Search Space," in *IEEE Transactions on Power Systems*, vol. 32, no. 6, pp. 4805-4817, Nov. 2017.
- [11] M. P. González and M. A. Ríos, "Comparison of HVDC-Grid and HVAC into Transmission Expansion Planning," 2018 IEEE ANDESCON, 2018, pp. 1-5.
- [12] A. H. Dominguez, A. H. Escobar Zuluaga, L. H. Macedo and R. Romero, "Transmission network expansion planning considering HVAC/HVDC lines and technical losses," 2016 IEEE PES Transmission & Distribution Conference and Exposition-Latin America (PES T&D-LA), 2016, pp. 1-6.
- [13] J. Dave, H. Ergun, and D. Van Hertem, "Relaxations and approximations of HVdc grid TNEP problem," *Electric Power Systems Research*, vol. 192, p. 106683, Nov. 2020.
- [14] H. Ergun, J. Dave, T. An, C. Han and D. Van Hertem, "Hybrid AC/DC optimal power flow for meshed HVDC grids: Case studies," 15th IET International Conference on AC and DC Power Transmission (ACDC 2019), 2019, pp. 1-6.
- [15] J. Bezanson, S. Karpinski, V. B. Shah, and A. Edelman, "Julia: A Fast Dynamic Language for Technical Computing," *CoRR*, vol. abs/1209.5145, 2012.
- [16] I. Dunning, J. Huchette, and M. Lubin, "JuMP: A modeling language for mathematical optimization," *SIAM Review*, vol. 59, no. 2, pp. 295-320, 2017.
- [17] C. Coffrin, R. Bent, K. Sundar, Y. Ng and M. Lubin, "PowerModels.JL: An Open-Source Framework for Exploring Power Flow Formulations," 2018 Power Systems Computation Conference (PSCC), 2018, pp. 1-8.
- [18] PowerModels.jl. advanced network science initiative, 2017. [Online]. Available: <https://github.com/lanl-ansi/PowerModels.jl>
- [19] Electa-Git, PowerModelsACDC.jl. 2019. [Online]. Available: <https://github.com/Electa-Git/PowerModelsACDC.jl>
- [20] Ipopt. COIN-OR Foundation, 2020. [Online]. Available: <https://github.com/coin-or/Ipopt>
- [21] "Visual Studio Code - Code Editing. Redefined." <https://code.visualstudio.com/> (accessed Sep. 26, 2021).
- [22] N. E. Matute, S. P. Torres, E. G. Morquecho, F. Astudillo-Salinas, J. C. Lopez and W. C. Flores, "Improving the AC Transmission Expansion Planning by Using Initial Solutions Algorithms," 2020 IEEE PES Innovative Smart Grid Technologies Europe (ISGT-Europe), 2020, pp. 494-498.
- [23] H. Seifi and M. Sepsian, *Electric Power System Planning: Issues, Algorithms and Solutions*, 01 2011, vol. 49.
- [24] R. Ruiz and T. Stützle, "A simple and effective iterated greedy algorithm for the permutation flowshop scheduling problem," *European Journal of Operational Research*, vol. 177, n.º 3, pp. 2033-2049, 2007.
- [25] S. Torres and C. Castro, "Expansion planning for smart transmission grids using AC model and shunt compensation," *IET Generation, Transmission & Distribution*, vol. 8, no. 5, pp. 966-975, 2014.
- [26] Rider, M.J.: "Transmission system expansion planning using DC-AC models and non-linear programming techniques", D.Sc. Thesis in Portuguese, University of Campinas, Sao Paulo, Brazil, 2006.