

# UCUENCA

Facultad de Ingeniería

Carrera de Ingeniería Eléctrica

**Planeamiento Dinámico de la Expansión de los Sistemas de Transmisión utilizando un Algoritmo Voraz Iterativo**

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

**Modalidad:** Artículo académico

**Autor:**

Mateo David Llivisaca Mejia

CI: 0105713788

mateollivi16@gmail.com

**Director:**

Ing. Santiago Patricio Torres Contreras, PhD.

CI: 0102448958

santiago.torres@ucuenca.edu.ec

**Cuenca, Ecuador**

15 - junio - 2022

## **Resumen:**

El problema del Planeamiento Dinámico de la Expansión de los Sistemas de Transmisión (PDEST) brinda una posibilidad más eficiente para la inversión de nueva infraestructura en el sistema eléctrico. Actualmente, el uso de meta-heurísticas lidera los métodos de solución, sin embargo el uso de métodos heurísticos más sencillos no ha sido del todo explorados. En este trabajo, se propone un método heurístico para resolver el PDEST mediante un algoritmo Voraz Iterativo empleando el modelo de corriente alterna(AC). Se considera, además, el uso de enlaces de alto voltaje de corriente directa (HVDC) dentro de la formulación y escenarios sin re-despacho de energía. Los resultados estadísticos de las simulaciones demuestran que el algoritmo propuesto es robusto y competitivo frente a otros métodos del estado del arte. Los sistemas de prueba analizados son Garver 6-nodos, IEEE 24-nodos, Garver HVDC 6-nodos e IEEE HVDC 39-nodos.

**Palabras clave:** PDEST. PEST. Enlaces HVDC. Algoritmo voraz iterativo.

**Abstract:**

The Dynamic Transmission System Expansion Planning (DTSEP) problem provides a more efficient possibility for the investment in new infrastructure in the electrical system. Currently, the use of meta-heuristics leads the solution methods, however, more simple heuristics methods have not been totally explored. In this paper, a heuristic method is proposed to solve the PDEST based on an iterative greedy algorithm using the AC model. The use of high voltage direct current (HVDC) links within the formulation and scenarios without energy re-dispatch, are also considered. The statistical results of the simulations show that the proposed algorithm is robust and competitive against other state-of-art methods. The four analyzed systems are Garver 6-bus, IEEE 24-bus, Garver HVDC 6-bus, and IEEE HVDC 39-bus test systems.

**Keywords:** DTNEP. TNEP. HVDC links. Iterated greedy algorithm.

## Cláusula de Propiedad Intelectual

---

Mateo David Llivisaca Mejia, autor del trabajo de titulación "Planeamiento Dinámico de la Expansión de los Sistemas de Transmisión utilizando un algoritmo Voraz Iterativo", certifico que todas las ideas, opiniones y contenidos expuestos en la presente investigación son de exclusiva responsabilidad de su autor.

Cuenca, 15 de junio de 2022



---

Mateo David Llivisaca Mejia

C.I: 0105713788

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

---

Mateo David Llivisaca Mejia en calidad de autor y titular de los derechos morales y patrimoniales del trabajo de titulación "Planeamiento Dinámico de la Expansión de los Sistemas de Transmisión utilizando un algoritmo Voraz Iterativo" de conformidad con el Art. 114 del CÓDIGO ORGÁNICO DE LA ECONOMÍA SOCIAL DE LOS CONOCIMIENTOS, CREATIVIDAD E INNOVACIÓN reconozco a favor de la Universidad de Cuenca una licencia gratuita, intransferible y no exclusiva para el uso no comercial de la obra, con fines estrictamente académicos.

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

Cuenca, 15 de junio de 2022



---

Mateo David Llivisaca Mejia

C.I: 0105713788

## NOMENCLATURA

### Índices y Conjuntos

$k, l$	Índices de los buses AC.
$i, j$	Índices de los buses DC.
$m$	Índice de los generadores ficticios.
$h$	Índice de los convertidores DC.
$v$	Índice de las líneas DC.
$t$	Índice de etapa.
$T$	Número de etapas analizadas.
$\Omega$	Conjunto de líneas AC candidatas.
$\Gamma$	Conjunto de líneas DC candidatas.
$\Delta$	Conjunto de convertidores AC/DC candidatos.
$\lambda$	Conjunto de nodos en los que se colocan generadores ficticios.
$\Pi$	Conjunto de todas las líneas DC.
$\mathbb{N}$	Conjunto de los números naturales.

### Funciones

$v$	Costo total de líneas, convertidores, compensación (Función Objetivo).
$w^t$	Costo de compensación de reactivos y penalización potencia activa, por etapa.
$c_{DC}^t$	Costo de líneas DC y convertidores, por etapa.

### Parámetros

$A$	Número de años por etapa.
$\alpha_1$	Penalización para la potencia activa no entregada en la etapa $t$ .
$\alpha_2$	Costo de compensación reactiva en la etapa $t$ .
$c_{k,l}^t$	Costo de un circuito AC entre los nodos $k, l$ .
$n_{k,l}^{t,max}$	Número máximo de circuitos permitidos AC.
$cdc_{i,j}^t$	Costo de un circuito DC entre los nodos $i, j$ .
$ndc_{i,j}^{t,max}$	Número máximo de circuitos permitidos DC.
$cc^t$	Costo del convertidor candidato.
$\frac{P_G^t}{P_G^t}$	Mín./Max. Potencia activa de generación.
$\frac{Q_G^t}{Q_G^t}$	Mín./Max. Potencia reactiva de generación.
$\frac{V^t}{V^t}$	Mín./Max. Voltajes en los nodos.
$\bar{S}$	Máxima capacidad de flujo de potencia aparente (MVA).
$P_D^t$	Demanda de potencia activa.
$Q_D^t$	Demanda de potencia reactiva.

### Variables

$d_t$	Tasa de interés.
$p_t$	Año en el cual se debe realizar la inversión.
$r_P^t$	Potencia Activa No Entregada.
$r_Q^t$	Compensación reactiva.
$n_{k,l}^0$	Número de circuitos iniciales AC en la etapa $t$ .
$n_{k,l}^t$	Número de circuitos AC añadidos entre los nodos $k, l$ .
$ndc_{i,j}^0$	Número de circuitos iniciales DC en la etapa $t$ .
$ndc_{i,j}^t$	Número de circuitos DC añadidos entre los nodos $i, j$ .
$V$	Magnitudes de voltaje.
$\theta$	Vector de ángulos de fase.

$P_G^t$	Vector de potencia activa de generación.
$Q_G^t$	Vector de potencia reactiva de generación.
$S^{fr}/S^{to}$	Potencia aparente (MVA) a través de una línea en ambos terminales.
$P(V, \Theta)$	Flujos de potencia activa en función de $(V, \Theta)$ .
$Q(V, \Theta)$	Flujos de potencia reactiva en función de $(V, \Theta)$ .
$P$	Flujo de potencia activa en una línea DC.
$P_{LOSS}$	Pérdidas de potencia activa en una línea DC.
$\bar{P}$	Capacidad máxima de potencia activa [MW].
$P_{CV}$	Potencia activa inyectada por el convertidor.
$P_T$	Potencia activa a través del transformador del convertidor AC/DC.
$Q_T$	Potencia reactiva a través del transformador del convertidor AC/DC.
$g + jb$	Admitancia shunt del bus AC.

### Algoritmo

#### Índices y Conjuntos

$L, e$	Posición de las líneas candidatas y sus etapas.
$Lc, Etp$	Conjunto de posiciones de las líneas candidatas y sus etapas.

#### Variables

$Net_{Data}$	Datos del sistema.
$TS$	Topología solución parcial.
$TS_{inicial}$	Topología solución parcial inicial.
$TS_{test}$	Topología solución de prueba.
$TS_{min}$	Topología solución parcial con el menor costo de líneas.
$TS_C$	Topología solución completa.
$C_T$	Costo de líneas.
$FO$	Valor de la función objetivo, inicial 9e22.
$PANS$	Potencia Activa no Suministrada.
$Pd$	Porcentaje de destrucción de la solución completa.
$Nelim$	Número de líneas a eliminar de la solución completa.

#### Funciones

$Eval$	Evaluación de la función objetivo.
$NdL$	Número de líneas presentes en la topología solución.
$VC/O$	Vector Costo-Ocupación.
$Pos$	Posiciones

## 1. INTRODUCCIÓN

Los sistemas de transmisión de energía eléctrica son construidos de acuerdo a la necesidad energética actual, a una proyección del crecimiento de la carga y el parque de generación. Para esto, el rol del Planeamiento de la Expansión los Sistemas de Transmisión (PEST) resulta fundamental. La resolución del problema clásico del PEST, proporciona la cantidad y lugar de nuevos equipos de transmisión para satisfacer la demanda futura con el mínimo costo de inversión posible [1], [2], [3]. Mientras que el planeamiento dinámico de la expansión de los sistemas de transmisión (PDEST), además, busca conocer el momento adecuado de inversión económica, dentro de un horizonte de planeación [1], [4], [5]. Hasta hace unos años, únicamente se consideraban líneas de corriente alterna como la infraestructura que se debe adicionar al sistema. Sin embargo, dado el avance de la electrónica de potencia y sus aplicaciones, la consideración de enlaces de corriente continua de alto voltaje (HVDC) son una opción viable actualmente [4], [6], [7].

En su forma natural, el PDEST es un problema de optimización no lineal, no convexo, entero-mixto, con una extensa cantidad de variables y complejidad elevada, por lo que el uso de herramientas computacionales es estrictamente necesario. Además, presenta una estructura multi-modal con un gran número de óptimos locales, lo que a menudo conlleva a obtener soluciones locales o de baja calidad [4]. Las técnicas de optimización utilizadas para resolver el PDEST se pueden clasificar en: Matemáticas, Heurísticas y Meta-heurísticas.

**Optimización matemática.**- Garantiza una respuesta óptima global en caso de obtenerla, debido a que solo es viable para problemas convexos. Sin embargo, el costo computacional suele ser demasiado alto, siendo esta característica un inconveniente para sistemas de prueba de mediana o gran escala y sistemas reales [4], [8].

**Optimización Heurística.**- A diferencia de la optimización matemática, su costo computacional es menor, debido a los algoritmos simples que utiliza. Necesita modelarse de acuerdo al problema, es decir, son dependientes del mismo. Su principal inconveniente es enfrascarse en soluciones locales [4], [8].

**Optimización Meta-heurística.**- Surgen a partir de los métodos de optimización heurísticos y su costo computacional es menor a los métodos matemáticos. Cada meta-heurística es independiente del problema y suelen asegurar soluciones óptimas globales o cuasi-óptimas. Actualmente, lideran los métodos para la solución del PEST y PDEST en casos de mediana, gran escala y sistemas reales [4], [8].

Dentro del PDEST se debe diferenciar el problema de expansión, que considera los costos de la nueva infraestructura y el problema de operación, que se refiere a la generación, pérdidas, compensación, contingencias [5]. Para resolver el problema de operación del sistema eléctrico, generalmente son empleados los modelos de corriente continua DC y corriente alterna AC, siendo el segundo el más complejo a nivel computacional, pero a la vez el que mejor representa el comportamiento del sistema eléctrico [4]. En cuanto a los entornos

de programación utilizados para la resolución del problema de optimización, MATLAB es uno de los más usados y conocidos a nivel académico debido a la cantidad de librerías, funciones y la incorporación de "solver" que permiten resolver el PDEST. Sin embargo, en los últimos años el entorno de programación Julia ha tomado relevancia debido a la eficiencia, rapidez y alto rendimiento dentro de la computación científica. Las librerías PowerModels, PowerModelsACDC [9], desarrolladas por ingenieros eléctricos y programadores, análogas a MATPOWER en MATLAB, permiten el cálculo de flujo óptimo (OPF) ya sea en modelo de corriente alterna o continua y con el uso de enlaces HVDC.

En este artículo se propone una formulación general para resolver el PDEST utilizando técnicas de optimización heurística, considerando enlaces HVDC y el modelo de corriente alterna AC. El entorno de programación a utilizarse es Julia en conjunto con el "solver IPOpt". Se utilizarán los sistemas Garver, IEEE 24 nodos, Garver HVDC, IEEE 39 nodos HVDC para demostrar el desempeño de la formulación y método de solución propuestos.

### 1-A. Estado del arte

El planeamiento dinámico o multi-etapa tiene como objetivo, además de minimizar los costos de inversión, definir cuándo debe ser realizada. Esto puede llevar a obtener una adquisición económica en el tiempo más eficiente, de la infraestructura. Se pueden agregar contingencias, costos de generación y otras consideraciones, para obtener planes de expansión más realistas, tal como se observa en [3], [5], [10], [11], [12], [13], [14], [15], [16], [17], [18]. En la actualidad la resolución del PDEST se la lleva a cabo principalmente mediante modelos simplificados basados en métodos matemáticos exactos o en modelos más precisos basados en optimización meta-heurística tales como los presentados en [3], [5], [10], [12] debido a la calidad de sus soluciones, la optimización matemática también es empleada [13], [14], [15], mientras que la optimización heurística es usada como complemento de las anteriores [18], [19] para brindar mayor eficiencia en el proceso o para la resolución del PEST, empleado el modelo de corriente continua DC [16], [17] debido a su menor complejidad. En [11] se propone un modelo híbrido metaheurístico, para resolver el PEST utilizando el modelo AC; se demuestra su eficiencia y robustez, aun sobre las metaheurísticas puras. De los artículos [16], [17] se puede observar que los resultados brindados por los algoritmos heurísticos, son eficientes y robustos. Además, se habla de una reducción del cálculo computacional debido a la simplicidad de los mismos. En [18], [19] se utiliza una heurística para construir la solución inicial del PDEST y posteriormente ejecutar la metaheurística basada en algoritmos genéticos (GA) para encontrar la solución óptima global o soluciones de buena calidad. Se evidencia que la inclusión de la heurística en el proceso inicial reduce el tiempo computacional y los resultados aparentemente serían iguales o mejores que en la literatura analizada. No obstante, no se ha encontrado un algoritmo netamente heurístico que resuelva el problema multi-etapa, empleando el modelo AC.

En cuanto a la inclusión de sistemas de corriente continua de alto voltaje en el problema PEST, en [6], [7], [20], [21], actualmente es necesario proponer modelos considerando líneas de corriente continua, debido a su competitividad y los beneficios que presentan. En los trabajos propuestos actualmente, se usa optimización matemática basada en relajación convexa, programación cónica de segundo orden, o descomposición de Benders. En [6], [7], [20] encuentran la solución del PEST con éxito, sin embargo, la solución del PDEST no obtuvo respuesta dentro del tiempo planteado; para la resolución del problema utilizan el entorno de programación Julia, las librerías PowerModels, PowerModelsACDC y el "solver IPOpt". Se destaca también que [21] resuelve el PDEST utilizando GAMS y el "solver CPLEX".

En el estudio del estado del arte se evidencia que resolver el PDEST utilizando una heurística, con el modelo AC, y considerando enlaces HVDC no ha sido una opción totalmente explorada.

## 2. MODELO MATEMÁTICO

### 2-A. Modelo AC

Partiendo del modelo multi-etapa propuesto en [10], el cual subdivide el problema del Planeamiento Dinámico de la Expansión de los Sistemas de Transmisión (PDEST) en dos sub-problemas: expansión y operación.

En cuanto al problema de la expansión, trata de minimizar el costo de la infraestructura necesaria para la solución al problema. Entiéndase por infraestructura al conjunto de elementos necesarios para cubrir la demanda, ya sea en AC o DC. A continuación se presenta su formulación:

$$\min v = \sum_{t=1}^T \left( \sum_{(k,l) \in \Omega} \left( \frac{c_{k,l}^t * n_{k,l}^t}{(1+d_t)^{p_t}} \right) + w^t \right) \quad (1)$$

$$p_t = A(t-1) \quad (2)$$

Sujeto a la restricción (3)

$$n_{k,l}^0 \leq n_{k,l}^t \leq n_{k,l}^{t,max} \quad n \in \mathbb{N} \quad (3)$$

El problema de operación, considera la potencia activa no suministrada (penalización) y en caso de utilizar compensación reactiva, su costo de implementación, se detalla en la ecuación (4):

$$\min w^t = \sum_{m \in \lambda} \alpha_1 r P_m^t + \frac{\alpha_2 r Q_m^t}{(1+d_t)^{p_t}} \quad (4)$$

Sujeto a las restricciones (5) - (13)

$$P(V, \Theta)^t - P_G^t + P_D^t - r_P^t = 0 \quad (5)$$

$$Q(V, \Theta)^t - Q_G^t + Q_D^t - r_Q^t - r_Q^{t-1} = 0 \quad (6)$$

$$\frac{P_G^t}{\underline{P}_G} \leq P_G^t \leq \frac{P_G^t}{\overline{P}_G} \quad (7)$$

$$\frac{Q_G^t}{\underline{Q}_G} \leq Q_G^t \leq \frac{Q_G^t}{\overline{Q}_G} \quad (8)$$

$$\frac{r_P^t}{\underline{r}_P} \leq r_P^t \leq \frac{r_P^t}{\overline{r}_P} \quad (9)$$

$$\frac{r_Q^t}{\underline{r}_Q} \leq r_Q^t \leq \frac{r_Q^t}{\overline{r}_Q} \quad (10)$$

$$\frac{V^t}{\underline{V}^t} \leq V^t \leq \frac{V^t}{\overline{V}^t} \quad (11)$$

$$S^{fr,t} \leq \overline{S} \quad (12)$$

$$S^{to,t} \leq \overline{S} \quad (13)$$

Las ecuaciones (5), (6) representan el balance de potencias activa y reactiva en los nodos. Las ecuaciones (7), (8) los límites de generación activa y reactiva de los generadores, del sistema. Las ecuaciones (9), (10) representan los límites de los generadores ficticios. Para el caso de potencia activa, se fija entre 0 y 1000 MW, mientras que para la potencia reactiva de compensación entre -1000 y 1000 MVAR. La ecuación (11) indica los límites de magnitud de voltaje en cada nodo, estando permitido entre 0.95 y 1.05 p.u. Finalmente, las ecuaciones (12) y (13) indican el límite de capacidad de las líneas de transmisión.  $r_P^t$  se modela como generadores ficticios de potencia activa en cada nodo de carga donde no exista generación, con una penalización elevada por su uso. De esta manera se pretende que se reduzca el tiempo de convergencia, durante el cálculo de flujo óptimo (OPF).

### 2-B. Modelo Híbrido AC/DC

La transmisión de energía a través de enlaces de corriente continua de alta tensión (HVDC) es mayormente utilizada en aplicaciones como la interconexión de diferentes redes asíncronas, el transporte de grandes cantidades de energía a larga distancia y la transmisión de energía submarina [20]. Es por esto que actualmente el PEST y PDEST debe considerar este tipo de enfoque como en [6], [22]. Debido a la incorporación de una nueva tecnología, es necesario reformular lo propuesto hasta la fecha. Para el problema de expansión se deben considerar los costos de los enlaces HVDC candidatos que se podrán agregar en tres condiciones [6]:

1. Entre dos convertidores existentes.
2. Entre un convertidor existente y un conversor candidato.
3. Entre dos conversores candidatos.

Evidentemente, si se eligen conversores no existentes para la topología solución, se deberá considerar su costo y añadirlo a la función objetivo.

De esta manera la ecuación (1) se modificará, quedando como se indica en la ecuación (14):

$$\min v = \sum_{t=1}^T \left( \sum_{(k,l) \in \Omega} \left( \frac{c_{k,l}^t * n_{k,l}^t}{(1+d_t)^{p_t}} \right) + c_{DC}^t + w^t \right) \quad (14)$$

$$c_{DC}^t = \sum_{(i,j) \in \Gamma} \left( \frac{cdc_{i,j}^t * ndc_{i,j}^t}{(1+d_t)^{p_t}} \right) + \sum_{h \in \Delta} \left( \frac{cc_h^t}{(1+d_t)^{p_t}} \right) \quad (15)$$

Sujeto a (16):

$$ndc_{i,j}^0 \leq ndc_{i,j}^t \leq ndc_{i,j}^{t,max} \quad ndc \in \mathbb{N} \quad (16)$$

En cuanto al problema de operación, su función objetivo representada por la ecuación (4) no se modifica. Sin embargo,



es importante tener en cuenta consideraciones asociadas a los enlaces HVDCs.

El flujo de potencia DC, en una línea  $v$  entre los nodos,  $ij$  es modelado como la suma de los flujos en direcciones contrarias y esto debe ser equivalente a las pérdidas en la línea  $v$ .

$$P_{ij}^t + P_{ji}^t = P_{LOSS,v}^t \quad \forall v \in \Pi \quad (17)$$

Sujeta a:

$$-\bar{P} \leq P_v^t \leq \bar{P} \quad (18)$$

Para el balance de potencias AC y DC en los nodos, se toma en cuenta la ley de corrientes de Kirchhoff. En la parte DC, para un nodo  $i$  se modela la ecuación de balance (19).

$$P_{CVi}^t + P_{ji}^t = -P_D^t \quad (19)$$

En la parte AC, las ecuaciones de balance para un nodo  $k$ , son presentadas en (20) (21):

$$P(V, \Theta)^t + P_{Tf}^t - P_G^t + P_D^t - r_P^t + g^t V^2 = 0 \quad (20)$$

$$Q(V, \Theta)^t + Q_{Tf}^t - Q_G^t + Q_D^t - r_Q^t - r_Q^{t-1} + b^t V^2 = 0 \quad (21)$$

La formulación completa y detallada se presenta en [6], [22].

### 2-C. Potencia Reactiva y Compensación en el PDEST.

La potencia reactiva de compensación, modelada en la ecuación (4) como generadores ficticios, pretende facilitar la resolución del problema de operación [23]. Los costos de la compensación deben ser siempre positivos, independientemente de su naturaleza de generación, capacitiva (positiva) o inductiva (negativa). Es por esto que el coeficiente  $\alpha_2$ , presente en la ecuación (4), se debe modelar para estos dos casos. De esta manera, cuando la inyección de potencia de compensación sea capacitiva, el coeficiente  $\alpha_2$  será positivo, mientras que para potencia de compensación inductiva, el coeficiente  $\alpha_2$  será negativo [10].

## 3. ALGORITMO

Se plantea usar el método Heurístico: Algoritmo Voraz Iterativo.

### 3-A. Algoritmo Voraz Iterativo

Un algoritmo Voraz realiza una elección localmente óptima, saltando en cada iteración a otra solución óptima local, con la expectativa de que al finalizar el proceso, la solución sea un óptimo global [24] [25]. Un algoritmo Voraz Iterativo se basa en dos principios: la destrucción parcial de una solución candidata completa y la posterior reconstrucción de una solución candidata completa [26]. El criterio de destrucción parcial de la solución dependerá del problema.

### 3-B. Solución inicial

Para la construcción de una solución inicial que garantice por lo menos un mínimo local, se utiliza la estrategia "Forward" [27] que consiste en construir la solución añadiendo una línea a la vez. Sin embargo, el carácter del procedimiento es determinista.

### Algoritmo 1 Pseudo código para construir una solución completa

```

1: Entrada:  $TS$ 
2: Entrada:  $Net_{Data}$ 
3:  $Criterio := True$ 
4:  $TS_{inicial} := TS$ 
5: Mientras  $Criterio == True$  Hacer
6:   Para  $[L, e]$  en  $[Lc, Etp]$  Hacer
7:      $TS_{test} := TS_{inicial}$ 
8:     Si  $TS_{test}[L, e] < n_{maxlineas}$  Entonces
9:        $TS_{test}[L, e] : + = 1$ 
10:       $C_T, P_{GenArt} := Eval(S_{test}, Net_{Data})$ 
11:      Si  $C_T < FO$  Entonces
12:         $FO := C_T$ 
13:         $TS_{min} := TS_{test}$ 
14:         $PANS := P_{GenArt}$ 
15:      Terminar Si
16:    Terminar Si
17:  Terminar Para
18:   $TS_{inicial} := TS_{min}$ 
19:  Si  $PANS == 0$  Entonces
20:     $Criterio := False$ 
21:  Terminar Si
22: Terminar Mientras
23:  $TS_C := TS_{min}$ 
24: salida:  $TS_C$ 

```

$S$  representa la matriz solución, con  $Lc$  número de líneas candidatas AC o DC y  $Etp$  la etapa del proyecto.  $n_{maxlineas}$  representa el número máximo de caminos que se pueden construir para una misma línea.  $C_T, P_{GenArt}$  indican: el costo de las líneas añadidas en la solución planteada y la Potencia Activa No Suministrada ( $PANS$ ), respectivamente. Estas dos variables se calculan luego de correr un flujo óptimo AC/DC.

### 3-C. Mejora de Solución

A partir de una solución inicial previamente construida, se eliminan líneas candidatas, de tal manera que se creen soluciones parciales. De esta manera, al terminar el proceso de reconstrucción aplicando el método "Forward", se obtendrá posiblemente, una solución distinta con un costo de líneas menor. El criterio para la eliminación de las líneas, es un índice que relaciona el costo de la línea candidata, el flujo de potencia y su capacidad máxima.

### 3-D. Parámetros del Algoritmo

- Porcentaje mínimo de destrucción de la solución completa. Dentro del algoritmo se define como  $Porc.Min\%$
- Porcentaje máximo de destrucción de la solución completa. Dentro del algoritmo se define como  $Porc.Max\%$
- Número de soluciones parciales creadas con un mismo porcentaje de destrucción: En caso de no existir una mejora, eliminando  $n$  líneas, se vuelven a eliminar otras  $n$  líneas diferentes a las previamente seleccionadas. Dentro del algoritmo se define como  $N^o SolucionesP$

## Algoritmo 2 Pseudo código para construir una solución parcial

- 1: **Entrada:**  $S_C$
- 2: **Entrada:**  $P_d$
- 3:  $NumS := NdL(S_C)$
- 4:  $Nelim := P_d * NumS$
- 5:  $S' := S_C$
- 6:  $NumS' := NdL(S')$
- 7: **Mientras**  $Nelim + NumS' > NumS$  **Hacer**
- 8:  $V_P := VCO(S')$
- 9:  $Coordenadas := Pos(V_P)$
- 10:  $S'(Random(Coodenadas)) - = 1$
- 11:  $NumS' := NdL(S')$
- 12: **Terminar Mientras**
- 13: **salida:**  $S'$

La función VCO, genera un vector ponderado con los índices criterio de cada línea presente en la topología solución. La función Pos, genera un vector de posiciones correspondiente a cada índice criterio, con la posición en la matriz solución.

- Relación entre el máximo y mínimo índice [Costo/Flujo/Capacidad], para crear el vector de decisión ponderado. Dentro del algoritmo se define como  $Rel.MM$
- Criterio de parada: Se plantea un contador de iteraciones máximas permitidas sin encontrar una mejora de la solución. Una vez alcanzado el máximo valor permitido, el algoritmo termina. Se plantea que el número máximo de iteraciones sea variable, dependiendo del número de líneas iniciales, el número de soluciones parciales creadas con un mismo porcentaje y el número de etapas.

### 3-E. Implementación

En la Figura 1 se detalla la implementación propuesta para resolver el PDEST desarrollada en el lenguaje de programación **Julia**, en conjunto con librerías PowerModels[9], PowerModelsACDC [6], JuMP, Distributed, entre otras. Una ventaja que brinda **Julia** es el uso de la paralelización de tareas mediante la programación distribuida [28], que permite la ejecución de acciones utilizando más de un procesador a la vez. Con esto se busca mejorar el tiempo de ejecución del algoritmo Voraz Iterativo, dado que es uno de sus puntos débiles.

### 3-F. Casos de análisis

Se emplean los sistemas Garver e IEEE 24 con la consideración de solo líneas AC; su información completa y detallada, se encuentra en [29]. Para el caso de la implementación de enlaces HVDC se usarán sistemas de 6, y 32 nodos; su información completa y detallada se encuentra en [30]. Se plantea que la tasa de crecimiento de los sistemas eléctricos sea del 20 % cada 5 años, y a su vez, se consideran 3 etapas dentro del plan de expansión. La adición de la nueva infraestructura se la hará al inicio de cada etapa y la tasa de descuento anual, para el proyecto, será del 10 %.

En general se considerarán dos escenarios:

- E1 - Generación activa con Re-despacho: Las centrales operan con flexibilidad de generación.

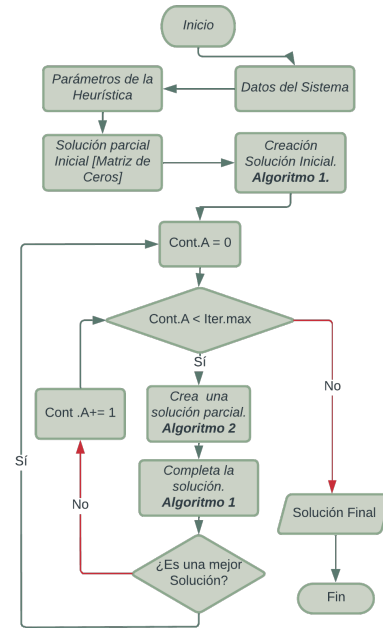


Figura 1. Diagrama de Flujo implementado para resolver el PDEST

- E2 - Generación activa sin Re-despacho: Las centrales simulan ser eólica o fotovoltaica, en donde no se puede regular la generación de energía.

Para cada sistema y escenario analizado, se presentan seis configuraciones de parámetros, elegidas por la información que proporcionan al contrastarlas.

En cuanto a los parámetros ( $Porc.Min\%$ ,  $Porc.Max\%$ ), se toma un valor que asegure como mínimo la eliminación de alguna línea (También se eligen valores fuera del rango, a modo de prueba). Para ello es necesario conocer la primera solución completa que entrega el Algoritmo 1 (Que para un mismo caso, siempre es la misma durante los experimentos). El parámetro  $N^{\circ}SolucionesP$  se elige tomando en cuenta que como máximo, cuando se elimine una línea de la solución completa, se podrá probar k veces el mismo porcentaje de destrucción, siendo k el número de líneas presentes en la solución inicial. Finalmente, el parámetro  $Rel.MM$  toma valores de 6, 10 y 20, a los cuales se les asigna la categoría de ponderación baja, media y alta respectivamente, con valores mayores, anulan el comportamiento aleatorio del algoritmo volviéndolo determinista, mientras que valores menores no implican una diferencia al usar una selección aleatoria. En cada configuración propuesta intervienen los 4 parámetros:  $Porc.Min\%$ ,  $Porc.Max\%$ ,  $N^{\circ}SolucionesP$  y  $Rel.MM$ .

Como resultado se obtiene:

1. Topología solución: Una matriz de enteros, que indica cuantas líneas y en que etapa deben ser añadidas.
2. Costo de las líneas: Costo total de las líneas que deben ser añadidas al sistema.
3. Porcentaje de éxitos: Porcentaje de veces que se repite el menor valor (Función Objetivo) encontrado, durante

los experimentos.

4. Número de evaluaciones de la función objetivo promedio: Número de veces promedio que se evalúa la ecuación 14.
5. Número de iteraciones promedio: número de veces que se ejecuta el algoritmo voraz para construir la solución, a partir de una solución parcial.
6. Tiempo de ejecución: empleado para resolver el PDEST.

El numeral 2. se relaciona con la calidad de solución, mientras menor sea el costo, la solución será óptima. El numeral 3. se relaciona con la robustez del algoritmo; en este artículo se considera un resultado robusto si es mayor al 70 % [11]. Los numerales 4. 5. y 6. se relacionan con la eficiencia del algoritmo. De esta manera, se pueden evaluar los resultados tomando el promedio de diez experimentos para cada caso presentado.

El hardware utilizado tiene las siguientes características: procesador Intel Core i5-7300 HQ CPU @ 2.50 GHz (4 núcleos), 8192 MB de RAM. Se emplearán los 4 núcleos al momento de ejecutar los algoritmos.

## 4. RESULTADOS

### 4-A. Análisis de resultados

#### a) Sistema Garver

Consta de 6 buses, 5 interconectados y uno aislado, con una demanda máxima de 760 MW. Posee 15 líneas candidatas, con un máximo de 5 circuitos por camino, por lo tanto, existen  $(5 + 1)^{15}$  posibles topologías.

En las Tablas I y II se presentan las 6 configuraciones de parámetros para este sistema y el desempeño obtenido para cada una de estas, tanto en formulación estática (E) como dinámica (D). De estos experimentos se puede observar que para la formulación dinámica en el escenario E1 la configuración C5 es la más robusta (100% de éxitos). En cuanto al escenario E2, lo es la configuración C12 (80% de éxitos).

Los resultados en la Tabla III indican que, en el escenario E1, considerando la formulación estática, se adicionan 6 líneas ( $l_{2-6} = 2, l_{3-5} = 2, l_{4-6} = 2$ ) con un costo total de 160 M\$. Para la formulación dinámica, en la primera etapa, se deberán adicionar 4 líneas ( $l_{2-6} = 2, l_{3-5} = 1, l_{4-6} = 1$ ); en la segunda etapa 1 línea ( $l_{4-6} = 1$ ) y finalmente, en la etapa 3, se agrega 1 línea ( $l_{3-5} = 1$ ), con un costo total de 136.33 M\$. En el escenario E2, considerando la formulación estática, se adicionan 8 líneas ( $l_{2-6} = 4, l_{3-5} = 1, l_{4-6} = 2, l_{5-6} = 1$ ), con un costo total de 261.0 M\$. Para la formulación dinámica, en la primera etapa se deberá adicionar 5 líneas ( $l_{2-6} = 3, l_{3-5} = 1, l_{4-6} = 1$ ); en la segunda etapa 2 líneas ( $l_{2-6} = 1, l_{4-6} = 1$ ); finalmente, en la tercera etapa, se agrega 1 línea ( $l_{5-6} = 1$ ) con un costo total de 200.01 M\$.

En los dos escenarios, se evidencia el menor costo de las líneas considerando una formulación dinámica. En el escenario E1, 136.33 M\$ frente a 160 M\$ y en el escenario E2, 200.01 M\$ frente a 261 M\$, para las formulaciones dinámica y estática, respectivamente.

La Figura 2 muestra la convergencia del algoritmo para el escenario E2 usando la formulación dinámica (costo de la función objetivo vs. número de iteraciones) y la configuración C12.

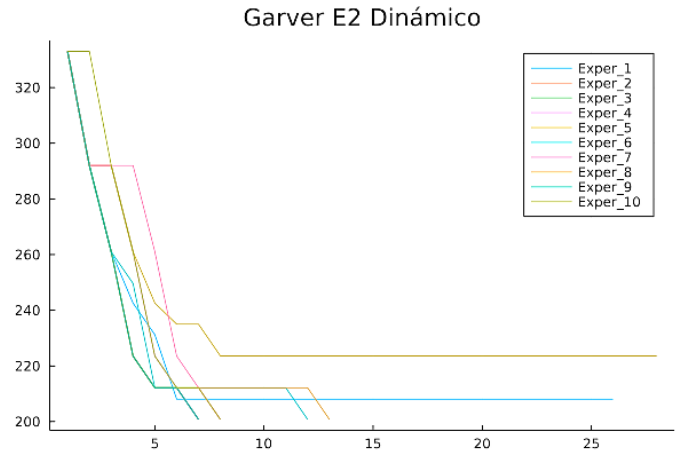


Figura 2. Convergencia del algoritmo usando la configuración C12 para el sistema Garver E2

Las figuras 3 y 4 esquematizan el sistema Garver E2, original (antes de la expansión) y luego de elegir la nueva infraestructura, respectivamente.

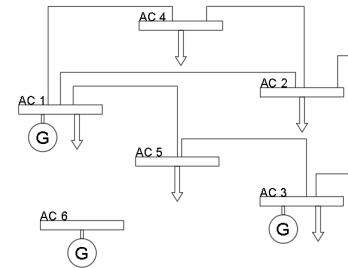


Figura 3. Sistema inicial, Garver E2.

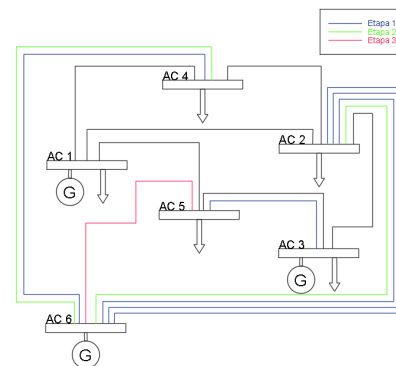


Figura 4. Sistema luego de la adición de nuevas líneas, Garver E2.

Tabla I  
PRUEBAS EN EL SISTEMA GARVER E1

Configuración Formulación	C1		C2		C3		C4		C5		C6	
	E	D	E	D	E	D	E	D	E	D	E	D
Nº SolucionesP		5		3		3		3		1		5
Porc. Mín %		10		15		15		17		17		17
Porc. Max %		20		25		50		35		35		35
Rel. MM		20		10		10		10		10		10
Nº de experimentos	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10
Porcentaje de éxitos %	100	50	100	50	100	60	100	90	100	100	100	70
Valor Mínimo[M\$]	160	136.33	160	136.33	160	136.33	160	136.33	160	136.33	160	136.33
Valor Máximo[M\$]	160	137.26	160	137.26	160	140.13	160	137.26	160	136.33	160	137.26
Nº de Evaluaciones F.O. Promedio	180	468	180	504	180	637	180	695	180	756	180	1092.7
Nº de Iteraciones Promedio	1	3.4	1	4	1	6	1	7	1	7.4	1	14.57
Tiempo Promedio de Ejecución [s]	2.88	8.76	2.9	10.88	3.15	19.02	3.01	20.89	2.95	23.03	3.03	43.36

Tabla II  
PRUEBAS EN EL SISTEMA GARVER E2

Configuración Formulación	C7		C8		C9		C10		C11		C12	
	E	D	E	D	E	D	E	D	E	D	E	D
Nº SolucionesP		5		1		1		4		3		3
Porc. Mín %		17		17		17		17		5		17
Porc. Max %		20		20		35		35		25		25
Rel. MM		6		6		6		6		10		20
Nº de experimentos	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10
Porcentaje de éxitos %	100	50	100	70	100	70	100	60	100	40	100	80
Valor Mínimo[M\$]	261	200.01	261	200.01	261	200.01	261	200.01	261	200.01	261	200.01
Valor Máximo[M\$]	261	223.61	261	225.97	261	225.59	261	225.97	261	223.61	261	215.94
Nº de Evaluaciones F.O. Promedio	275	802.5	306	952.1	324	853	282	822	325	945	278	795
Nº de Iteraciones Promedio	3.3	12.9	4.4	9.4	4.5	9.6	3.8	7.17	6.17	13.5	3.65	8.63
Tiempo Promedio de Ejecución [s]	8.93	54.29	12.97	40.61	12.57	39.14	10.67	26.27	14.99	41.58	10.13	36.59

Tabla III  
SOLUCIÓN SISTEMA GARVER

Escenario	E1			E2				
	Estático	Dinámico		Estático	Dinámico			
Línea[Nodos]								
Etapas	1	1	2	3	1	1	2	3
2 - 6	2	2	0	0	4	3	1	0
3 - 5	2	1	0	1	1	1	0	0
4 - 6	2	1	1	0	2	1	1	0
5 - 6	0	0	0	0	1	0	0	1
Costo[M\$]	160	136.33		261	200.01			

## b) Sistema IEEE 24 nodos

Está compuesto por 24 nodos AC, con una demanda máxima de 8550 MW y 41 líneas candidatas. El número máximo de circuitos permitidos es 5, entonces el número de topologías permitidas es  $(5 + 1)^{41}$ . En las Tablas IV y V se presentan las 6 configuraciones de parámetros, el desempeño obtenido para cada una de estas, considerando las formulaciones estática (E) y dinámica (D), siguiendo el mismo procedimiento que con el sistema Garver. De estos experimentos se puede observar que, analizando la formulación dinámica, para el escenario E1 la configuración C16 presenta mayor robustez, tasa de éxitos de 100% y el menor valor de costo de las líneas. Para el escenario E2, la mayor tasa de éxitos considerando la formulación dinámica la presenta la configuración C23 y

C24 (100%). De estas dos configuraciones, la segunda es la mejor, debido a que emplea menos número de iteraciones, de evaluaciones de la función objetivo y menor tiempo para encontrar la solución mínima.

Los resultados presentados en la Tabla VI indican que en escenario E1, considerando la formulación estática, se deberían añadir 3 líneas ( $l_{6-10} = 1$ ,  $l_{7-8} = 1$ ,  $l_{14-16} = 1$ ) con un costo de 86 M\$. Considerando la formulación dinámica, en la segunda etapa se debe añadir 1 línea ( $l_{6-10} = 1$ ) y en la tercera etapa 2 líneas ( $l_{7-8} = 1$ ,  $l_{14-16} = 1$ ), con un costo total del 36.92 M\$.

Para el escenario E2, considerando una única etapa, se deberán adicionar 4 líneas ( $l_{6-10} = 1$ ,  $l_{7-8} = 2$ ,  $l_{13-14} = 1$ ) con un costo de 110 M\$. Mientras que considerando la formulación dinámica, en la primera etapa se adicionan 1 línea ( $l_{7-8} = 1$ ), en la segunda etapa 1 línea ( $l_{6-10} = 1$ ) y finalmente en la tercera etapa 2 líneas ( $l_{13-14} = 1$ ,  $l_{7-8} = 1$ ), con un costo total de 56.01 M\$.

En los dos escenarios, se evidencia el menor costo de inversión considerando una formulación dinámica. En el escenario E1, 36.92 M\$ frente a 86 M\$ y en el escenario E2, 56.01 M\$ frente a 110 M\$, para las formulaciones dinámica y estática respectivamente.

En la Figura 5 se observa la convergencia del algoritmo para la mejor configuración elegida (C24) en el sistema IEEE 24

Tabla IV  
PRUEBAS EN EL SISTEMA IEEE 24 NODOS E1

Configuración Formulación	C13		C14		C15		C16		C17		C18	
	E	D	E	D	E	D	E	D	E	D	E	D
Nº SolucionesP	2		2		2		2		5		1	
Porc. Mín %	5		15		25		20		20		20	
Porc. Max %	30		35		45		40		40		40	
Rel. MM	10		6		6		6		6		10	
Nº de experimentos	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10
Porcentaje de éxitos %	100	100	100	100	90	100	100	100	50	90	100	100
Valor Mínimo[M\$]	98	98	98	41.55	86	36.92	86	36.92	86	36.92	86	36.92
Valor Máximo[M\$]	98	98	98	41.55	98	36.92	86	36.92	98	41.55	86	36.92
Nº de Evaluaciones F.O. Promedio	320	320	320	1285	564.89	1829.8	577.9	1750.7	574	1842.6	446.9	1767.1
Nº de Iteraciones Promedio	1	1	1	7.3	6.22	15.4	6.4	11.1	7	15.89	3.6	10.7
Tiempo Promedio de Ejecución [s]	2.3	2.3	2.42	120.2	25.52	184.18	29.98	116.92	36.74	167.81	23.25	152.57

Tabla V  
PRUEBAS EN EL SISTEMA IEEE 24 NODOS E2

Configuración Formulación	C19		C20		C21		C22		C23		C24	
	E	D	E	D	E	D	E	D	E	D	E	D
Nº SolucionesP	2		1		2		5		2		1	
Porc. Mín %	10		15		17		17		17		17	
Porc. Max %	20		25		25		35		35		35	
Rel. MM	10		6		10		6		10		10	
Nº de experimentos	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10
Porcentaje de éxitos %	100	100	100	100	100	100	80	100	100	100	100	100
Valor Mínimo[M\$]	187	187	113	57.16	113	57.16	110	56.01	110	56.01	110	56.01
Valor Máxim[M\$]	187	187	113	57.16	113	57.16	113	56.01	110	56.01	110	56.01
Nº de Evaluaciones F.O. Promedio	430	790	680	3442	772.2	3389.2	824.88	2599.7	668	2044	596	1768
Nº de Iteraciones Promedio	1	2	5.2	27.3	4.8	25.4	11	18.9	7.1	13	5.3	10.1
Tiempo Promedio de Ejecución [s]	4.5	9.92	35.32	385.2	32.47	357.56	44.77	140.56	43.32	147.48	37.48	121.11

Tabla VI  
SOLUCIÓN SISTEMA IEEE 24 NODOS

Escenario	E1			E2				
	Estático	Dinámico		Estático	Dinámico			
Línea[Nodos]		1	2	3		1	2	3
Etapas	1	1	2	3	1	1	2	3
6 - 10	1	0	1	0	1	0	1	0
7 - 8	1	0	0	1	2	0	0	2
13 - 14	0	0	0	0	1	0	0	1
14 - 16	1	0	0	1	0	0	0	1
Costo[M\$]	86	36.92		110	56.01			

nodos escenario E2 utilizando la formulación dinámica (costo de la función objetivo vs. número de iteraciones).

### c) Sistema Garver HVDC

El sistema Garver modificado, posee seis nodos AC, cinco interconectados y uno aislado. Una demanda máxima de 750 MW. Como infraestructura candidata, posee una sola línea AC, un sistema HVDC de seis nodos, seis convertidores multi-terminal (uno en cada bus) y 11 líneas DC [30]. Con un máximo de 5 circuitos por camino, existen  $(5 + 1)^{11}$  posibles topologías.

La Tabla VII presenta las 6 configuraciones de parámetros y el desempeño obtenido para cada una de estas, tanto en formulación estática (E) como dinámica (D). Se observa que la

IEEE 24 Nodos E2 Dinámico

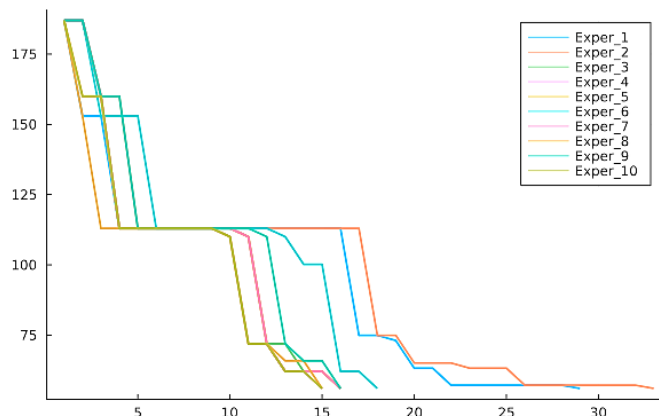


Figura 5. Convergencia del algoritmo para el sistema IEEE 24 nodos E2, utilizando la configuración C24

mayor robustez utilizando la formulación dinámica se obtiene en las configuraciones C30, C25 y C26 (100 % de éxitos); sin embargo, las dos últimas presentan un costo mayor de líneas, por lo que se consideran como soluciones locales.

Los resultados presentados en la Tabla VIII indican que considerando una etapa, se deberán adicionar: 1 línea AC y

Tabla VII  
PRUEBAS EN EL SISTEMA GARVER HVDC E1

Configuración Formulación	C25		C26		C27		C28		C29		C30	
	E	D	E	D	E	D	E	D	E	D	E	D
Nº Soluciones P		1		1		2		1		2		3
Porc. Min %		10		15		17		35		35		35
Porc. Max %		20		25		35		67		67		67
Rel. MM		10		6		6		10		10		6
Nº de experimentos	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10
Porcentaje de éxitos %	100	100	100	100	90	80	50	50	60	80	100	100
Valor Mínimo[M\$]	27	27	27	27	22.7	20.46	22.7	20.07	22.7	20.07	22.7	20.07
Valor Máximo[M\$]	27	27	27	27	25.9	22.34	25.9	22.34	25.9	22.34	22.7	20.07
Nº de Evaluaciones F.O. Promedio	72.1	72.1	72.1	72.1	170.67	787.5	196.8	559.2	146	625.5	158.4	565.2
Nº de Iteraciones Promedio	1	1	1	1	9	12.4	11	18.9	6.5	14.75	8.2	14
Tiempo Promedio de Ejecución [s]	2.22	2.22	2.37	2.37	23.08	110.92	25.93	56.11	22.35	93.26	20.62	65.97

Tabla VIII  
SOLUCIÓN SISTEMA GARVER HVDC E1

Línea[Nodos AC (DC)]	Estático	Dinámico		
Etapas	1	1	2	3
5 - 6	1	1	0	0
(2) - (6)	1	0	1	0
(4) - (6)	1	1	0	0
Convertidores [Nodos DC]				
2	1	0	1	0
4	1	1	0	0
6	1	1	0	0
Inversión [M\$]	22.7	20.07		

2 líneas DC ( $l_{AC(5-6)} = 1$ ,  $l_{DC(2-6)} = 1$ ,  $l_{DC(4-6)} = 1$ ) y los convertidores multi-terminal en los nodos 2, 4, 6, con una inversión de 22.7 M\$. Mientras que considerando la formulación dinámica, en la primera etapa: se adicionan 1 línea AC y 1 línea DC ( $l_{AC(5-6)} = 1$ ,  $l_{DC(4-6)} = 1$ ), los convertidores AC/DC en los buses 4 y 6; en la segunda etapa se adiciona 1 línea DC ( $l_{DC(2-6)} = 1$ ) y un convertidor en el bus 2, con un costo total de 20.07 M\$. Debido a la incorporación de la línea  $l_{DC(2-6)}$  en una segunda etapa.

En la Figura 6 se observa la convergencia del algoritmo para la mejor configuración elegida (C30) en el sistema Garver HVDC utilizando la formulación dinámica (costo de la función objetivo vs. número de iteraciones).

#### d) Sistema 39 nodos HVDC

Consta de 39 buses y una demanda máxima de 8657.23 MW. Como infraestructura candidata para la expansión se consideran enlaces DC: 48 líneas y 8 convertidores multi-terminal ubicados en los nodos 4-1, 8-2, 16-3, 24-4, 30-5, 32-6, 35-7 y 38-8, AC/DC respectivamente. [7] Con un máximo de 5 circuitos por derecho de transmisión, existen  $(5 + 1)^{48}$  posibles topologías.

La Tabla IX presentan las 6 configuraciones de parámetros y el desempeño obtenido para cada una de estas, tanto en formulación estática (E) como dinámica (D). La mayor robustez y la solución mínima, para la formulación dinámica, la obtienen las configuraciones C32 y C33, con 90 % de éxitos. De estos dos conjuntos de parámetros, el primero presenta una ventaja

Garver HVDC E1 Dinámico

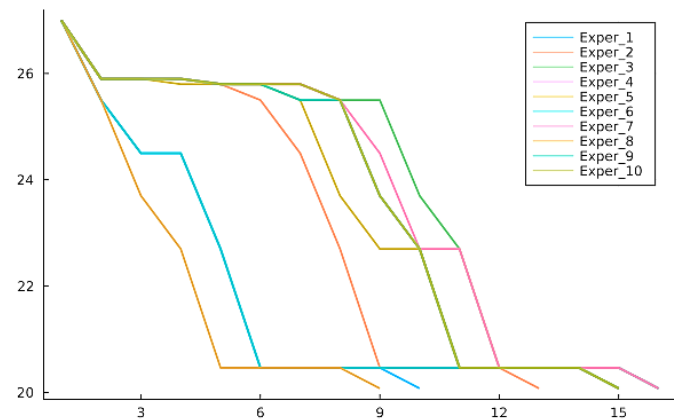


Figura 6. Convergencia del algoritmo para el sistema Garver HVDC E1, utilizando la configuración C30

en cuanto al tiempo de ejecución y número de evaluaciones de la función objetivo.

Los resultados presentados en la Tabla X indican que considerando una etapa, se deberán adicionar 3 líneas ( $l_{DC(1-6)} = 1$ ,  $l_{DC(2-7)} = 1$ ,  $l_{DC(4-5)} = 1$ ) y los convertidores de los nodos DC 1, 2, 4, 5, 6, 7, con un costo de 31.7 M\$. Mientras que considerando la formulación dinámica, en la segunda etapa se adicionan 2 líneas ( $l_{DC(2-7)} = 1$ ,  $l_{DC(4-5)} = 1$ ), los convertidores de los buses DC 2,7,4,5; en la tercera etapa se adiciona 1 línea ( $l_{DC(1-6)} = 1$ ) y sus respectivos convertidores con un costo total de 17.35 M\$. Entonces, se evidencia el menor costo de instalación 17.35 M\$ en la formulación dinámica frente a los 31.7 M\$ considerando una etapa, debido a que las líneas y convertidores deberían ser añadidas en las etapas 2 y 3.

En la Figura 7 se observa la convergencia del algoritmo para la mejor configuración elegida (C32) para el sistema 39 nodos HVDC considerando la formulación dinámica (costo de la función objetivo vs. número de iteraciones).

Tabla IX  
PRUEBAS EN EL SISTEMA IEEE 39 NODOS HVDC E1

Configuración Formulación	C31		C32		C33		C34		C35		C36	
	E	D	E	D	E	D	E	D	E	D	E	D
Nº SolucionesP	1		3		2		2		3		3	
Porc. Min %	15		17		17		17		17		35	
Porc. Max %	25		25		35		35		25		67	
Rel. MM	6		20		10		6		20		10	
Nº de experimentos	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10
Porcentaje de éxitos %	100	100	100	90	100	90	100	60	100	80	100	60
Valor Mínimo[M\$]	31.7	31.7	31.7	17.35	31.7	17.35	31.7	17.35	31.7	17.35	31.7	17.35
Valor Máximo[M\$]	31.7	31.7	31.7	17.65	31.7	17.65	31.7	17.65	31.7	17.65	31.7	17.65
Nº de Evaluaciones F.O. Promedio	288	288	288	1039	288	1056	288	1056	288	1043	288	1079.33
Nº de Iteraciones Promedio	1	1	1	5.4	1	4.33	1	4.33	1	4.25	1	4.5
Tiempo Promedio de Ejecución [s]	18.62	18.62	18.85	194.07	20.91	229.05	20.67	240.77	18.86	195.39	19.28	199.88

Tabla X  
SOLUCIÓN SISTEMA 39 NODOS HVDC E1

Línea[Nodos DC]	Estático	Dinámico		
		1	2	3
Etapas	1	1	2	3
1 - 6	1	0	0	1
2 - 7	1	0	1	0
4 - 5	1	0	1	0
Convertidores [Nodos DC]				
1	1	0	0	1
2	1	0	1	0
4	1	0	1	0
5	1	0	1	0
6	1	0	0	1
7	1	0	1	0
Inversión [M\$]	31.7	17.35		

el sistema Garver escenario E1 dinámico coincide con la obtenida en este trabajo, diferenciándose únicamente por el costo debido a la tasa de descuento anual. En ese artículo, se utiliza una metaheurística híbrida DE-PBLIC para solventar el problema. Para el caso IEEE 24 nodos debido a diferencias del sistema no se llega a una misma respuesta. Mientras que para los sistemas HVDC, al ser la formulación dinámica propuesta nueva, no existen sistemas de prueba analizados. En la Tabla XI se resaltan los tiempos, número de evaluaciones de la función objetivo, número de iteraciones y porcentaje de éxitos para el mejor experimento, de cada caso analizado. El número de evaluaciones de la función objetivo se encuentran dentro de lo aceptable en la literatura. El tiempo de ejecución es relativamente menor, debido al uso del procesamiento en paralelo (4 núcleos) implementado en el algoritmo. El número de iteraciones en algunos casos, como el IEEE 39 nodos y Garver, es reducido, debido a que para esos sistemas la selección de la mejor opción paso a paso, resulta ser a la final, similar a la solución global.

39 Nodos HVDC E1 Dinámico

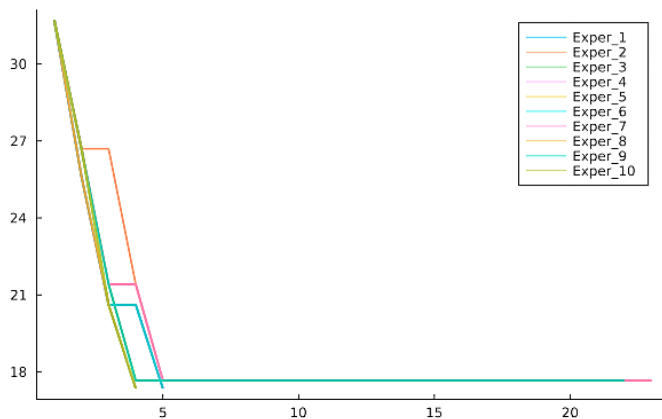


Figura 7. Convergencia del algoritmo para el sistema 39 nodos HVDC E1, utilizando la configuración C32

#### 4-B. Análisis comparativo

Aunque en el estado del arte se presentan artículos con métodos diferentes para la resolución del PDEST, replicar las características exactas de los experimentos realizados en otros trabajos resulta complejo debido a la disponibilidad de información. Sin embargo, en [10] la topología respuesta para

## 5. CONCLUSIONES

Este trabajo presenta un método robusto de solución del PDEST, empleando el modelo de corriente alterna AC y un modelo híbrido AC/DC. De esta manera, la infraestructura que se debe adicionar al sistema podrían ser líneas AC o enlaces HVDC. El método de solución consiste en un algoritmo heurístico Voraz Iterativo, con la opción de procesamiento paralelo. Además, dentro de la formulación propuesta se considera la compensación de reactivos, aunque en los sistemas analizados no se estudió algún caso que agregue esta característica. Para su desarrollo e implementación, se utilizó el entorno de programación Julia, y principalmente las librerías PowerModels, PowerModelsACDC, JuMP e Ipopt.

El uso del modelo AC en la formulación dinámica del algoritmo garantiza una correcta aproximación a los sistemas reales, consideración de potencia reactiva, pérdidas, contingencias, etc. El cálculo de flujo óptimo AC/DC proporcionado por la librería PowerModelsACDC, permite la consideración de enlaces HVDC para la expansión del sistema. Este punto es

Tabla XI  
DESEMPEÑO DEL ALGORITMO PARA LOS CASOS ANALIZADOS (MULTI -ETAPA)

Caso	Garver E1	Garver E2	IEEE 24 E1	IEEE 24 E2	Garver HVDC E1	IEEE 39 E1
Porcentaje de éxitos	100 %	80 %	100 %	100 %	100 %	90 %
Número de Evaluaciones F.O. Promedio	756	795	1750.7	1768	565.2	1039
Número de Iteraciones Promedio	7.4	8.63	11.1	10.1	14	5.4
Tiempo Promedio de Ejecución	23.03 s	39.59 s	116.92 s	121.11 s	65.97 s	194.07 s

importante debido a los beneficios que pueden brindar dichos enlaces en ciertos escenarios.

El algoritmo propuesto consiste en la construcción de la solución para el PDEST adicionando líneas, una a una, mediante la estrategia Forward. En cada escenario presentado, se observa el menor costo de la adición de líneas al momento de considerar el modelo dinámico, frente al estático. Esto debido a que la nueva infraestructura es añadida cuando se la necesita, es decir, en el momento óptimo, que es la característica que diferencia el PDEST del PEST.

En cuanto a la comparación del algoritmo planteado frente a otros trabajos de investigación, se destaca la robustez del mismo al presentar un porcentaje de éxitos igual o mayor al 80 % en todos los sistemas analizados.

De los casos analizados, se observa que los valores de los parámetros de la heurística, para obtener un resultado favorable, dependerán del problema analizado. Si el porcentaje máximo de destrucción de la solución es pequeño, la solución puede no variar, debido a que no se eliminan las suficientes líneas. Si el porcentaje mínimo de destrucción de la solución es muy grande, aunque en algunos casos llegue a la solución óptima, el tiempo, el número de iteraciones y el número de evaluaciones de la función objetivo aumentan, comprometiendo también la tasa de éxitos. La relación MM es proporcional a la probabilidad de elegir la línea con el mayor índice [Costo/Flujo/Capacidad], sin embargo, dicho índice no garantiza que la eliminación de la línea sea correcta.

El re-despacho de energía eléctrica proporciona flexibilidad en la operación del sistema. Se destacan los escenarios E1 y E2, para los sistemas IEEE 24 Nodos y Garver 6 Nodos, de los cuales se observa una mayor inversión cuando no se cuenta con re-despacho en la generación, así mismo el cálculo computacional y tiempo de ejecución aumentan. Considerar este tipo de escenarios, emulan la posibilidad de trabajar con centrales de generación de fuentes de energía renovable como la solar o eólica, que actualmente están tomando mayor relevancia. Para obtener una mayor precisión en la elección de los parámetros de la heurística, se recomienda realizar un proceso de automatización para la selección y comparación de configuraciones, con la finalidad de garantizar la exploración de todas las posibilidades. El trabajo a futuro es emplear el modelo propuesto en sistemas reales y de mayor escala, considerar pérdidas y escenarios con compensación de reactivos, con la finalidad de obtener una visión más real del problema.

## REFERENCIAS

- [1] T. Gonen, *Electrical Power Transmission System Engineering: Analysis and Design, Third Edition*. CRC Press, Aug. 2015. Google-Books-ID: 6KbNBQAAQBAJ.
- [2] H. Mazaheri, H. Ranjbar, H. Saber, and M. Moeini-Aghtaie, "Chapter 2 - Expansion planning of transmission networks," in *Uncertainties in Modern Power Systems* (A. F. Zobaa and S. H. E. Abdel Aleem, eds.), pp. 35–56, Academic Press, Jan. 2021.
- [3] L. E. de Oliveira, P. V. Gomes, and J. P. T. Saraiva, "Transmission Expansion Planning - A broad comparison between static and dynamic approaches," in *2019 16th International Conference on the European Energy Market (EEM)*, pp. 1–5, Sept. 2019. ISSN: 2165-4093.
- [4] 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, Oct. 2019.
- [5] P. Vilaça Gomes and J. T. Saraiva, "A novel efficient method for multiyear multiobjective dynamic transmission system planning," *International Journal of Electrical Power & Energy Systems*, vol. 100, pp. 10–18, Sept. 2018.
- [6] 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, pp. 2980–2990, July 2019. Conference Name: IEEE Transactions on Power Systems.
- [7] J. Dave, H. Ergun, T. An, J. Lu, and D. V. Hertem, "TNEP of meshed HVDC grids: 'AC', 'DC' and convex formulations," *undefined*, 2019.
- [8] J. C. Cortez Aucapiña, "Planificación óptima multietapa de la expansión de los sistemas de transmisión usando el modelo AC," 2018. Accepted: 2018-10-19T12:16:08Z.
- [9] 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)*, pp. 1–8, 2018.
- [10] E. G. Morquecho, S. P. Torres, N. E. Matute, F. Astudillo-Salinas, J. C. Lopez, and W. C. Flores, "AC Dynamic Transmission Expansion Planning using a Hybrid Optimization Algorithm," in *2020 IEEE PES Innovative Smart Grid Technologies Europe (ISGT-Europe)*, pp. 499–503, Oct. 2020.
- [11] E. G. Morquecho, S. P. Torres, and C. A. Castro, "An efficient hybrid metaheuristics optimization technique applied to the AC electric transmission network expansion planning," *Swarm and Evolutionary Computation*, vol. 61, p. 100830, Mar. 2021.
- [12] E. Mortaz and J. Valenzuela, "Evaluating the impact of renewable generation on transmission expansion planning," *Electric Power Systems Research*, vol. 169, pp. 35–44, Apr. 2019.
- [13] J. M. Ramirez, A. Hernandez, and J. A. Marmolejo, "A robust multistage approach to solve the generation and transmission expansion planning problem embedding renewable sources," *Electric Power Systems Research*, vol. 186, p. 106396, Sept. 2020.
- [14] S. Dehghan, N. Amjady, and A. J. Conejo, "A Multistage Robust Transmission Expansion Planning Model Based on Mixed Binary Linear Decision Rules—Part I," *IEEE Transactions on Power Systems*, vol. 33, pp. 5341–5350, Sept. 2018. Conference Name: IEEE Transactions on Power Systems.
- [15] S. Dehghan, N. Amjady, and A. J. Conejo, "A Multistage Robust Transmission Expansion Planning Model Based on Mixed-Binary Linear Decision Rules—Part II," *IEEE Transactions on Power Systems*, vol. 33, pp. 5351–5364, Sept. 2018. Conference Name: IEEE Transactions on Power Systems.



- [16] Z. Wu, X. Du, W. Gu, X.-P. Zhang, and J. Li, "Automatic Selection Method for Candidate Lines in Transmission Expansion Planning," *IEEE Access*, vol. 6, pp. 11605–11613, 2018. Conference Name: IEEE Access.
- [17] Q. Ploussard, L. Olmos, and A. Ramos, "An Operational State Aggregation Technique for Transmission Expansion Planning Based on Line Benefits," *IEEE Transactions on Power Systems*, vol. 32, pp. 2744–2755, July 2017. Conference Name: IEEE Transactions on Power Systems.
- [18] R. P. B. Poubel, E. J. D. Oliveira, L. A. F. Manso, L. M. Honório, and L. W. Oliveira, "Tree searching heuristic algorithm for multi-stage transmission planning considering security constraints via genetic algorithm," *Electric Power Systems Research*, vol. 142, pp. 290–297, 2017.
- [19] P. Vilaça, A. Street, and J. M. Colmenar, "A MILP-based heuristic algorithm for transmission expansion planning problems," *Electric Power Systems Research*, vol. 208, p. 107882, July 2022.
- [20] J. Dave, H. Ergun, and D. Hertem, "Relaxations and approximations of HVdc grid TNEP problem," *Electric Power Systems Research*, 2021.
- [21] M. Moradi-Sepahvand and T. Amraee, "Hybrid AC/DC Transmission Expansion Planning Considering HVAC to HVDC Conversion Under Renewable Penetration," *IEEE Transactions on Power Systems*, vol. 36, pp. 579–591, Jan. 2021. Conference Name: IEEE Transactions on Power Systems.
- [22] J. Rimez, "Optimal operation of hybrid ac/dc meshed grids (optimale uitbating van hybriede vermaasde ac/dc netwerken)," 2014.
- [23] S. Torres Contreras and C. Castro, "Expansion planning for smart transmission grids using AC model and shunt compensation," *Generation, Transmission & Distribution, IET*, vol. 8, pp. 966–975, May 2014.
- [24] T. H. Cormen, C. E. Leiserson, R. L. Rivest, and C. Stein, *Introduction to Algorithms*. Cambridge, MA, USA: MIT Press, 3 ed., July 2009.
- [25] J. Kleinberg and Tardos, *Algorithm Design*. Pearson/Addison-Wesley, 2006. Google-Books-ID: OiGhQgAACAAJ.
- [26] T. Stützle and R. Ruiz, "Iterated Greedy," in *Handbook of Heuristics* (R. Martí, P. M. Pardalos, and M. G. C. Resende, eds.), pp. 547–577, Cham: Springer International Publishing, 2018.
- [27] H. Seifi and M. S. Sepasian, "Network Expansion Planning, a Basic Approach," in *Electric Power System Planning: Issues, Algorithms and Solutions* (H. Seifi and M. S. Sepasian, eds.), Power Systems, pp. 133–154, Berlin, Heidelberg: Springer, 2011.
- [28] A. Sengupta, *Julia high performance: optimizations, distributed computing, multithreading, and GPU programming with Julia 1.0 and beyond*. Birmingham Mumbai: Packt Publishing, second edition ed., 2019.
- [29] I. G. Sanchez, R. Romero, J. R. S. Mantovani, and M. J. Rider, "Transmission-expansion planning using the DC model and nonlinear-programming technique," *IEE Proceedings - Generation, Transmission and Distribution*, vol. 152, no. 6, p. 763, 2005.
- [30] Electa-Git, "Electa-Git/PowerModelsACDC.jl: A hybrid AC/DC OPF package based on PowerModels.jl." <https://github.com/Electa-Git/PowerModelsACDC.jl>, 2019.