

Transmission Network Expansion Planning Considering Uncertainty in Demand with Global and Nodal Approach

N. González-Cabrera , Member, IEEE, D. E. Hernández Reyes , and V. Torres García , Senior Member, IEEE

Abstract— Transmission expansion planning aims to establish when and where to install new infrastructure such as transmission lines, cables, generators and transformers in the electrical power system. The planning must be motivated mainly to satisfy the increase in demand, consequently, increase the reliability of the system and provide non-discriminatory access for generators and consumers to the electrical grid. In this sense, this work aims to propose a methodology to handle demand uncertainty by reducing scenarios through the K-means clustering algorithm, which is used to construct representative demand curves that allow using a static model of stochastic linear optimization with less computational effort, which seeks to minimize the investment and operating costs of the electrical system, meeting the total demand of the system. The global demand and nodal demand approach of the system is compared, observing the behaviour of investment and operating costs, as well as their advantages. The results demonstrate that the formulation can be estimate the number of scenarios through mathematical metrics and the global demand approach has the advantage of only needing data on the behaviour of the total demand of the system.

Link to graphical and video abstracts, and to code: <https://latam.ieeer9.org/index.php/transactions/article/view/8994>

Index Terms—Stochastic, Transmission Network Expansion Planning, Uncertainty, Liner Optimization, Cluster.

NOMENCLATURA

b_l	Susceptancia serie de la línea l , de signo negativo
c_g	Costo fijo de generación del generador g
c_l	Costo de inversión de la línea l
c_T	Costo total
$D(x)$	Distancia más corta de un dato x al centroide más cercano
p^s	Peso asociado al escenario s
PG_g	Potencia activa generada por el generador g
P_l	Flujo de potencia activa en la línea l
PD_n	Potencia activa demandada en el nodo n

The associate editor coordinating the review of this manuscript and approving it for publication was Ricardo Arias Velásquez (Corresponding author: Nestor Gonzalez-Cabrera).

This work was supported by the project UNAM PAPIIT IA 104623.

N. Gonzalez-Cabrera, and D. H. Reyes are with the National Autonomous University of Mexico, Ciudad de Mexico, Mexico (e-mails: nestorgc@fb.unam.mx, and DanielE_Hdz_Reyes@outlook.com).

V. T. Garcia is with National Technology of Mexico (TecNM) / IT Morelia, Av. Tecnológico 1500, Morelia, Mex. (e-mail: v.torres@ieeee.org).

p_l^{max}	Capacidad máxima de potencia activa de la línea l
p_C	Probabilidad asociada al centroide del clúster C
M_l	Constante disyuntiva del método de la gran M
Ω_g	Conjunto de generadores
Ω_l	Conjunto de líneas de transmisión existentes
Ω_{l+}	Conjunto de líneas de transmisión candidatas
Ω_n	Conjunto de nodos del sistema
Ω_d	Conjunto de nodos de cargas del sistema
θ_i, θ_j	Ángulo de fase del nodo i y el nodo j , respectivamente
k	Número de clústeres
z_l	Variable binaria de decisión de inversión de la línea candidata l

I. INTRODUCTION

La relevancia del Problema de Expansión de la Transmisión (PET) de los sistemas eléctricos ha motivado un esfuerzo significativo en la investigación en esta área durante las últimas décadas. En 1970 se propuso un problema de Programación Lineal (PL) [1] que determina los planes de expansión de la transmisión basado en el problema de transporte. Desde entonces, muchas contribuciones relevantes han sido publicadas basadas en la programación matemática [2].

Se han planteado dos formas de resolver el PET [3]. El primer conjunto se basa en métodos interactivos, que son la manera tradicional de evaluar el PET. En esta se incorpora la experiencia del Operador del Sistema de Transmisión (OST) en el proceso de planificación. El segundo conjunto son los métodos automáticos, que emplean criterios de optimización o reglas de expansión sin mucha intervención humana en el cálculo. Los métodos de optimización en los que se encuentran los métodos matemáticos son los modelos mayormente usados en la literatura [3]. Los principales métodos de optimización matemática se encuentra la Programación Lineal (PL) [1], la Programación No Lineal (PNL)[4], Programación Lineal Entera Mixta (PLEM) [5], Descomposición de Benders (DB)[6].

De aquí que los métodos de optimización se pueden clasificar en diversos enfoques: determinista, probabilísticos y de incertidumbre. Los modelos deterministas incluyen un conjunto de valores predefinidos para parámetros específicos y estos son considerados inmutables, como lo es la generación, la demanda, el comportamiento del mercado, entre otros. Los

modelos probabilísticos permiten representar los parámetros aleatorios empleando la teoría de la probabilidad. En los modelos de incertidumbre se considera que los parámetros son afectados por la carencia de conocimiento de estos, por lo que no pueden representarse por la teoría de la probabilidad [7]. Aunque los enfoques probabilísticos y basados en incertidumbre representan de mejor manera al sistema eléctrico, aún se continúa empleando los modelos deterministas [8], aunque los modelos tradicionales de PET determinísticos son mucho más sencillos de resolver, estos no son capaces de capturar el comportamiento estocástico de un sistema eléctrico y, en algunas situaciones pueden proveer inversiones subestimadas o sobreestimadas y planes de expansión irreales [7]. El PET es estocástico por su naturaleza debido a la incertidumbre que caracteriza a las variables fuentes de energía renovable y el comportamiento de la demanda en periodos de largo plazo. Algunas otras incertidumbres que impactan a las nuevas líneas en la operación del sistema son la afluencia hidrológica, los costos de combustible o los costos de emisión de carbono. Sin embargo, resolver este problema es considerablemente complejo [9].

En el contexto de la incertidumbre, se puede plantear de manera analítica, por medio de conjuntos de incertidumbre ó representaciones con escenarios. El primero se presenta por medio de una función de densidad probabilística y para su solución se emplea la optimización de restricciones de azar [10]. El segundo, cuando se tiene uno o varios conjuntos de rangos de variables inciertas, se emplea la programación robusta con el propósito es optimizar bajo el peor escenario [11]. El tercer enfoque es cuando la incertidumbre de una o varias variables se representa por medio de escenarios [12], la técnica de programación estocástica es la que emplea este enfoque.

En el análisis estocástico, hay dos métodos para disminuir la carga computacional que involucra una gran cantidad de datos que emplea este enfoque. Uno es mejorar el algoritmo de optimización matemática y el otro es por medio de las técnicas de reducción de escenarios. La herramienta de minería de datos ampliamente utilizada para este fin es el algoritmo de agrupamiento K-means [13], el algoritmo emplea un criterio de error cuadrático. Comienza con una partición inicial y realiza la reasignación de muestras a agrupar (clústeres), basado en la similitud entre las muestras y los clústeres, hasta que un criterio de convergencia es alcanzado [14]. Dentro de los parámetros de incertidumbre en la operación de los sistemas eléctricos, se encuentran los cambios continuos y el crecimiento de la demanda como la principal fuente de incertidumbre. En [15] se estudia la incertidumbre en la demanda en el PET de manera independiente y al comparar el enfoque de utilizar la demanda total de un sistema y el enfoque de demanda individual de cada nodo se presentan dos modelos matemáticos, uno para cada enfoque. En estos dos modelos matemáticos, la demanda global y nodal se consideran como restricciones del modelo de optimización y como dato los valores de demanda máximos, promedios y mínimos total del sistema y de cada nodo. Estos modelos se resuelven empleando un Algoritmo Genético Especializado (AGE). De la revisión del estado del arte podemos apreciar las diversas técnicas utilizadas para resolver el PET, el enfoque es propuesto para un crecimiento de la demanda global, sin embargo, debido a la diversidad de los

datos de crecimiento de la demanda, algunos sectores crecen de manera acelerada comparada con otros nodos trayendo inversiones innecesarias o mal focalizadas.

En este trabajo se propone una metodología para evaluar el PET estocástico desde el punto de vista nodal como principal fuente de incertidumbre, por medio de la representación de escenarios. Las nuevas líneas a invertir, se emplean como variables de decisión dentro del modelo de programación estocástica lineal como técnica de optimización matemática para resolver el problema PET. Así mismo, se utilizan técnicas de agrupamiento y se comparan para evaluar los resultados. El sistema de seis nodos de Garver y el sistema IEEE RTS de 24 nodos son utilizados para evaluar la metodología propuesta.

En la Sección II se muestra la formulación estocástica considerando incertidumbre de la demanda. En la Sección III presenta el método propuesto que evalúa la técnica de optimización lineal estocástica empleando la reducción de escenarios por medio del algoritmo K-means. En la Sección IV se aplica el modelo propuesto en el sistema de Garver e IEEE RTS-24. Finalmente, en la Sección V se presentan las conclusiones de los resultados obtenidos.

II. MODELO PET PROPUESTO CONSIDERANDO INCERTIDUMBRE EN LA DEMANDA

El modelo del PET clásico [2] y [16], puede ser formulado considerando la incertidumbre en la demanda empleando el Modelo Determinista Equivalente (MDE), como se muestra a continuación.

$$c_T = \min c_l^T z_l + \sum_{s \in S} p^s \sum_{g \in \Omega_g} (c_g^s * PG_g^s) \quad (1)$$

Sujeta a:

$$\sum_{l \in \Omega_l^n} P_l^s + \sum_{g \in \Omega_g^n} PG_g^s = \sum_{d \in \Omega_d^n} PD_d^s, \quad (2)$$

$$\forall n \in \Omega_n$$

$$P_l^s = -b_l \theta_l^s, \quad \forall l \in \Omega_l \quad (3)$$

$$-(1 - z_l)M_l \leq P_l^s + b_l \theta_l^s \leq (1 - z_l)M_l, \quad (4)$$

$$\forall l \in \Omega_{l+}$$

$$-P_l^{max} \leq P_l^s \leq P_l^{max}, \quad \forall l \in \Omega_l \quad (5)$$

$$-z_l P_l^{max} \leq P_l^s \leq z_l P_l^{max}, \quad \forall k \in \Omega_{l+} \quad (6)$$

$$PG_g^{min} \leq PG_g^s \leq PG_g^{max}, \quad \forall g \in \Omega_g \quad (7)$$

$$\theta_{ref} = 0^\circ \quad (8)$$

La función objetivo (1) considera la primera etapa como el costo de inversión de las nuevas líneas de transmisión, la segunda etapa como la suma ponderada del costo de operación en cada escenario s . La ponderación de cada uno de ellos corresponde a la probabilidad de ocurrencia p^s . Esta función objetivo está sujeta a las restricciones (2) – (8). La restricción (2) es el balance de potencia en cada nodo donde la potencia de generación y la potencia de demanda dependen de cada escenario, en cada uno de los nodos del sistema n , (3) establece la potencia activa que circula a través de las líneas existentes, la restricción (4) establece el flujo de potencia de las líneas de transmisión candidatas, empleado la constante disyuntiva del método de la Gran M para linealizar el modelo, en (5) son los

límites de capacidad máximo y mínimo de las líneas de transmisión existentes, la restricción (6) establece los límites de capacidad máximo y mínimo de las líneas de transmisión candidatas, en (7) se refiere a los límites máximo y mínimo de producción en cada unidad de generación y finalmente, en la restricción (8) se selecciona el nodo de referencia.

Considerando la complejidad del problema, el modelo de red en CD es utilizado considerando únicamente la incertidumbre en la demanda, por lo que la generación y el flujo de potencia dependen de cada escenario, no así la impedancia de las líneas que se mantienen constantes. La función objetivo minimiza el costo total que depende del costo de la inversión total de líneas candidatas y la expectativa de una serie de casos operativos diferentes, cada uno ponderado por un peso p^s . El superíndice s denota las variables y parámetros que son dependientes de cada escenario.

Validación del Modelo

A continuación, se presenta la validación del modelo TNEP estocástico para asegurar resultados del modelo propuesto, se toman las características del sistema de seis nodos de Garver [1] y se comparan con [12]. En la Tabla I se presentan los resultados del modelo estocástico.

TABLA I
VALIDACIÓN DEL MODELO ESTOCÁSTICO

Modelo	Líneas	Inversión [SMM]
Estocástico	2 x (3-5)	120
	2 x (2-6)	
	2 x (4-6)	
[12]	2 x (3-5)	120
	2 x (2-6)	
	2 x (4-6)	

De la Tabla I odemos observar que el número de líneas obtenidas de la solución, son 6 nuevas lineasen operación, dos por corredor. Así mismo, el costo de inversión de las 6 líneas es de 120 \$MM

III. MÉTODO PROPUESTO

La metodología propuesta en este trabajo se compone de dos etapas principales. La primera es la obtención de los datos de demanda y su tratamiento previo a la optimización. Los datos utilizados en este trabajo son datos históricos de la demanda del sistema ERCOT [18].

Posteriormente, todas las mediciones de demanda son normalizadas con respecto al valor pico de demanda anual. Una vez que se tiene el conjunto de datos normalizados, se pueden conformar las curvas de demanda diaria para cada uno de los 365 días del año. Se utiliza el patrón de estas curvas para representar diferentes comportamientos de demanda obteniendo un conjunto de curvas representativas para el sistema. Ciertos nodos de carga comparten las mismas curvas de demanda horaria, pero se diferencian entre sí considerando desfases de una hora para simular comportamientos distintos. Para la demanda global, se considera las curvas de demanda horaria total del sistema ERCOT que se reparte de manera proporcional a cada uno de los nodos del sistema.

Una vez determinadas las curvas de comportamiento de la demanda por nodo y global en cada uno de los casos de estudio,

el siguiente paso es la reducción de escenarios, que es realizada por medio del algoritmo de agrupamiento K-means. Para este algoritmo en particular, se debe especificar el número de clústeres a los que se desea agrupar los datos. Esto puede resultar complicado especificar sin alguna clase de referencia. Sin embargo, existen métodos para determinar este número que depende de la forma en que están dispersos los datos.

En este trabajo se emplea el método matemático de la Silueta [19] que puede ser tomado como un valor de referencia. Una vez determinado el número de clústeres (el número de curvas representativas de demanda horaria) se puede emplear el modelo PET estocástico para obtener el plan de expansión, que especifica el costo de inversión, el costo de operación, la ubicación y la cantidad de líneas a invertir. En la Fig. 1 se resume de manera gráfica la metodología descrita anteriormente.

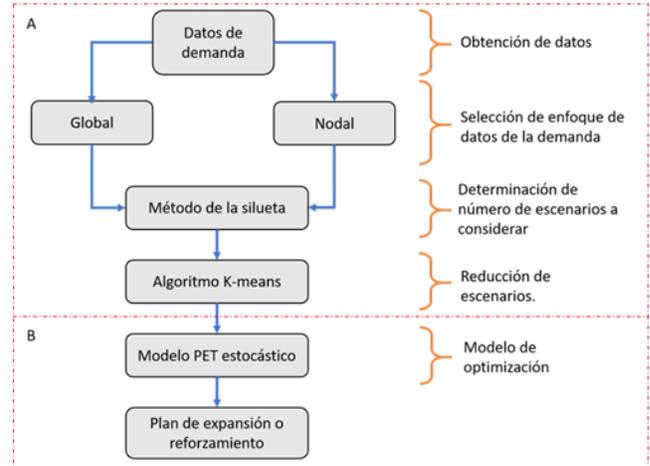


Fig 1. Descripción gráfica de la metodología propuesta. A) Etapa de reducción de escenarios, B) Etapa de optimización.

El modelo PET propuesto tiene el enfoque de planificación estático, es decir, las decisiones de inversión se toman al final del periodo considerado, que en este trabajo corresponde a un periodo anual. El manejo de los datos de demanda históricos, la aplicación del algoritmo de agrupamiento K-means y la solución del problema de optimización estocástico del modelo PET se lleva a cabo por medio del software MATLAB® [20], un sistema de cómputo numérico con un entorno de desarrollo integrado (IDE).

A. Algoritmo de Agrupamiento K-means++

El algoritmo de K-means++ es una de las variantes del algoritmo clásico que busca mejorar el desempeño del agrupamiento. El algoritmo es un método heurístico para encontrar el centroide para el agrupamiento de clusters. De acuerdo con [19], este cluster mejora el tiempo de ejecución, y la calidad de la solución final. El algoritmo es el siguiente:

- Se escoge un centroide inicial c_1 uniformemente de forma aleatoria del conjunto de datos X .
- Se selecciona el siguiente centroide c_i seleccionando $c_i = x' \in X$ con probabilidad:

$$p_c = \frac{D(x')^2}{\sum_{x \in X} D(x)^2} \quad (9)$$

- Se repite el paso anterior hasta que se seleccionen todos los k centroides.

d) Se procede con el algoritmo de K-means estándar.

Una vez determinadas las curvas de comportamiento de la demanda por nodo, el siguiente paso es la reducción de escenarios, por medio de K-means.

B. Etapa de Optimización

Una vez determinado el número de clústeres se emplea el modelo PET estocástico para obtener el plan de expansión estocástico, que especifica el costo de inversión, el costo de operación, la ubicación y la cantidad de líneas a invertir, que se describe en la Fig. .

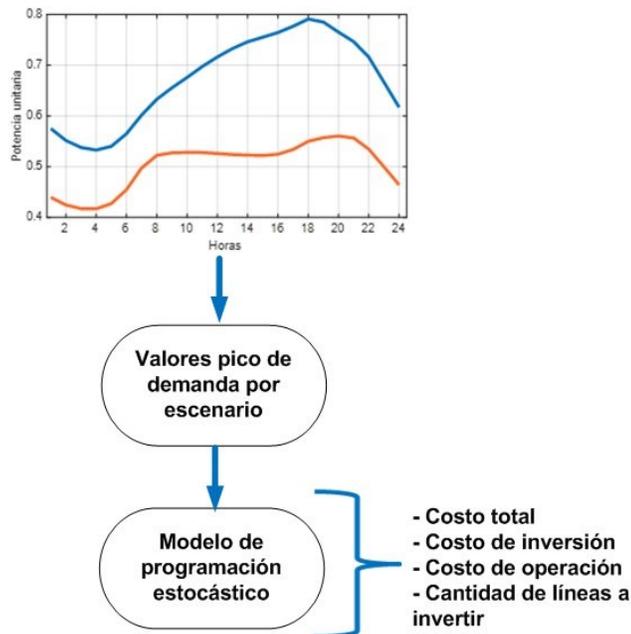


Fig. 2 Etapa de optimización por medio de la técnica de programación estocástica.

El modelo PET propuesto tiene el enfoque de planificación estático, es decir, las decisiones de inversión se toman al final del periodo considerado, que en este trabajo corresponde a un periodo anual. El manejo de los datos de demanda históricos, la aplicación del algoritmo de agrupamiento K-means y la solución del problema de optimización estocástico del modelo PET se lleva a cabo por medio del software MATLAB® [19].

IV. CASO DE ESTUDIO

La metodología utilizada para identificar las nuevas líneas a invertir en el sistema eléctrico es analizada considerando el sistema de Garver y el sistema IEEE RTS de 24 nodos. Los casos de estudios para validar la propuesta se consideran:

Caso 1: Modelado estocástico de la demanda del sistema.

Caso 2: Modelado estocástico nodal.

Para probar ambos sistemas de potencia se tomaron en cuenta las siguientes estrategias:

- ✓ El horizonte de planificación es de un año. Se considera una sola etapa de inversión de un año, recordando que el modelo es estático.
- ✓ La generación es considerada de plantas convencionales por lo que la incertidumbre en la generación no es tomada en

cuenta.

- ✓ Se considera que las plantas generadoras siempre se encuentran disponibles en el horizonte de planificación.
- ✓ El perfil de demanda fue tomado del ERCOT [18]. La Fig. 3 muestra el perfil de demanda a considerar.
- ✓ Para el enfoque de demanda global, se consideraron los patrones de las curvas de demanda diarias totales del sistema ERCOT.
- ✓ Para cada uno de los nodos de carga, en el enfoque de incertidumbre de demanda nodal, se le asigna un patrón de demanda de una zona del sistema ERCOT, con el propósito de representar mejor la variabilidad en cada nodo del sistema.
- ✓ Para el caso de Garver, se analizan los resultados obtenidos empleando un número de clústeres desde $k = 2$ hasta $k = 5$, despreciando los valores mayores a 5.

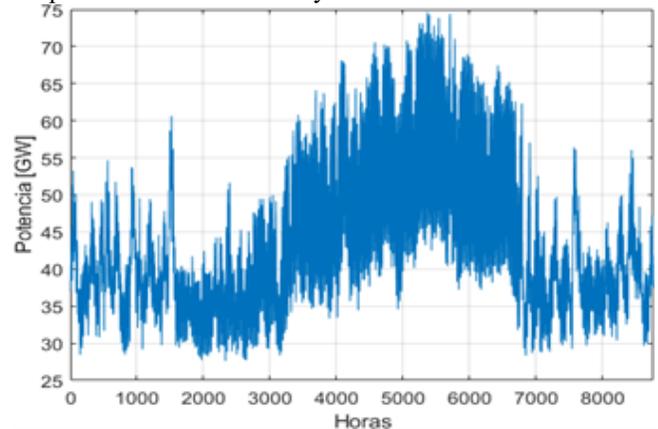


Fig. 3. Perfil de demanda anual del sistema ERCOT del año 2019 [18].

- ✓ Para la selección del número de escenarios, se realizó con el Método del Coeficiente de Silueta (CS) [20], tomando el rango de valores desde $k = 2$ hasta $k = 10$ [12] (Fig 4). Donde $k = 2$ es el número de cluster más adecuado para agrupar patrones definidos para el conjunto de datos empleados [22]. El criterio establece que el número de clústeres que presenta el mayor valor de CS corresponde a la mejor selección.

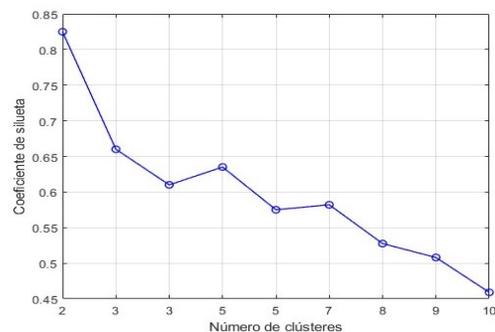


Fig. 4. Coeficiente de Silueta de los datos de demanda del sistema ERCOT.

A. Sistema de Garver

Los principales datos de generación, transmisión e inversión de los nuevos proyectos, para aplicar la metodología propuesta es

tomada de [1]. La Tabla II presenta los resultados obtenidos con el modelo propuesto tomando el enfoque de incertidumbre en la demanda de forma global. Se compara los resultados con diversos números de clústeres de 2 hasta 5 para observar el comportamiento del modelo.

TABLA II
RESULTADOS DEL MODELO ESTOCÁSTICO PARA LA DEMANDA GLOBAL CASO GARVER

Modelo	Líneas	Inversión [SMM]	Operación [SMM]	Total [SMM]
Estocástico K=2	4	110	141.78	251.78
Estocástico K=3	4	110	141.88	251.88
Estocástico K=4	5	130	140.61	270.61
Estocástico K=5	5	130	142.99	270.99

En la Fig. 5 se muestra el costo total compuesto por los costos de inversión y de operación para observar la proporción de estos en el costo total, para el análisis de demanda global del sistema.

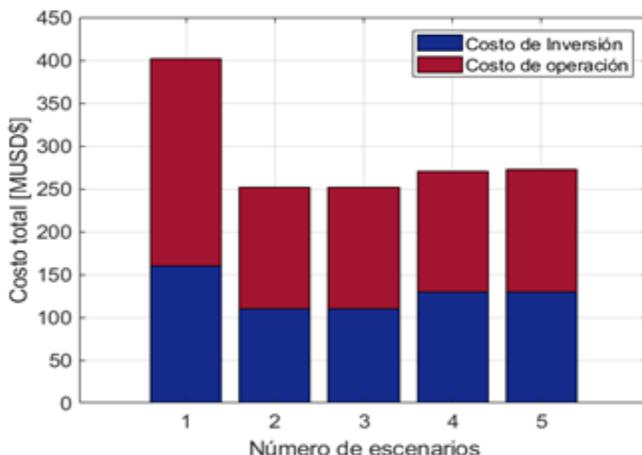


Fig. 5. Costo total para el enfoque global en caso Garver.

Se observa que para un número de clúster igual a 2, tiene un menor costo total del sistema en comparación con los escenarios restantes, considerando que se obtiene el resultado más confiable al considerar una mejor representatividad de los datos de entrada de acuerdo con la referencia del Coeficiente de Silueta.

Utilizando el enfoque global, para cada uno de los nodos de carga es necesario contar con los perfiles de demanda diaria a lo largo de un año, para el caso de estudio del sistema de Garver. De acuerdo a la metodología obtenemos curvas representativas para cada nodo del sistema. A manera de ejemplo, en la Fig. 6 se muestran los perfiles de demanda diarios normalizados para el nodo 4, de manera similar se aplico para los nodos de carga restantes del sistema.

En la Tabla III se muestran los resultados obtenidos con el modelo propuesto tomando el enfoque de incertidumbre en la demanda nodal para el sistema de Garver.

TABLA III
RESULTADOS DEL MODELO ESTOCÁSTICO PARA LA DEMANDA NODAL DEL CASO GARVER

Modelo	Líneas	Inversión [SMM]	Operación [SMM]	Total [SMM]
Estocástico K=2	3	80	129.74	209.74
Estocástico K=3	3	80	135.67	215.67
Estocástico K=4	4	110	138.50	248.50
Estocástico K=5	4	110	141.62	251.62

Podemos apreciar que para $k=2$ y $k=3$, tres nuevas líneas son requeridas para este análisis, por otro lado al considerar un mayor número de cluster las líneas nuevas se incrementan. Adicionalmente el costo de operación para $k=2$ es de 129.74 \$MM.

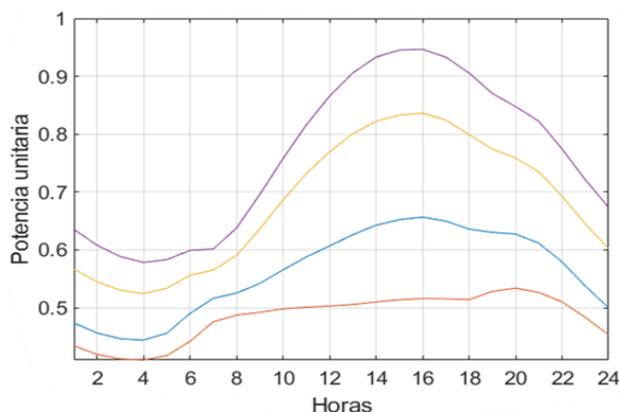


Fig. 6. Perfil de demanda representativo $k=4$ con el enfoque nodal para el caso Garver (nodo 4)

En la Fig. 7 se muestra el costo total compuesto por los costos de inversión y de operación. Se observa que los costos son menores considerando 2 clústeres que coincide con el resultado de referencia del Coeficiente de Silueta. El resultado de considerar este número de clústeres es tomado como la mejor solución para esta solución.

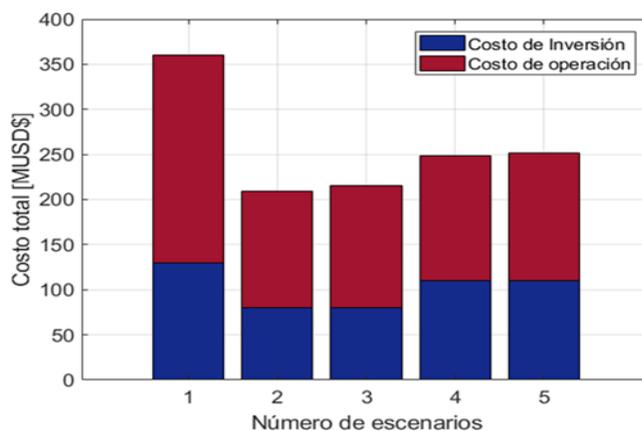


Fig. 7. Costo total para cada escenario para enfoque nodal para el caso Garver

Finalmente, se utilizó el sistema de Garver para validar y comparar el modelo propuesto, se consideraron un número de clústeres desde $k = 2$ hasta $k = 5$, tanto para el enfoque global como para el enfoque nodal.

La Fig. 8 presenta los tiempos de ejecución de la metodología aplicada en este trabajo. Se observa que son crecientes en ambos enfoques, resultando que el enfoque de demanda nodal presenta mejores tiempos para el rango de clústeres considerados de 2 a 5.

En la Tabla IV se comparan los costos de inversión, de operación, total y el tiempo de ejecución para un número de clúster igual a 2 utilizando el modelo PET estocástico global y nodal.

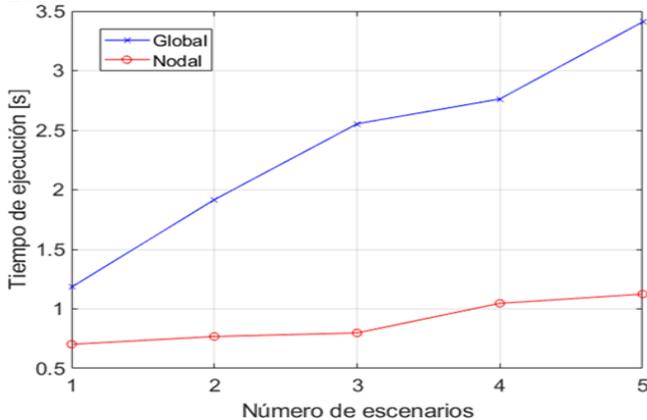


Fig. 8. Tiempo de ejecución del modelo propuesto para ambos enfoques para el caso Garver

Comparando el enfoque global contra el nodal, se muestra que si se considera un incremento de la demanda total del sistema se requiere un mayor número de líneas que solo considerando la incertidumbre de la demanda en dos nodos del sistema.

TABLA IV
COMPARACIÓN DE RESULTADOS: ESTOCÁSTICO GLOBAL Y NODAL CASO GARVER

Modelo	Líneas	Inversión [SMM]	Operación [SMM]	Total [SMM]
Global K=2	2 (2-6) 3-5 4-6	80	129.74	209.74
Nodal K=2	2 (2-6) 3-5	80	135.67	215.67

Finalmente el enfoque nodal resulta ser más económico que el análisis de la incertidumbre global, debido a que se invierte en una menor cantidad de líneas. Debido a que la inversión es focalizada para atender un crecimiento en la demanda específico es decir, a nivel regional. En cambio, en el segundo se trata de resolver el crecimiento de demanda generalizado, lo que puede resultar en una inversión mayor.

B. IEEE RTS 24 nodos

Para probar la metodología propuesta en una red de mayor tamaño se considera el sistema IEEE RTS-24 donde los datos de demanda, generación y transmisión son tomados de [23]. El sistema se compone de 24 nodos de carga/generación, 32 unidades de generación y 38 líneas de transmisión existentes (5 de ellas son autotransformadores). Se definen dos zonas caracterizadas por su nivel de voltaje (Zona 1 – 138 kV y Zona 2 – 230 kV). Para las líneas de transmisión se utilizan como referencia los datos de [24]. Los costos de inversión de las líneas

de transmisión están expresados en millones de dólares (SMM). Para este caso de estudio, se consideran 8 líneas de transmisión candidatas. Se ha considerado un aumento de la demanda del 20% en la Zona 1 de 138 kV para el análisis. Se han reducido la capacidad de transmisión máxima de las líneas de transmisión existentes 15-24, 11-14, 11-13, 12-23 y 12-13 de 500 MW a 150 MW con la finalidad de estresar la red de transmisión y generar la necesidad de expansión de la transmisión. Adicionalmente, para este caso de estudio se utilizan los mismos parámetros aplicados al modelo clásico para referencia y validación de los resultados. Para los escenarios estocásticos se considera $k=2$.

El modelo clásico (determinista) requiere de tres nuevos elementos de transmisión en los corredores 11-13, 12-23 y 15-24. Con una inversión de 74.47 SMM y 2091.40 SMM en costos de operación. Por otro lado, el resultado con enfoque global requiere una nueva línea en el corredor 15-24. En cambio, en el enfoque nodal se invierte en la línea 11-14 y 15-24. En la Tabla V se comparan los resultados obtenidos

La comparación nos permite apreciar una disminución en el número de líneas a invertir y en el costo de inversión. Se observa una reducción del costo de operación del sistema. De aquí que se tiene una disminución en los costos de inversión, de operación y, por tanto, en el costo total empleando el modelo PET propuesto contra el modelo PET determinista.

COMPARACIÓN DE RESULTADOS DEL SISTEMA DE 24 NODOS

Modelo	Líneas	Inversión [SMM]	Operación [SMM]	Total [SMM]
Clásico	11-13 12-23 15-24	74.47	2091.40	2165.90
Estocástico Global K=2	15-24	26.27	1434.10	1460.40
Estocástico Nodal K=3	11-14 15-24	47.43	1347.00	1394.40

V. CONCLUSIONES

La metodología propuesta es una herramienta útil que puede ser utilizada en las etapas iniciales de la planificación de expansión de la red eléctrica y puede emplearse desde un enfoque de demanda global para conocer los efectos del crecimiento de la demanda anualizada total para la planificación de generación futura. O bien adaptarse a un enfoque de demanda nodal. Por otro lado, comparando el enfoque de demanda global y nodal. El enfoque de demanda nodal requiere menos líneas de operación a invertir comparado con el enfoque global, debido a que la variación de la demanda de manera nodal, focaliza la concentración de carga reforzando solamente los nodos con un aumento de demanda requerido. Esto se demostró con mayor claridad en el caso Garver cuando se considera un incremento de la demanda nodal, modificando el resultado con respecto al enfoque global. Además, el enfoque de demanda global tiene la ventaja de únicamente necesitar los datos del comportamiento de la demanda total del sistema. Esto es útil cuando no se tiene información detallada de cada nodo o región y cuando se desea realizar un bosquejo del crecimiento general de la demanda.

Finalmente, la selección adecuada del número de escenarios puede estimarse por medio de métricas matemáticas como el

Coefficiente de Silueta, aunque no garantiza la solución óptima, por lo que se recomienda simular para diferentes números de clústeres, buscando balance entre el tiempo de simulación y precisión de los datos, generalmente se emplean números pequeños de escenarios, recomendado en la literatura consultada. Como trabajos futuros, se está desarrollando en la integración de la incertidumbre de fuentes de generación renovable, como eólica y/o solar.

AGRADECIMIENTOS

D. Hernández Reyes agradece al CONACYT por la beca brindada para sus estudios de Maestría. Este trabajo fue financiado bajo el proyecto UNAM PAPIIT IA 104623.

REFERENCIAS

- [1] L. L. Garver, "Transmission Network Estimation Using Linear Programming," *IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems*, vol. 89, n° 7, pp. 1688-1696, 1970. DOI: 10.1109/TPAS.1970.292825
- [2] A. J. Conejo, L. Baringo, S. J. Kazempour, A. S. Siddiqui, "Investment in Electricity Generation and Transmission: Decision Making under uncertainty," Switzerland: Springer, 2016. DOI: <https://doi.org/10.1007/978-3-319-29501-5>
- [3] S. Lumbreras, A. Ramos, "The new challenges to transmission expansion planning. Survey of recent practice and literature review," *Electric Power Systems Research*, vol. 134, pp. 19-29, 2016. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.epsr.2015.10.013>
- [4] Z. M. Al-Hamouz, A. S. Al-Faraj, "Transmission-expansion planning based on a non-linear programming algorithm," *Applied Energy*, vol. 76, n° 1-3, pp. 169-177, 2003. DOI: [https://doi.org/10.1016/S0306-2619\(03\)00060-6](https://doi.org/10.1016/S0306-2619(03)00060-6)
- [5] L. Bahiense, G. C. Oliveira, M. Pereira, S. Granville, "A mixed integer disjunctive model for transmission network expansion," *IEEE Transactions on Power Systems*, vol. 16, n° 3, pp. 560-565, 2001. DOI: 10.1109/PICA.2001.932383
- [6] M. Qorbani, T. Amraee, "Long term transmission expansion planning to improve power system resilience against cascading outages," *Electric Power Systems Research*, n° 106972, 2021. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.epsr.2020.106972>
- [7] P. Villaca Gomes, J. Tomé Saraiva, "State-of-the-art of transmission expansion planning: A survey from restructuring to renewable and distributed electricity markets," *International Electrical Power and Energy Systems*, n° 111, pp. 411-424, 2019. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.ijepes.2019.04.035>
- [8] E. Mortaz, J. Valenzuela, "Evaluating the impact of renewable generation on transmission expansion planning," *Electric Power Systems Research*, vol. 169, pp. 35-44, 2019. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.epsr.2018.12.007>
- [9] S. Lumbreras, A. Ramos, F. Banez-Chicharro, "Optimal transmission network expansion planning in real-sized power systems with high renewable penetration," *Electric Power Systems Research*, vol. 149, pp. 76-88, 2017. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.epsr.2017.04.020>
- [10] G. Becerik, E. Karatepe, "Stochastic chance constrained transmission expansion decisions for different investment budgets," *Proceedings - 2018 6th International Istanbul Smart Grids and Cities Congress and Fair, ICSG 2018*, pp. 76-80, 2018. DOI: 10.1109/SGCF.2018.8408946
- [11] C. Ruiz, A. J. Conejo, "Robust transmission expansion planning," *European Journal of Operational Research*, vol. 242, n° 2, pp. 390-401, 2015. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.ejor.2014.10.030>
- [12] P. F. Freitas, L. H. Macedo, R. Romero, "A strategy for transmission network expansion planning considering multiple generation scenarios," *Electric Power Systems Research*, vol. 172, pp. 22-31, 2019. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.epsr.2019.02.018>
- [13] Z. Zhuo, E. Du, N. Zhang, C. Kang, Q. Xia, Z. Wang, "Incorporating Massive Scenarios in Transmission Expansion Planning With High Renewable Energy Penetration," *IEEE Transactions on Power Systems*, vol. 35, n° 2, pp. 1061-1074, 2020. DOI: 10.1109/TPWRS.2019.2938618
- [14] M. Kantardzic, "Data mining: Concepts, Models, Methods and Algorithms," New Jersey, USA: John Wiley & Sons, Inc., 2020.

- [15] I. De J. Silva, M. Rider, R. Romero, C. Murari, "Transmission Network Expansion Planning Considering Uncertainty in Demand," *IEEE Transactions on Power Systems*, vol. 21, n° 4, pp. 1565-1573, 2006. DOI: 10.1109/TDC-LA.2008.4641803
- [16] H. Zhang, "Transmission Expansion Planning for Large Power Systems," Arizona State University, Arizona, USA, 2013
- [17] D. E. Hernández Reyes, "Planificación de la expansión de la transmisión considerando incertidumbre en la demanda," *Posgrado de energías*, UNAM, CDMX, 2022.
- [18] ERCOT, «Load,» 2021. [En línea]. Available: <http://www.ercot.com/gridinfo/load>. [Último acceso: diciembre 2020].
- [19] The MathWorks, Inc., MATLAB, R2017b ed., Matworks.
- [20] P. J. Rousseeuw, "Silhouettes: A graphical aid to the interpretation and validation of cluster analysis," *Journal of Computational and Applied Mathematics*, vol. 20, pp. 53-65, 1987. DOI: [https://doi.org/10.1016/0377-0427\(87\)90125-7](https://doi.org/10.1016/0377-0427(87)90125-7)
- [21] R. Green, I. Staffell, N. Vasilakos, "Divide and Conquer? k-means clustering of demand data allows rapid and accurate simulations of the British Electricity System," *IEEE Transactions on engineering management*, vol. 61, n° 2, pp. 251-260, 2014 DOI: 10.1109/TEM.2013.2284386
- [22] Aprende IA, "Seleccionar el número adecuado de clústeres," [En línea]. Available: <https://aprendeia.com/seleccionar-el-numero-adecuado-de-clusters/>. [Último acceso: diciembre 2020].
- [23] Subcommittee, Probability, "IEEE Reliability Test System," *IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems*, Vol. 12, n° 6, pp. 2047-2054, 1979. DOI: 10.1109/TPAS.1979.319398
- [24] C. Roldan, R. Minguez, R. Garcia-Bertrand, J. M. Arroyo, "Robust Transmission Network Expansion Planning Under Correlated Uncertainty," *IEEE Transactions on Power Systems*, vol. 34, n° 3, pp. 2071-2082, 2019. DOI: 10.1109/TPWRS.2018.2889032



N. González-Cabrera (*IEEE Member*) works at the Department of Electrical Energy at the National Autonomous University of Mexico (UNAM). His areas of interest are power system planning.



D. E. Hernández Reyes works in the Energy Management and Associated Products Unit of the Federal Electricity Commission (CFE). He collaborates in the technical and economic feasibility analysis of generation projects..



V. Torres-García (*Senior Member IEEE*) received his PhD degree from TecNM/Instituto Tecnológico de Morelia in 2014. He is currently Professor of the PGIIE of the same institute and his areas of interest are operation of electrical power systems, electrical protections and electromagnetic transients.