



UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DEL  
ESTADO DE MORELOS



Facultad de Ciencias  
Químicas e Ingeniería

**UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DEL ESTADO DE MORELOS**

**FACULTAD DE CIENCIAS QUÍMICAS E INGENIERÍA**

**MAESTRÍA EN INGENIERÍA ELÉCTRICA Y ELECTRÓNICA**

**Metodología basada en la teoría de grafos para el análisis y optimización de un sistema de distribución eléctrica a través de la implementación de elementos de una Smart Grid**

TESIS PARA OBTENER EL GRADO DE:

**MAESTRO EN INGENIERÍA ELÉCTRICA Y ELECTRÓNICA**

PRESENTA

**ING. BRIAN DANIEL GUTIÉRREZ REYNA**

DIRECTORES DE TESIS:

**DR. OUTMANE OUBRAM**

**DR. NOUREDDINE LAKOUARI**

**CUERNAVACA, MORELOS, MÉXICO**

**2022**



# Índice

Agradecimientos .....	iv
Resumen .....	vi
Abstract.....	vi
Introducción.....	viii
1. Justificación.....	1
2. Objetivos .....	3
2.1 Objetivo general.....	3
2.2 Objetivos específicos.....	3
3. Marco teórico.....	4
3.1 Smart Grid .....	4
3.1.2 Smart Grid implementada en la estructura de una red eléctrica convencional.....	5
3.2 Teoría de grafos .....	7
3.2.1 Adyacencia, Incidencia y grado de un grafo .....	8
3.2.2 Métricas seleccionadas de la teoría de grafos.....	9
4.2.3 Nodos .....	12
4.2.4 Arcos .....	13
3.3 Metodología.....	14
3.3.1 Representación del sistema del IEEE de 30-bus mediante la teoría de grafos.....	14
3.3.2 Violaciones en el sistema .....	19
4. Resultados.....	21
4.1 Centralidad de grado .....	21
4.2 Centralidad de cercanía .....	23
4.3 Centralidad de intermediación .....	25
4.4 Colocación de elementos de generación distribuida.....	27
4.5 Aproximación con la teoría de grafos .....	33
5. Conclusión.....	35
Referencias.....	37



## **Agradecimientos**

De corazón, agradezco a todas las personas que me dieron su apoyo y motivación durante la elaboración de mi tesis de maestría.

A mis asesores, que supervisaron desde el comienzo mi labor, poniendo de su parte todo el esmero y dedicación. Quisiera expresar mi más sincero agradecimiento por las críticas y sugerencias, que ayudaron a consolidar este trabajo.

También, agradecer a la distinguida institución de “El Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología” (CONACYT), por el apoyo económico brindado durante mi estancia en la carrera.

Un agradecimiento especial, a mis profesores y compañeros, quienes compartieron su conocimiento e hicieron que la calidad de mis estudios, fuese la mejor.

También, me gustaría dar las gracias a mi familia y amigos, quienes siempre mantuvieron mi ánimo, con el apoyo, las experiencias y los consejos compartidos.

A mi pareja, por su cariño incondicional y sus palabras de aliento.

Finalmente, agradezco a mi madre y a mi abuela, de quienes sé, que gracias a su esfuerzo y apoyo hicieron posible mis estudios.

*Brian Daniel Gutiérrez Reyna*



## **Resumen**

El trabajo de esta tesis presenta una metodología para la planeación y determinación del posicionamiento de elementos de generación distribuida (GD), los cuales forman parte de la smart grid (SG) o red inteligente, y, se aplican a un sistema de distribución de energía eléctrica, con base en métricas seleccionadas de la teoría de grafos, y, con el fin de optimizar el flujo de energía y disminuir las pérdidas totales existentes de energía en una red seleccionada de la IEEE, la cual consta de 30 buses. Se hace un estudio de flujo de potencia, y se compara el rendimiento del sistema, antes y después de añadir los elementos de GD.

## **Abstract**

The work of this thesis presents a methodology for the planning and determination of the positioning of distributed generation (DG) elements, which are part of the smart grid (SG) or intelligent network, and, are applied to a power distribution system, based on selected metrics from the graph theory, and, in order to optimize the energy flow and reduce the existing total energy losses in the selected IEEE network, which consists of 30 buses. A power flow study is made, and the performance of the system is compared, before and after adding the DG elements.





## **Introducción**

Los desafíos a los que se enfrenta la red convencional son varios, entre ellos los picos de demanda, la incorporación de energías renovables, reducción de pérdidas de energía, mejorar la calidad de servicio y la eficiencia energética. Una de las principales desventajas de los procesos para la generación de energía actuales, es que la mayoría no son sustentables, dejando emisiones constantes de carbono hacia la atmósfera que producen el calentamiento global.

Como una de las soluciones principales a estas problemáticas está la Smart Grid (SG). En [1] se define a la red eléctrica inteligente o Smart Grid como una red eléctrica que integra, a través de una comunicación bidireccional, las acciones de proveedores de servicio y usuarios conectados a ella, y, una de sus características clave son las energías renovables (éstas, sobre todo, son las que producen la energía descentralizada), las cuales son uno de los primeros pasos a seguir para que la red tradicional se transforme en una SG. La generación descentralizada de energía tiene distintas fuentes, lo que hace necesario la utilización de vías de comunicación bidireccionales para gestionar los flujos de energía en una SG.

De acuerdo con [2], se puede definir a SG como la red eléctrica suministra un balance de carga de mayor fiabilidad y, reduce los costos de electricidad al automatizar el proceso de medición, en donde la información acerca del consumo de electricidad es recolectada y transmitida por diversos dispositivos inteligentes, ofreciendo precios más precisos, basados en la oferta y la demanda actual.

Según [3] la tecnología que conforma una SG, surgió como un intento de utilizar control electrónico, medición y monitoreo. En 1980, se incorporó la medición automática para monitorear las cargas de clientes a gran escala, después evolucionó a lo que se conoce como la Infraestructura de medición

avanzada (AMI) en los 1990s, esta utilizaba medidores que podían registrar cómo se usaba la energía eléctrica a lo largo del día.

SG es una tecnología que no se encuentra ampliamente implementada en el mundo, por ejemplo, en [1], se menciona que en México se ha incrementado de manera significativa la demanda de energía eléctrica, esto debido al crecimiento poblacional, no obstante, la red eléctrica tradicional se encuentra en desventaja al estar desactualizada, por lo que es necesario implementar mejoras tecnológicas en la red, ya que desde que se introdujo el uso de electricidad en México, no se ha hecho mucho por introducir nuevas tecnologías para optimizar el consumo y producción de la energía eléctrica.

La integración de todas las tecnologías de una SG es viable de acuerdo a distintos factores, y dependiendo del país donde se desee implementar, por ejemplo, en México, con los cambios hechos al artículo 27 de la Constitución Política de los Estados Unidos Mexicanos en el marco de la reforma energética del 2014, se crea la oportunidad de implementar tecnologías a la red actual y con ello la posible transición de una red convencional a una red inteligente [1]. Dicha transición se da como resultado de la cuarta revolución industrial, la cual se caracteriza en [4] por la convivencia de varias tecnologías, esto supone la transición hacia nuevos sistemas, que operan en forma de redes más complejas y estas se construyen sobre la infraestructura de la revolución digital anterior.

Este trabajo tiene como objetivo implementar uno de los elementos de la tecnología SG, utilizando una nueva metodología basada en la teoría de grafos (la cual es una herramienta utilizada por la ciencia de redes), para determinar a los nodos más importantes de una red de distribución eléctrica, y reducir las pérdidas existentes en el sistema, ya que la energía suministrada a la red es generada por plantas de energía convencionales, y la mayoría de ellas utilizan combustibles fósiles para producir energía, los cuales son limitados y ocasionan contaminación al medio ambiente.

La generación distribuida (GD) es uno de los elementos de la SG, y utiliza recursos de energía renovables como fuentes de energía, y son colocados generalmente sobre las cargas para generar electricidad, y operan en paralelo con otras fuentes para suministrar a las cargas, la GD ayuda a reducir costos de operación y reduce el impacto ambiental [5].

La correcta integración de máquinas de GD es importante, y existen varios métodos para este propósito, algunos ejemplos explicados en [6], [7], y [8]. Donde un algoritmo es utilizado para la planeación de la correcta implementación de GD, otros métodos para la colocación óptima se mencionan en [9].

La ciencia de redes surge como un área que estudia las redes complejas y se basa en tecnología interdisciplinaria, entre las que están la teoría de grafos, probabilidad y estadística, mecánica estadística y teoría de control. Donde el origen de este estudio fue estimulado por las investigaciones empíricas de estructuras y redes existentes en la realidad a gran escala, como pueden ser las redes de telecomunicaciones, redes biológicas, redes sociales y, en el caso de este trabajo, las redes eléctricas. Los enfoques basados en redes complejas ofrecen una mejor comprensión, predicción y control de las estructuras topológicas y los comportamientos dinámicos de las redes eléctricas a un nivel fundamental. Si se desconsidera la dinámica intrínseca de los componentes en la red, una red compleja se puede describir mediante un grafo [10].

Para entender las maneras en que las redes pueden afectar las propiedades de un sistema, se debe entender la teoría de grafos primero, ésta es una rama de las matemáticas que sirve para representar las características elementales de una red en un gráfico. La teoría de grafos tiene su origen en 1735 en Königsberg, la capital de Prusia Oriental (en ese tiempo una ciudad mercantil). Se crearon siete puentes que cruzaban el río Pregel el cual rodeaba la ciudad, esta estructura peculiar creó un acertijo contemporáneo, el cual hacía a los

habitantes preguntarse si era posible caminar a través de todos los siete puentes y nunca cruzar el mismo puente dos veces. Esta tarea resultaba compleja y permaneció sin solución hasta 1735, cuando Leonard Euler, un matemático suizo ofreció una respuesta de que dicho camino no existía [11].

Como se aprecia en la figura 1 Las partes separadas por el río se representan con las letras A, B, C, y D. Las conexiones entre estas están hechas con líneas que representan a los puentes. Una vez identificadas estas partes, se creó un grafo en donde las partes de tierra se representaron con nodos y los puentes con aristas.

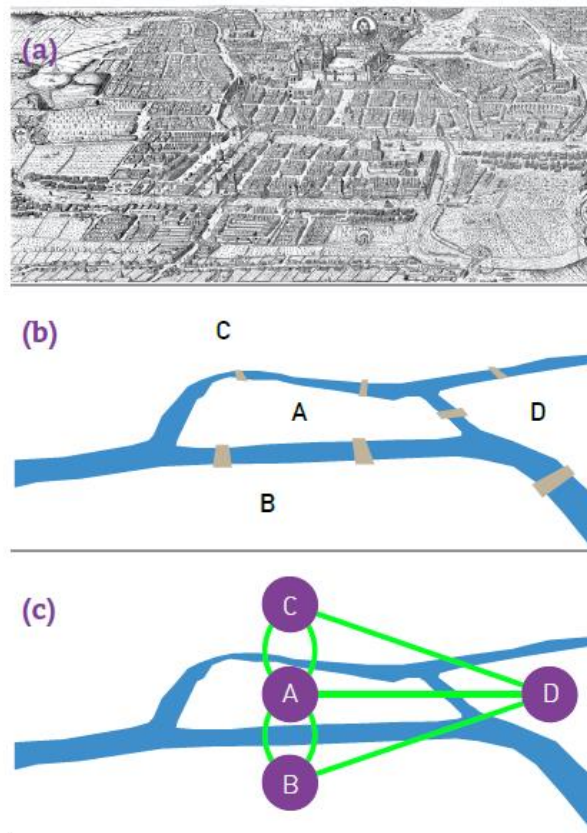


Fig. 1. Los puentes de Königsberg. (a) Un mapa contemporáneo de Königsberg (ahora Kaliningrado, Rusia) en los tiempos de Euler. (b) Una ilustración esquemática de las cuatro tierras de Königsberg y los siete puentes entre ellas. (c) Grafo construido por Euler de cuatro nodos (A, B, C, D) cada uno correspondiente a una parte de tierra, y siete enlaces que corresponden a los puentes [11].

De la figura 1.c se puede deducir fácilmente que no existe un camino que cruce todos los puentes sin repetir el mismo puente dos veces, ya que solo puede tener un punto de comienzo y un punto de final. Entonces, este camino no puede existir en un grafo que tiene más de dos nodos con un número impar de enlaces. Como puede observarse el hacer uso de un grafo puede simplificar de manera significativa un problema [11].

Este trabajo toma un caso de prueba del IEEE de 30-bus para su análisis. En resumen. El propósito de esta investigación es establecer una metodología simple para exponer a los nodos o puntos más importantes de la red de distribución eléctrica, utilizando una aproximación distinta que tiene como base a las métricas seleccionadas de la teoría de grafos, para después, aplicar mejoras tecnológicas de la SG para comparar los beneficios obtenidos.



## **1. Justificación**

Si la demanda de energía eléctrica sigue aumentando con el paso del tiempo, existirá una mayor deficiencia a la hora de satisfacer el consumo y, cuando esto sucede, se activan plantas de generación de energía secundarias menos eficientes que contribuyen a la emisión de gases de efecto invernadero, comprometiendo aún más el medio ambiente. Además, cuando las redes eléctricas se exponen a los cambios climáticos y desastres naturales, se exponen sus deficiencias, ocasionando cortes en la entrega de energía a diferentes puntos de consumo, estos deben ser atendidos inmediatamente para disminuir significativamente el impacto negativo que generan. Este tipo de problemas se encuentran en muchas redes a lo largo de todo el mundo.

La actualización de una red eléctrica tradicional a una Smart Grid, tiene como objetivo dar una respuesta en tiempo real a los problemas mencionados. Una vez terminada la transición a una red inteligente, esta debería ser capaz de operar más eficientemente, de impulsar la utilización de los recursos renovables, volverse más resistente contra los desastres naturales y ofrecer una recuperación rápida si se presentan daños después de estos, automatizar los procesos de medición, para ofrecer soluciones a los productores y consumidores sobre cómo gestionar la producción y el consumo de energía eléctrica, así como también ofrecer el precio en tiempo real de la energía que se está consumiendo.

El estudio físico de una red, involucra factores de tiempo y costos, que harían inviable la obtención de resultados. La solución para llevar a cabo el estudio de una red con esas características, es a través de la simulación y la modelación, teniendo como objetivo la optimización del rendimiento de la misma.

Es por esto que, crear una metodología simple servirá como una primera aproximación para determinar dónde deben ser implementadas y cómo actúan

las mejoras en una red eléctrica de distribución convencional. En este caso, se ha seleccionado a la generación distribuida como caso de estudio, para poder observar directamente una disminución en las pérdidas del sistema una vez que se encuentren instalados dichos elementos de generación.



## **2. Objetivos**

### **2.1 Objetivo general.**

1. Diseñar e implementar una metodología teniendo como base la teoría de grafos, que permita analizar una red eléctrica tradicional, exponer sus puntos críticos y, con base en los resultados, proponer soluciones para optimizar el rendimiento del sistema a través de la implementación de elementos de generación distribuida de la smart grid.

### **2.2 Objetivos específicos**

1. Representar la información disponible de la red de distribución del caso de prueba de 30-bus del IEEE con la teoría de grafos, para estudiar sus características topológicas, y, determinar sus puntos críticos.
2. Implementar mejoras en la red seleccionada con base en el análisis de su estructura, integrando nuevas fuentes de energía distribuida para optimizar el rendimiento y disminuir pérdidas.

### **3. Marco teórico**

A continuación, se incluyen los temas necesarios para sentar las bases y poder comprender los resultados obtenidos en este trabajo, los cuales constan de conceptos y teorías explicados de forma breve. Cabe resaltar que, para un entendimiento más profundo sobre los temas mencionados en este trabajo, se recomienda revisar las fuentes consultadas para la realización del mismo, mismas que pueden ser de gran ayuda para complementarlo y hacer observaciones en futuros trabajos con un enfoque distinto.

#### **3.1 Smart Grid**

Existen muchos términos para describir a una Smart Grid, pero puede generalizarse como un sistema eléctrico que utiliza la información y la procesa de manera inteligente, empleando tecnologías de la información bidireccionales, y, se integra en toda la estructura del sistema energético desde los puntos de generación hasta los puntos de consumo [10], integra fuentes de energía renovable y optimiza los procesos de generación, transporte y consumo de electricidad en tiempo real.

No obstante, entender a profundidad en qué consiste la tecnología de una red inteligente (SG), requiere de la consulta de diferentes fuentes con la finalidad de tener un conocimiento general acerca de los elementos que la conforman, ya que es un término que no se encuentra bien definido.

De acuerdo con [12] en la norma IEEE 2030-2011, se define a SG como un sistema gigante de sistemas, donde cada dominio utilitario consta de tres capas:

1. Capa de energía y potencia.
2. Capa de comunicación.
3. Capa de TI (Tecnologías de la Información) /capa de computadora.

En donde se dice que, la red se vuelve inteligente debido a las capas dos y tres.

La tecnología que conforma a la red inteligente es muy extensa, la tabla 1 muestra las principales diferencias entre la red eléctrica tradicional y la SG.

Tabla 1. Comparación entre la red eléctrica tradicional y la SG [2], [13].

<b>Red tradicional</b>	<b>Smart Grid</b>
Comunicación de una vía	Comunicación de dos vías
Generación centralizada	Generación distribuida
Sistema electromecánico	Sistema digital
Consta de pocos sensores	Sensores a lo largo de toda la red
Monitoreo manual	Monitoreo automatizado
Control limitado - Prueba manual	Control de prevalencia - Test remoto
Restauración manual	Auto reparación
Opciones limitadas para el cliente	Opciones variadas para el cliente

### **3.1.2 Smart Grid implementada en la estructura de una red eléctrica convencional**

De manera general, una red inteligente utiliza herramientas, tecnologías y técnicas que se integran a una red eléctrica convencional para mejorarla en varios aspectos, esta se divide en 3 subsistemas [3]:

1. *Generación.* En este punto, las plantas de energía pasan por diferentes etapas que convierten el combustible (carbón, gas natural, uranio, etc.) en electricidad. Como ejemplo se puede tomar la generación de energía eléctrica por una turbina impulsada por el vapor de agua que se produce por la quema de carbón.
2. *Transmisión.* Este sistema se encarga de transportar la energía eléctrica desde el punto de generación hasta el punto de consumo. En una Smart Grid, se aplican tecnologías digitales y de electrónica de potencia para incrementar su rendimiento.
3. *Distribución.* Su función es suministrar la energía desde las subestaciones de distribución hasta los consumidores finales.

Una red inteligente es capaz de autorrecuperarse al detectar fallas y reconfigurar sus circuitos, debido a su análisis y modelado del sistema y control de tensión más preciso, debido a la tecnología que utiliza para la detección, adquisición de datos y controles automatizados.

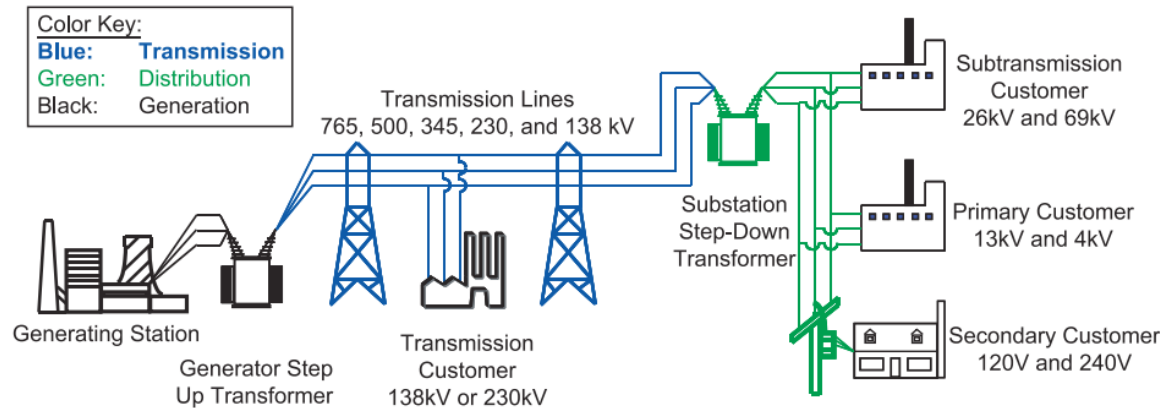


Fig. 2. Estructura básica del sistema eléctrico (Canadá) [14]. Puede observarse a los subsistemas de la siguiente forma: Negro: Generación, Azul: Transmisión, Verde: Distribución.

### 3.2 Teoría de grafos

Para poder analizar la red eléctrica, esta debe ser representada en un modelo matemático más simple, en este caso se hace uso de la *teoría de grafos*.

En [15] se describe a un *grafo* como un conjunto de *vértices* (o nodos) y un conjunto de *aristas* (o arcos), cada uno de los cuales une dos vértices. Generalmente un objeto es representado por un vértice, y, la relación entre dos objetos es representada por una arista. Un grafo puede ser usado para representar cualquier información que puede ser modelada como objetos y las relaciones que existen entre estos.

El modelo matemático que se construye una vez seleccionada la red es llamado como el *modelo del grafo*. Los puntos son llamados vértices, las líneas que los unen son llamadas aristas, y al diagrama entero se le llama grafo.

Un grafo  $(G)$  es una tupla  $(V, E)$  el cual consiste de un conjunto finito de  $V$  vértices y un conjunto finito de  $E$  aristas; cada arista es un par de vértices desordenado. Los dos vértices asociados con una arista  $e$  son llamados los vértices finales de  $e$ . Se denota como  $(u, v)$ , una arista entre dos vértices  $u$  y  $v$ . También se denota el conjunto de vértices de un grafo como  $V(G)$  y el conjunto de aristas de  $G$  como  $E(G)$ .

Si  $e = (u, v)$  es una arista de un grafo  $G$ . Entonces los dos vértices  $u$  y  $v$  son adyacentes en  $G$  y la arista es incidente a los vértices  $u$  y  $v$ . Al vértice  $u$  también se le llama vecino de  $v$  en  $G$  y viceversa.

### 3.2.1 Adyacencia, Incidencia y grado de un grafo

Cuando se tiene una arista  $e$  compuesta por dos nodos  $u$  y  $v$  se dice que los dos vértices son adyacentes en el grafo  $G$ , y la arista  $e$  será incidente a los vértices  $u$  y  $v$ . El grado de un nodo  $v$  en el grafo  $G$ , puede escribirse como  $deg(v)$  o  $d(v)$ , es el número de aristas incidentes al nodo, en donde cada bucle en el nodo se contaría dos veces. De aquí se puede intuir que se puede calcular el número total de aristas en un grafo si se suman todos los grados de todos los nodos [15].

Por lo tanto, en donde un grafo con  $m$  aristas, se deduce la fórmula de la suma de grados:

$$\sum_{v \in V} deg(v) = 2m$$

(4.1)

La figura 3 muestra a un grafo  $G$  que tiene cuatro vértices ( $v_1, v_2, v_3, v_4$ ) y cuatro aristas ( $e_1, e_2, e_3, e_4$ ). Los vértices  $v_1$  y  $v_2$  son los vértices finales de la arista  $e_1$  ( $v_1, v_2$ ). Por lo tanto, se dice que  $v_1$  y  $v_2$  son adyacentes,  $v_2$  y  $v_4$  son vecinos del vértice  $v_3$ .

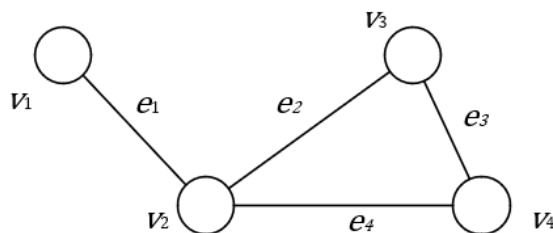


Fig. 3. Grafo (G) de cuatro vértices y cuatro aristas

### 3.2.2 Métricas seleccionadas de la teoría de grafos

Las métricas de una red ayudan a encontrar medidas útiles, capturan características particulares de la topología del sistema de distribución y también, cuantifican la estructura. Las métricas más comunes consideradas son [10]:

- centralidad de grado
- centralidad de cercanía
- centralidad de intermediación
- coeficiente de agrupamiento
- excentricidad
- diámetro de la red
- radio de la red
- densidad
- grado de distribución

Siendo comúnmente las medidas de centralidad las métricas más representativas [10]. Debido a esto, en este estudio se tomaron en cuenta sólo las medidas de centralidad.

- *La centralidad* se utiliza para localizar a los nodos que tienen una posición crítica en toda la red. Entre más alto sea el valor de centralidad, el nodo se encontrará más cerca del centro de la red. La centralidad de grado, centralidad de intermediación, y centralidad de cercanía son los valores más comúnmente escogidos para el entendimiento e interpretación de la red [16].
  - a) La *centralidad de grado* es la cantidad de conexiones que tiene un nodo, es decir, su *grado*, por ejemplo, un nodo con 10 conexiones, tiene una centralidad de 10. Convencionalmente se utiliza una escala de 0 a 1 para expresar el valor de grado de centralidad, un nodo con centralidad de grado 1 tendrá el grado más alto de la red, y, si se compara la centralidad de otro nodo,

será la fracción del nodo de grado más alto. Por ejemplo, si el nodo de mayor grado tiene 10 enlaces, un nodo de 2 conexiones tendría una centralidad de  $0.2 \left(\frac{2}{10}\right)$  [17].

- b) La *centralidad de intermediación* ubica a los nodos críticos en la red, al establecer cuáles permiten pasar más información a través de ellos, lo que significa que el nodo con mayor centralidad de intermediación probablemente se usará para pasar de un nodo a cualquier otro en un camino [17].
- c) La *centralidad de cercanía* encuentra el nodo que está más cerca de todos los demás nodos. En otras palabras, es el promedio de pasos de todos los caminos más cortos desde un nodo elegido hasta todos los demás nodos de la red [17].
- El *coeficiente de agrupamiento* captura el grado en el cual los vecinos de un nodo dado se conectan entre sí. Para un nodo  $i$  con grado  $K_i$  el coeficiente de agrupamiento local se define como [11],

$$C_i = \frac{2L_i}{k_i(k_i - 1)} \tag{4.2}$$

$L_i$  representa el número de enlaces entre los vecinos  $K_i$  del nodo  $i$ .

Para resumir,  $C_i$  mide la densidad local, entre más interconectados estén los vecinos del nodo  $i$ , el coeficiente de agrupamiento local será más grande.

- La *excentricidad* de un vértice (figura 4) en un grafo  $G$  es  $\max_{v \in V(G)} d(u, v)$  y se denota como  $\epsilon(u)$  [15].
- El *diámetro de la red*, se establece como  $d_{max}$ , es el camino más corto máximo en la red. En otras palabras, es la distancia (se toma como el número de aristas recorrido de un nodo a otro) más larga que se da



entre dos nodos de la red [18], o también como el máximo de las excentricidades de los vértices.

- El *radio* de un grafo es  $\min_{u \in V(G)} \epsilon(u)$  y se define como el menor de las excentricidades en la red [15].
- La *densidad* es el número de conexiones en un grafo  $G$  dividido por el número total de conexiones posibles, y especifica hasta qué punto el grafo está completamente conectado [19]

$$\delta = \frac{2L}{N(N-1)} \quad (4.3)$$

Donde  $L$  es el número de conexiones del grafo y,  $N$  es el número de nodos.

- Para comprender el concepto de *grado de distribución*,  $P_k$  es importante primero establecer cuál es la definición de *grado*. El grado es el número total de enlaces  $L$  de un nodo  $i$  con otros nodos de una red. El grado de distribución significa que, si se elige un nodo aleatorio de una red con  $N$  nodos, es probable que el nodo tenga un grado  $k$ , y viene dado por

$$P_k = \frac{N_k}{N}, \quad (4.4)$$

$N_k$  es el número de nodos de grado  $k$ . También, es común mostrar el grado de distribución en un histograma [11].

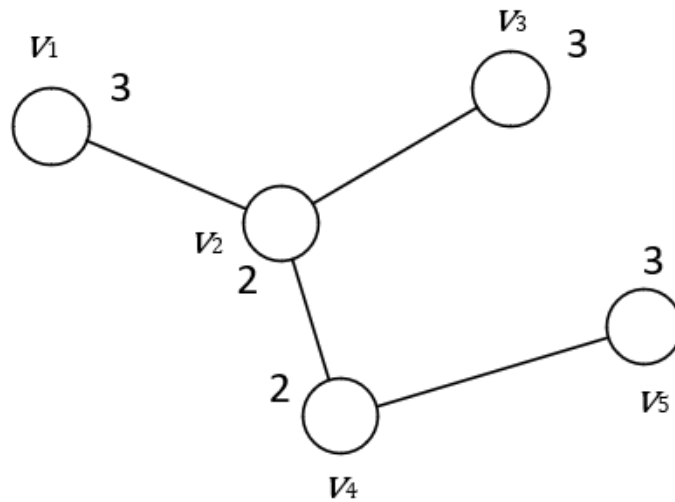


Fig. 4. Excentricidades de los vértices. En el grafo, se observa que el máximo de las excentricidades es de 3, por lo tanto, el diámetro  $d_{max} = 3$ . El mínimo de las excentricidades es 2, entonces  $radio = 2$ .

#### 4.2.3 Nodos

La red eléctrica tiene líneas de transmisión de alta tensión, que transportan la electricidad desde su punto de generación hasta los puntos de consumo. El grafo se utiliza para representar a la red eléctrica, porque puede mostrar adecuadamente la estructura del sistema eléctrico. Los nodos representan los puntos de consumo y las aristas la conexión que existe entre estos. Podemos clasificar a los nodos en tres categorías [18]:

- **PE** o Planta de Energía. Produce electricidad debido a un proceso que transforma energía primaria en eléctrica. Se le considera *nodo fuente*.
- **AU** o Área Urbana. Consume la energía producida por las plantas de energía, por lo tanto, se le considera un *nodo sumidero*.
- **AI** o Área Industrial. Al igual que las áreas urbanas, se le considera nodo sumidero, ya que demanda energía para poder realizar actividades industriales.

#### **4.2.4 Arcos**

Son las conexiones que existen entre los nodos de la red, estas se clasifican de acuerdo al tipo de material del que están hechos (normalmente es cobre y aluminio) y las tensiones que soportan [18].

En [20] se clasifican de acuerdo a las tensiones empleadas en los sistemas eléctricos:

1. Alta tensión (85, 115, 230, 400 kV)
2. Extra alta tensión (más de 400 kV)
3. Mediana tensión (69 kV)
4. Distribución y baja tensión (23, 30, 13.8, 4.16, 0.440, 0.220, 0.127 kV)

### **3.3 Metodología**

La metodología descrita a continuación, tiene como base los conceptos previamente mencionados, y, los adapta para poder extraer las propiedades estructurales de una red de distribución eléctrica. Tomando en cuenta los valores obtenidos, se implementarán elementos de GD en los puntos determinados para optimizar el rendimiento del sistema y reducir pérdidas de energía.

#### **3.3.1 Representación del sistema del IEEE de 30-bus mediante la teoría de grafos**

Para este trabajo se considera el análisis de un sistema de 30-bus obtenido de los casos de prueba del IEEE (Institute of Electrical and Electronics Engineers). Ya que su información es de fácil acceso y facilita la creación del grafo. En las figuras 5, 6 y 7 a continuación se pueden apreciar los datos del caso de estudio para este trabajo.

System Summary				
How many?		How much?	P (MW)	Q (MVar)
Buses	30	Total Gen Capacity	900.2	-540.1 to 540.1
Generators	6	On-line Capacity	900.2	-540.1 to 540.1
Committed Gens	6	Generation (actual)	301.0	133.9
Loads	21	Load	283.4	126.2
Fixed	21	Fixed	283.4	126.2
Dispatchable	0	Dispatchable	-0.0 of -0.0	-0.0
Shunts	2	Shunt (inj)	-0.0	25.3
Branches	41	Losses ( $I^2 * Z$ )	17.56	67.69
Transformers	4	Branch Charging (inj)	-	34.7
Inter-ties	0	Total Inter-tie Flow	0.0	0.0
Areas	1			
		Minimum	Maximum	
Voltage Magnitude	0.992 p.u. @ bus 30		1.082 p.u. @ bus 11	
Voltage Angle	-17.64 deg @ bus 30		0.00 deg @ bus 1	
P Losses ( $I^2 * R$ )	-		5.21 MW @ line 1-2	
Q Losses ( $I^2 * X$ )	-		15.61 MVar @ line 1-2	

Fig. 5. Datos del sistema de 30-bus del IEEE seleccionado para el análisis (Resumen del sistema).

Bus Data						
Bus #	Voltage		Generation		Load	
	Mag (pu)	Ang (deg)	P (MW)	Q (MVar)	P (MW)	Q (MVar)
1	1.060	0.000*	260.96	-20.42	-	-
2	1.045	-5.378	40.00	56.07	21.70	12.70
3	1.021	-7.529	-	-	2.40	1.20
4	1.012	-9.280	-	-	7.60	1.60
5	1.010	-14.149	0.00	35.66	94.20	19.00
6	1.011	-11.055	-	-	-	-
7	1.003	-12.852	-	-	22.80	10.90
8	1.010	-11.798	0.00	36.11	30.00	30.00
9	1.051	-14.099	-	-	-	-
10	1.045	-15.688	-	-	5.80	2.00
11	1.082	-14.099	0.00	16.06	-	-
12	1.057	-14.933	-	-	11.20	7.50
13	1.071	-14.934	0.00	10.46	-	-
14	1.042	-15.825	-	-	6.20	1.60
15	1.038	-15.917	-	-	8.20	2.50
16	1.045	-15.516	-	-	3.50	1.80
17	1.040	-15.850	-	-	9.00	5.80
18	1.028	-16.530	-	-	3.20	0.90
19	1.026	-16.704	-	-	9.50	3.40
20	1.030	-16.507	-	-	2.20	0.70
21	1.033	-16.131	-	-	17.50	11.20
22	1.033	-16.117	-	-	-	-
23	1.027	-16.307	-	-	3.20	1.60
24	1.022	-16.483	-	-	8.70	6.70
25	1.018	-16.055	-	-	-	-
26	1.000	-16.474	-	-	3.50	2.30
27	1.024	-15.530	-	-	-	-
28	1.007	-11.677	-	-	-	-
29	1.004	-16.760	-	-	2.40	0.90
30	0.992	-17.642	-	-	10.60	1.90
Total:			300.96	133.93	283.40	126.20

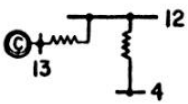
Fig. 6. Datos del sistema de 30-bus del IEEE seleccionado para el análisis (bus).

Branch Data								
Brnch #	From Bus	To Bus	From Bus P (MW)	Injection Q (MVar)	To Bus P (MW)	Injection Q (MVar)	Loss (I <sup>2</sup> * Z)	
							P (MW)	Q (MVar)
1	1	2	173.31	-24.70	-168.10	34.47	5.213	15.61
2	1	3	87.65	4.28	-84.54	2.66	3.108	11.36
3	2	4	43.65	4.75	-42.64	-5.54	1.019	3.10
4	3	4	82.14	-3.86	-81.29	5.45	0.856	2.46
5	2	5	82.36	2.78	-79.42	5.17	2.943	12.36
6	2	6	60.38	1.37	-58.43	0.58	1.946	5.90
7	4	6	72.13	-15.91	-71.49	17.19	0.632	2.20
8	5	7	-14.78	11.49	14.95	-13.13	0.169	0.43
9	6	7	38.13	-2.78	-37.75	2.23	0.381	1.17
10	6	8	29.56	-7.19	-29.46	6.65	0.108	0.38
11	6	9	27.72	-8.10	-27.72	9.73	0.001	1.62
12	6	10	15.84	0.19	-15.84	1.09	0.000	1.28
13	9	11	0.00	-15.60	0.00	16.06	0.000	0.46
14	9	10	27.72	5.88	-27.72	-5.08	0.001	0.80
15	4	12	44.20	14.40	-44.20	-9.71	0.002	4.69
16	12	13	0.00	-10.33	0.00	10.46	0.000	0.13
17	12	14	7.86	2.40	-7.78	-2.25	0.074	0.15
18	12	15	17.89	6.79	-17.68	-6.36	0.217	0.43
19	12	16	7.24	3.35	-7.19	-3.24	0.054	0.11
20	14	15	1.58	0.65	-1.58	-0.64	0.006	0.01
21	16	17	3.69	1.44	-3.68	-1.41	0.008	0.03
22	15	18	6.02	1.60	-5.98	-1.52	0.039	0.08
23	18	19	2.78	0.62	-2.77	-0.61	0.005	0.01
24	19	20	-6.73	-2.79	6.74	2.83	0.017	0.03
25	10	20	9.02	3.71	-8.94	-3.53	0.082	0.18
26	10	17	5.33	4.43	-5.32	-4.39	0.014	0.04
27	10	21	15.78	10.01	-15.67	-9.77	0.111	0.24
28	10	22	7.62	4.60	-7.57	-4.49	0.053	0.11
29	21	22	-1.83	-1.43	1.83	1.43	0.001	0.00
30	15	23	5.04	2.91	-5.00	-2.84	0.031	0.06
31	22	24	5.74	3.06	-5.69	-2.99	0.046	0.07
32	23	24	1.80	1.24	-1.80	-1.23	0.006	0.01
33	24	25	-1.21	2.01	1.22	-1.99	0.010	0.02
34	25	26	3.54	2.37	-3.50	-2.30	0.045	0.07
35	25	27	-4.76	-0.37	4.79	0.42	0.024	0.05
36	28	27	18.07	5.04	-18.07	-3.75	-0.000	1.29
37	27	29	6.19	1.67	-6.10	-1.51	0.086	0.16
38	27	30	7.09	1.66	-6.93	-1.36	0.162	0.31
39	29	30	3.70	0.61	-3.67	-0.54	0.034	0.06
40	8	28	-0.54	-0.54	0.55	-3.80	0.002	0.01
41	6	28	18.67	0.12	-18.62	-1.24	0.058	0.20
Total:							17.561	67.69

Fig. 7. Datos del sistema de 30-bus del IEEE seleccionado para el análisis (líneas).

THREE WINDING TRANSFORMER EQUIVALENTS

HANCOCK



ROANOKE

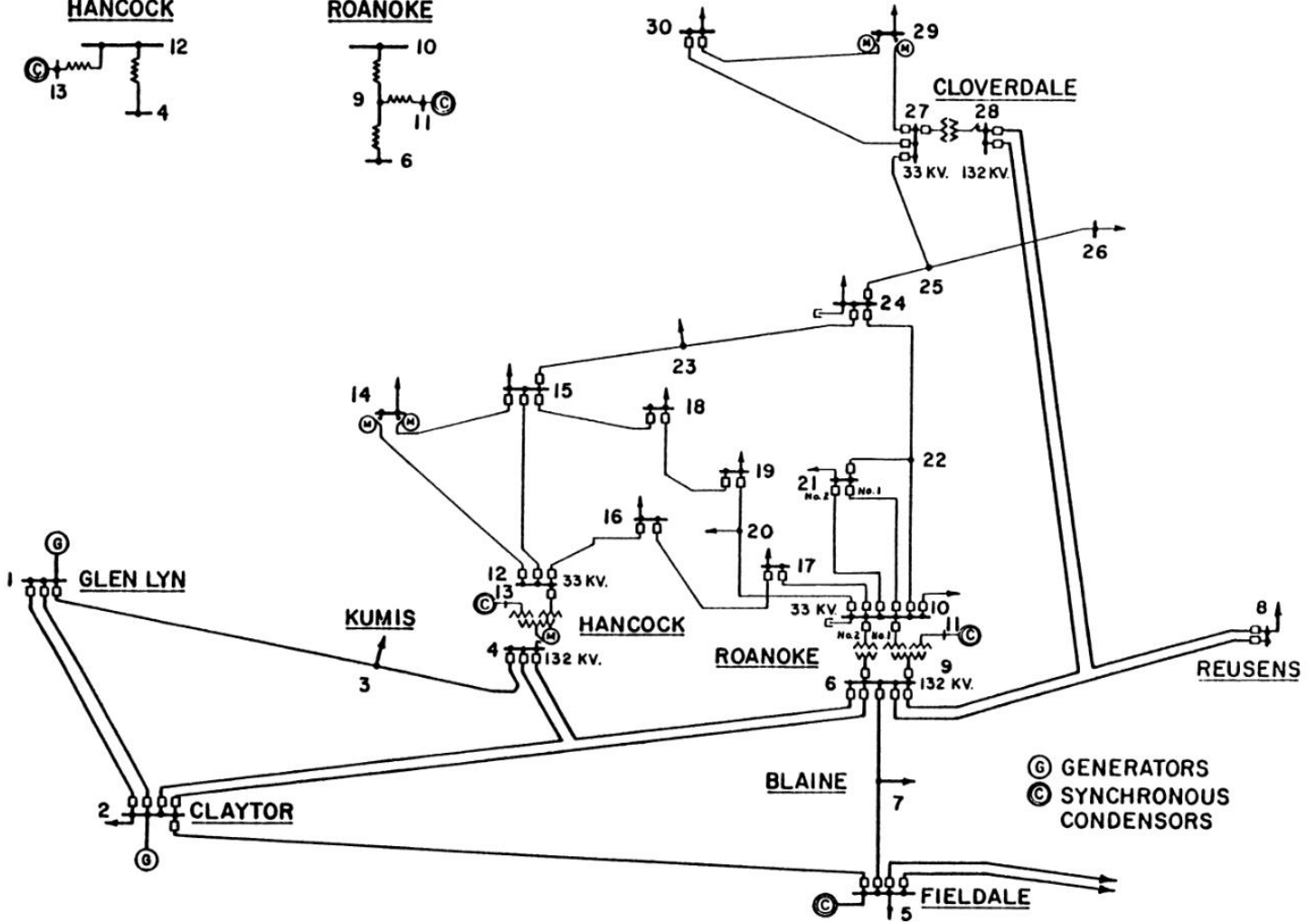
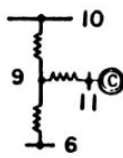


Fig. 8. Diagrama del sistema de 30-bus del IEEE



Para estudiar el caso, es necesario representar el sistema con un grafo, esto facilita la visualización de sus componentes y la realización de cálculos, es decir, sirve para representar la información modelada como objetos y relaciones entre esos objetos [15]. En la figura 9, el sistema está representado por nodos y aristas, los nodos son puntos de consumo o transición, etiquetados con números, y las aristas representan las líneas de transmisión.

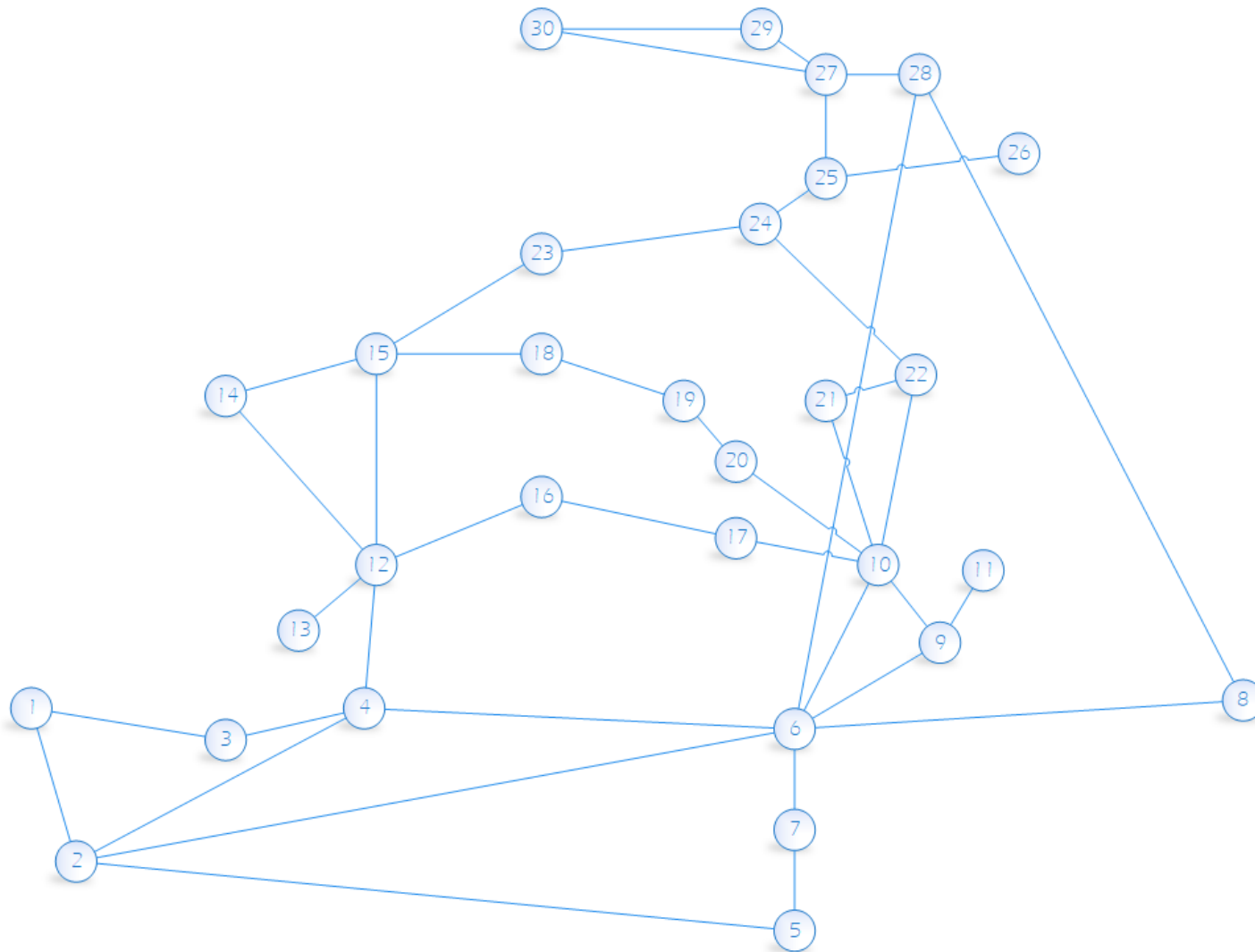
La representación del sistema se simplifica con la utilización de un grafo, ayuda a localizar los nodos clave e interpretar los valores obtenidos con las métricas seleccionadas. Una vez que se tienen determinados los puntos con más importancia dentro de la red, se procede a implementar mejoras, mediante la colocación de elementos de GD.

### **3.3.2 Violaciones en el sistema**

Para este estudio, se consideran dos tipos de violaciones (adoptadas del análisis de contingencia) en el sistema [21].

1. *Violaciones de bajo voltaje.* El voltaje en cualquier bus tiene que permanecer en el rango de 0.95-1.05 p.u. Si la tensión cae por debajo de 0.95 p.u. El nodo se considerará como bus de bajo voltaje, también, si el voltaje se eleva a más de 1.05 p.u. El nodo tendrá un problema de sobretensión.
2. *Violaciones MVA en la línea.* Se supone que las líneas en el sistema soportan un 125% como límite MVA. Así mismo, si el flujo de corriente en la línea se encuentra por debajo del 80-90%, se considerará también como violación.

Figura 9. Grafo del Sistema de 30-bus del IEEE.



## **4. Resultados**

Como se mencionó, la metodología propuesta en este trabajo tiene como objetivo determinar los nodos que son más importantes para la transferencia de energía, utilizando las métricas seleccionadas de la teoría de grafos como herramienta para ubicar dónde se deben agregar las nuevas máquinas GD para reducir las pérdidas del sistema. La colocación de máquinas genéricas DG ayudará a demostrar si las pérdidas del sistema se están reduciendo.

### **4.1 Centralidad de grado**

La figura 10 representa el grado de centralidad como valores obtenidos del sistema IEEE 30-Bus, se puede notar que el nodo número 6 (los nodos 10 y 12 también tienen un alto grado de centralidad) tiene el grado más alto de centralidad en el sistema, lo que significa que tiene más conexiones en comparación con los otros nodos, lo que resulta en una mejor comunicación. Esto implica que la energía que pasa por este nodo (entrada y salida) se distribuye a más puntos, a diferencia de la energía que fluye en otros nodos. Los nodos de menor grado de centralidad son el 11, 13 y 26. Su valor se debe al bajo número de conexiones, ya que son los puntos finales a los que se distribuye la energía. La centralidad de grado ayuda a detectar los nodos importantes una vez que se interpreta con otros valores también obtenidos por la teoría de grafos, esto se puede ver en la tabla 2.

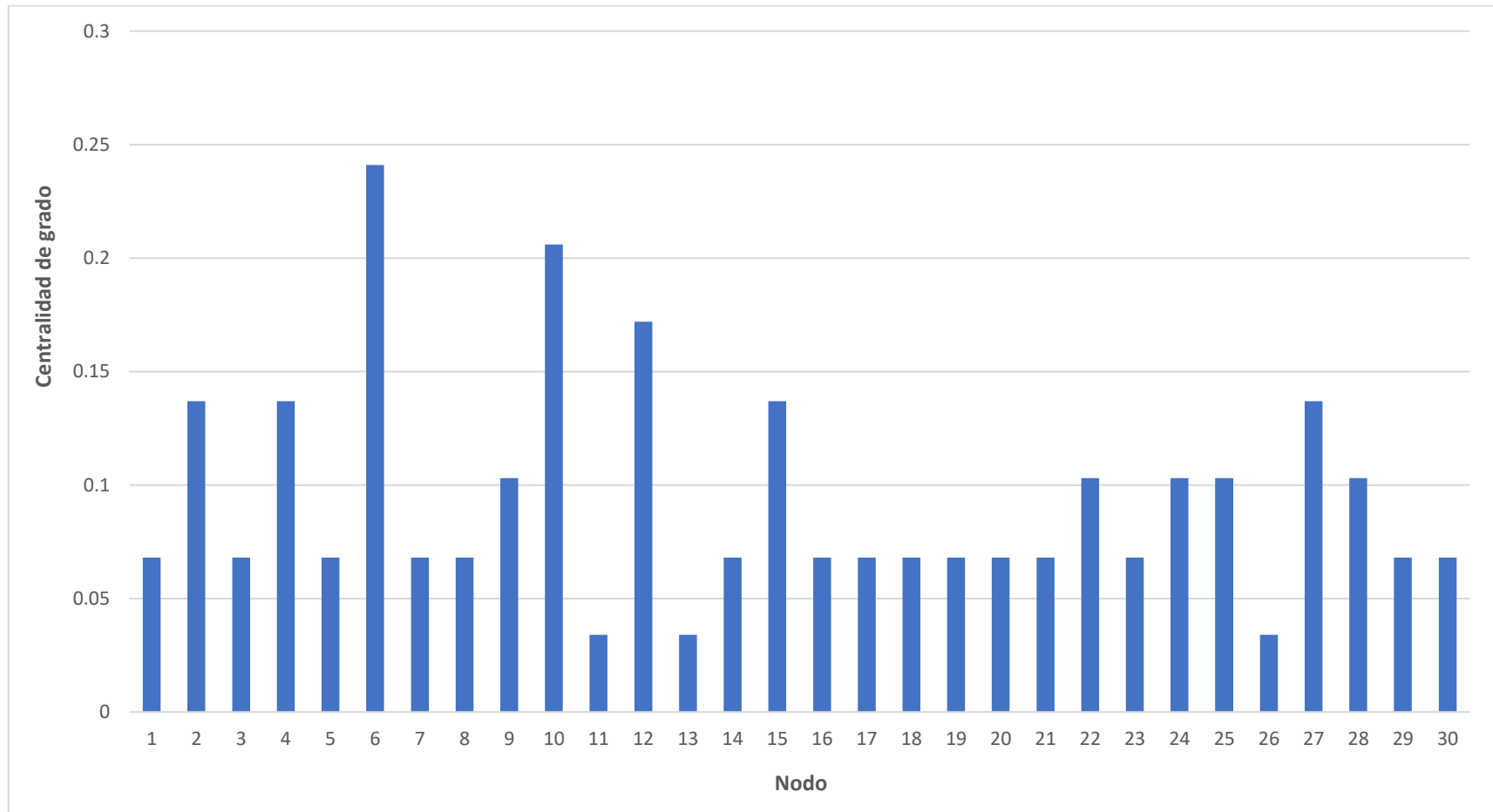


Fig. 10. Centralidad de grado del Sistema de 30-bus del IEEE. Los valores obtenidos se muestran en un rango de 0-1 para una fácil interpretación.

## **4.2 Centralidad de cercanía**

Los valores que se muestran en la figura 11 son las centralidades de cercanía del sistema de 30 bus del IEEE, el nodo con mayor centralidad de cercanía es el nodo 6 (que sigue mostrando tener relevancia en el sistema), se puede considerar como el nodo más cercano a todos los demás, ya que la longitud media de todos los caminos más cortos desde ese nodo a cualquier otro del sistema es la mínima. Por lo tanto, la energía transferida desde ese nodo tiene que viajar menos *pasos* para llegar a cualquier nodo de destino. Además del nodo 6, los nodos con mayor centralidad de cercanía en la red son los nodos 10, 4, 2 y 28, esto se puede interpretar en la figura 3.

Los nodos con valores de centralidad de cercanía más altos se ubican en el centro del grafo, mientras que los nodos con valores más pequeños, como los nodos 26, 29 y 30, se encuentran en el borde del grafo. Esto se observa con facilidad en la figura 9.

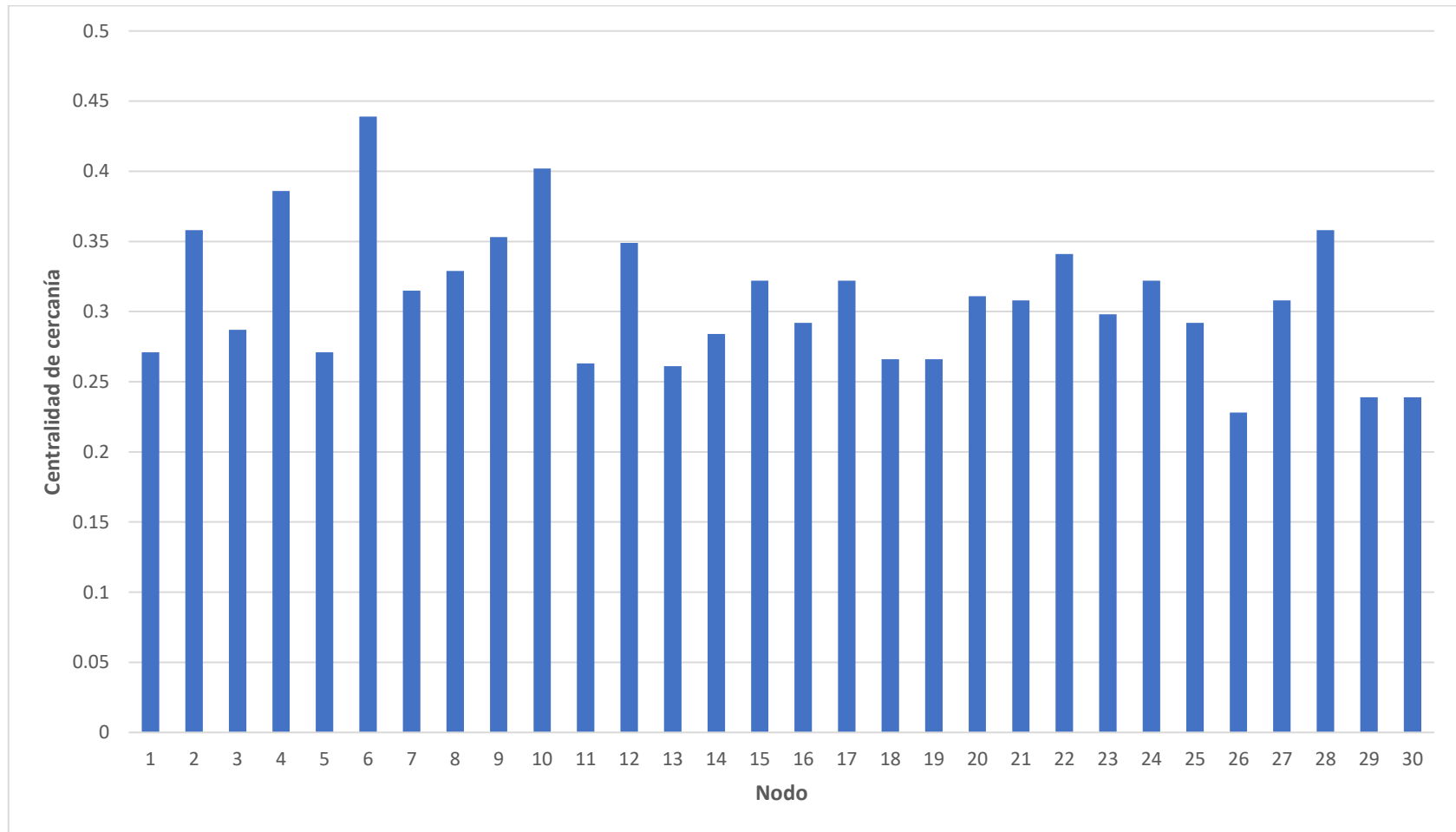


Fig. 11. Centralidad de cercanía del sistema de 30-bus del IEEE. Ya que la red cuenta con pocos nodos, los valores observados son similares, sin embargo, los nodos con mayor valor de centralidad se encuentran más cerca a los demás nodos.

### **4.3 Centralidad de intermediación**

La figura 12 muestra la centralidad de intermediación de los nodos del sistema de 30-bus del IEEE, este parámetro ayuda a encontrar el nodo que permite que la energía pase de un nodo de red a otro. El nodo 6, tiene el mayor valor (seguido de los nodos 10 y 4), lo que significa que actúa para la mayoría de los caminos entre nodos como un “puente”. Se puede suponer que los nodos con centralidad de intermediación baja o nula (nodos 1, 3, 5, 8, 11, etc.) se ubican en el borde de la red, ya que actúan como puntos de distribución finales o también como nodos fuente.

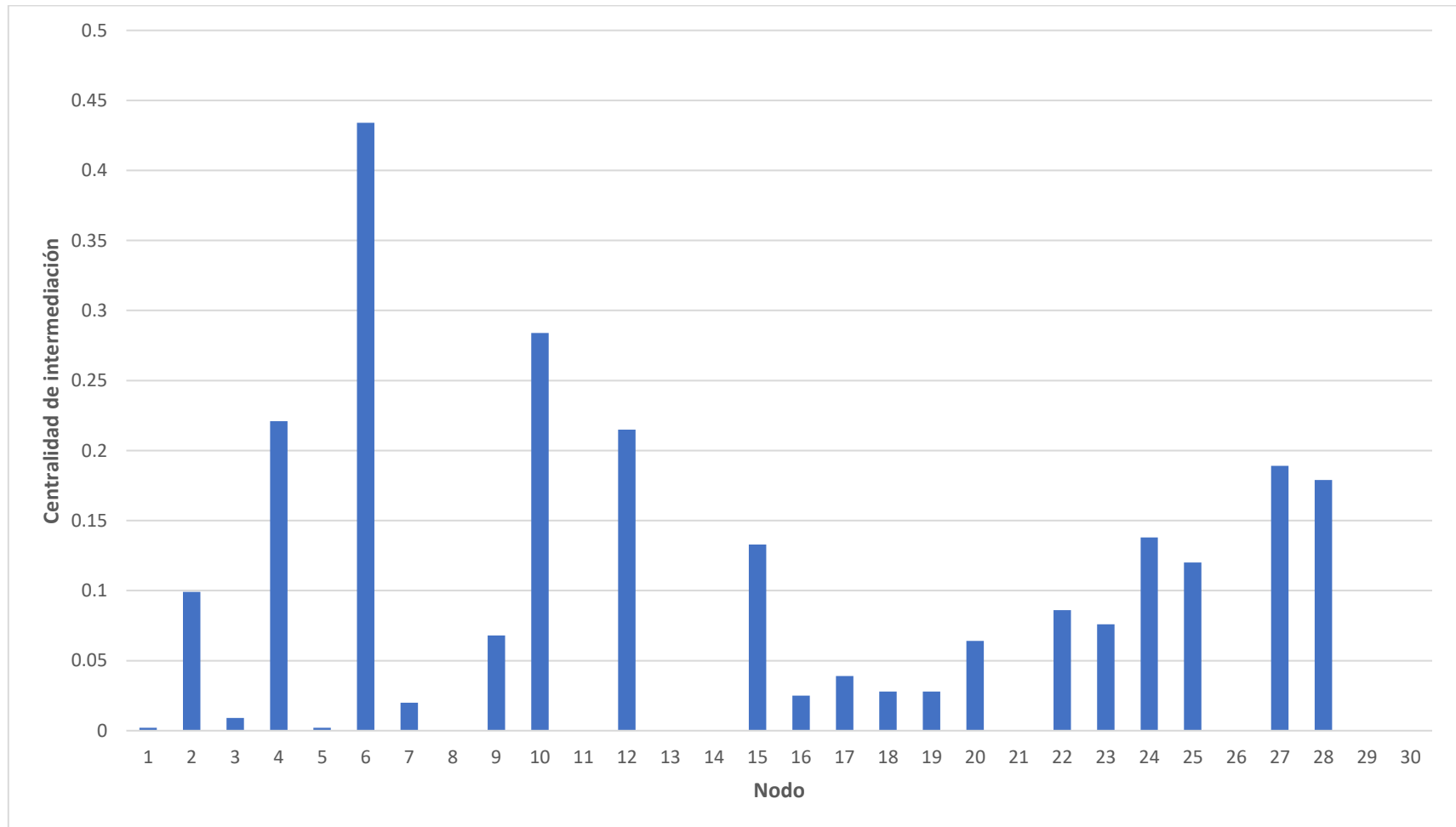


Fig. 12. Centralidad de intermediación del Sistema de 30-bus del IEEE. Los nodos con un valor alto de centralidad de intermediación, son comúnmente utilizados como “puente” para pasar energía entre un par de nodos en la red.



#### **4.4 Colocación de elementos de generación distribuida**

Para decidir cuál era el criterio óptimo para agregar un nuevo generador distribuido, la tabla 2 compara las diferencias entre centralidades obtenidas del sistema. El nodo con los valores de centralidad más altos resultó ser el nodo 6 (resaltado en rojo), seguido del nodo 10 (resaltado en azul), además, los nodos con centralidades altas están resaltados en verde. Como se comentó anteriormente, estos valores cuantifican propiedades estructurales del sistema, determinando los nodos más importantes. Entonces, cuanto mayor sea la centralidad, más importante se vuelve el nodo dentro de la red. Las pérdidas del sistema se reducirán añadiendo elementos GD al sistema, teniendo en cuenta dichas características topológicas.

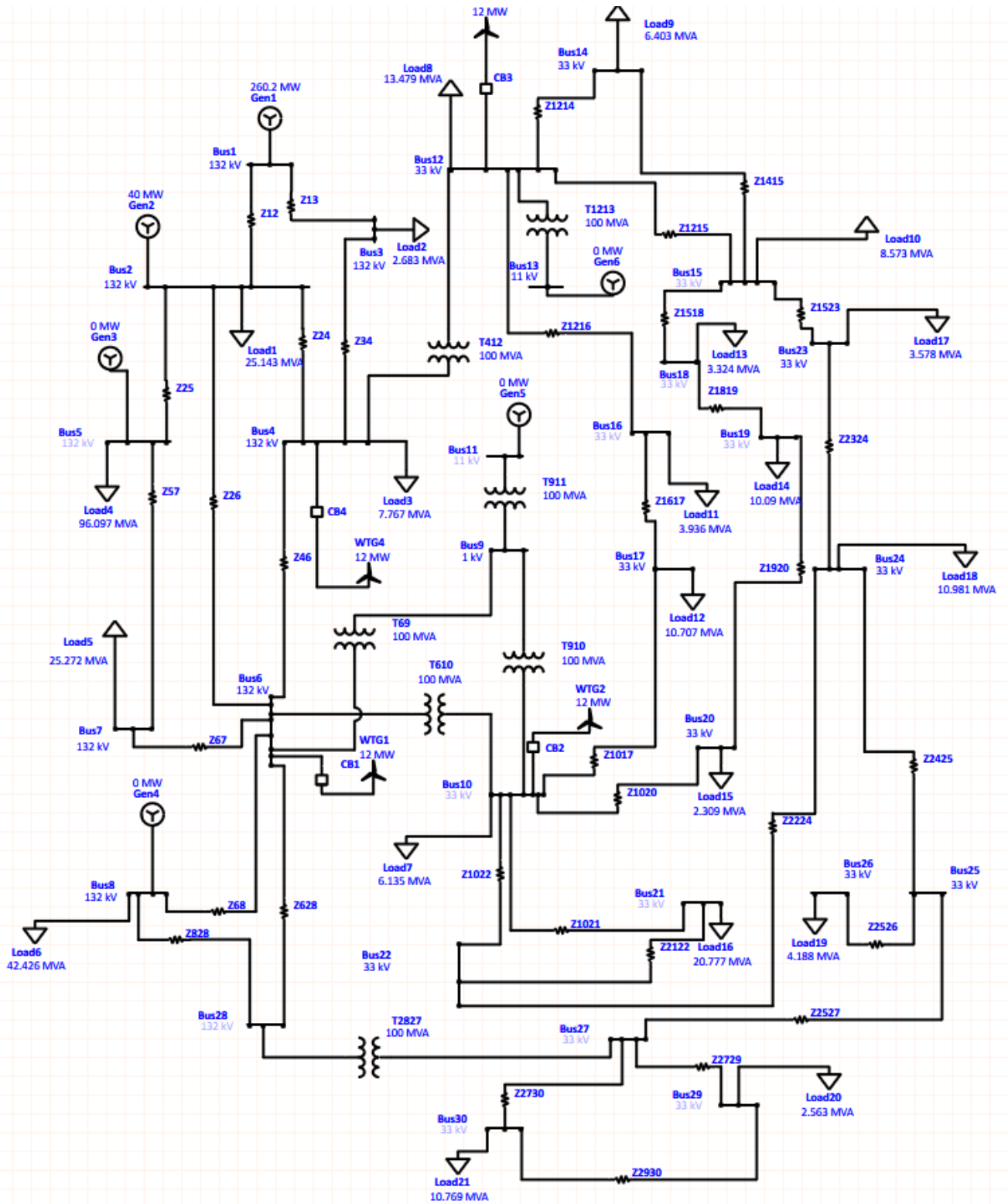
Para hacer una comparación, esta red también fue analizada y optimizada en [6], utilizando el algoritmo de *colonia de hormigas*, para minimizar la pérdida de potencia real total y mejorar el perfil de voltaje dentro del sistema. Este algoritmo se utiliza para derivar los sitios y tamaños óptimos de GD en un sistema de distribución de energía. En este trabajo, solo se agregaron cuatro aerogeneradores genéricos a los nodos seleccionados teniendo en cuenta las métricas de teoría de grafos mencionadas anteriormente, para reducir las pérdidas del sistema.

La GD ha sido estudiada en profundidad en los últimos años, lo que implica que para ser planificada y aplicada correctamente se necesita un estudio completo según el objetivo como en [4, 7, 5, 6]. Por lo que, en este trabajo, sólo se utilizan como auxiliares para demostrar la importancia de los puntos localizados como importantes dentro de la red.

Tabla 2. Comparación entre las centralidades de los nodos del sistema de 30-bus del IEEE.

Nodo	Centralidad de grado	Centralidad de cercanía	Centralidad de intermediación
1	0.068	0.271	0.002
2	0.137	0.358	0.099
3	0.068	0.287	0.009
4	0.137	0.386	0.221
5	0.068	0.271	0.002
6	0.241	0.439	0.434
7	0.068	0.315	0.02
8	0.068	0.329	0
9	0.103	0.353	0.068
10	0.206	0.402	0.284
11	0.034	0.263	0
12	0.172	0.349	0.215
13	0.034	0.261	0
14	0.068	0.284	0
15	0.137	0.322	0.133
16	0.068	0.292	0.025
17	0.068	0.322	0.039
18	0.068	0.266	0.028
19	0.068	0.266	0.028
20	0.068	0.311	0.064
21	0.068	0.308	0
22	0.103	0.341	0.086
23	0.068	0.298	0.076
24	0.103	0.322	0.138
25	0.103	0.292	0.12
26	0.034	0.228	0
27	0.137	0.308	0.189
28	0.103	0.358	0.179
29	0.068	0.239	0
30	0.068	0.239	0

Fig. 13. Modelo Etap del sistema de 30-bus del IEEE. Los elementos GD han sido añadidos a los nodos con mayores valores de centralidad en el sistema.



Las pérdidas actuales del sistema se especifican en la figura 14, como se observa, las pérdidas más sustanciales ocurren en las líneas 1-6, lo cual se debe a que la mayor parte de la energía que se suministra al sistema pasa primero por esas líneas, antes de llegar al resto de los nodos. Para solucionarlo, la energía puede provenir de diferentes puntos del sistema agregando elementos GD. Los nodos resaltados en la tabla 2 son nodos con altos valores de centralidad y están ubicados en puntos críticos de la red. Se pueden esperar mejoras al agregar máquinas de GD en esos puntos. Sin embargo, dado que se han ignorado las características intrínsecas de la red de distribución y solo se han considerado las características topológicas, estas actualizaciones podrían ser inexactas.

Teniendo en cuenta todas las centralidades calculadas, se agregaron cuatro elementos de GD (aerogeneradores genéricos de 12 MW) a los nodos 6, 10, 12 y 4 para mejorar el rendimiento de la red y, se observó una reducción de pérdidas (fig.14, línea roja).

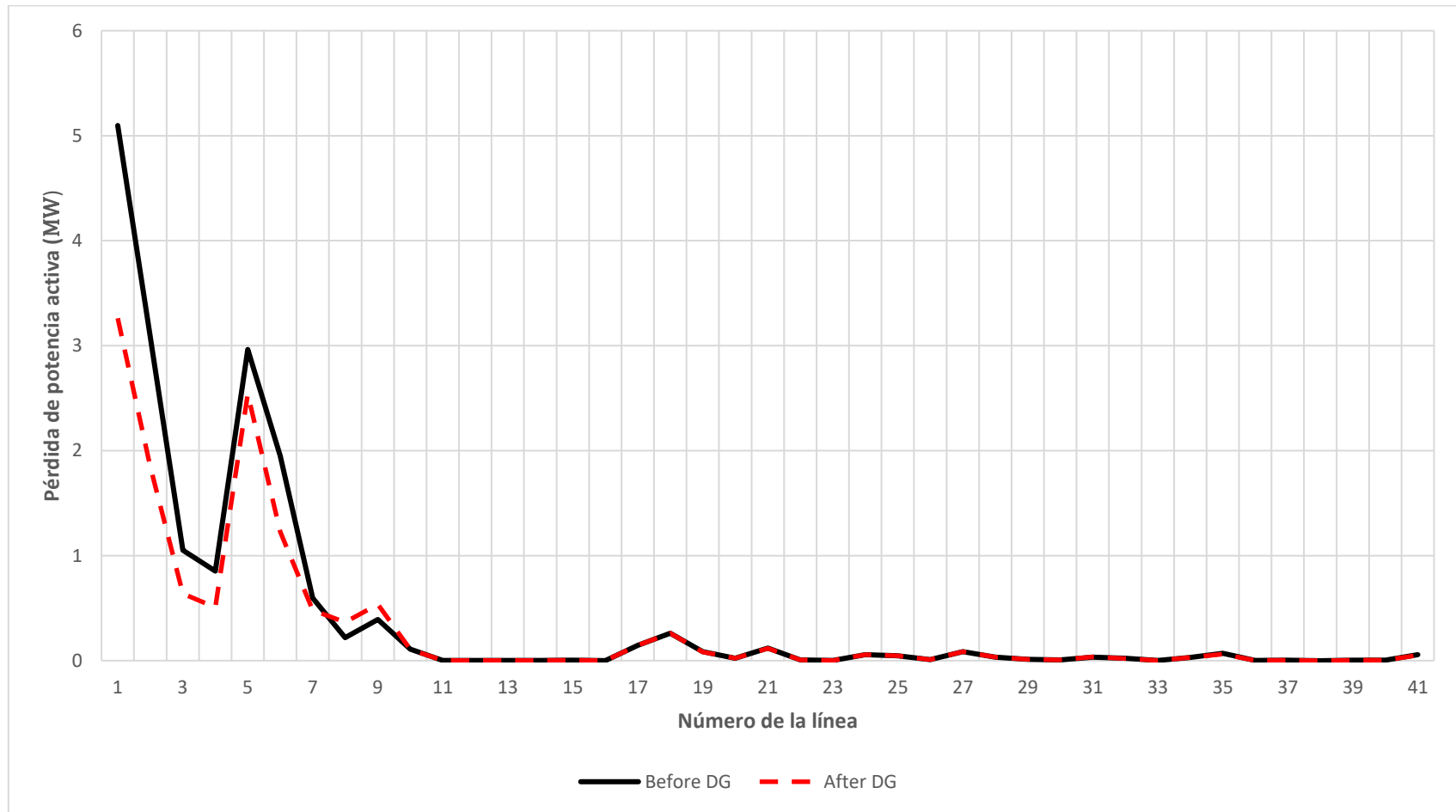


Fig. 14. Pérdida de potencia activa del sistema de 30-bus del IEEE. Las pérdidas más significativas se encuentran en las líneas 1-6, se puede observar una mejora después de la implementación de los elementos de GD, la cual consiste en la implementación de cuatro turbinas de 12 MW de capacidad, las cuales se encuentran en los nodos 6, 10, 12 y 4.

Luego de la colocación de GD, se observa una variación de tensión en la mayoría de los nodos (Figura 15), sin embargo, el sistema se mantiene dentro del límite de tensión de bus establecido (0.95 – 1.05 p.u.). Excepto el nodo 1, que es de 1,06 p.u. (permanece prácticamente si cambios). Se puede afirmar que el estrés al que estaba sometida la red eléctrica ha disminuido, debido a que las condiciones de operación de cada nodo se han reconfigurado, disminuyendo la tensión y permaneciendo por debajo del límite de sobrecarga. También, se puede observar que el nodo 26 tiene un valor bajo de tensión (0.95 p.u.), sin embargo, permanece dentro de los límites establecidos.

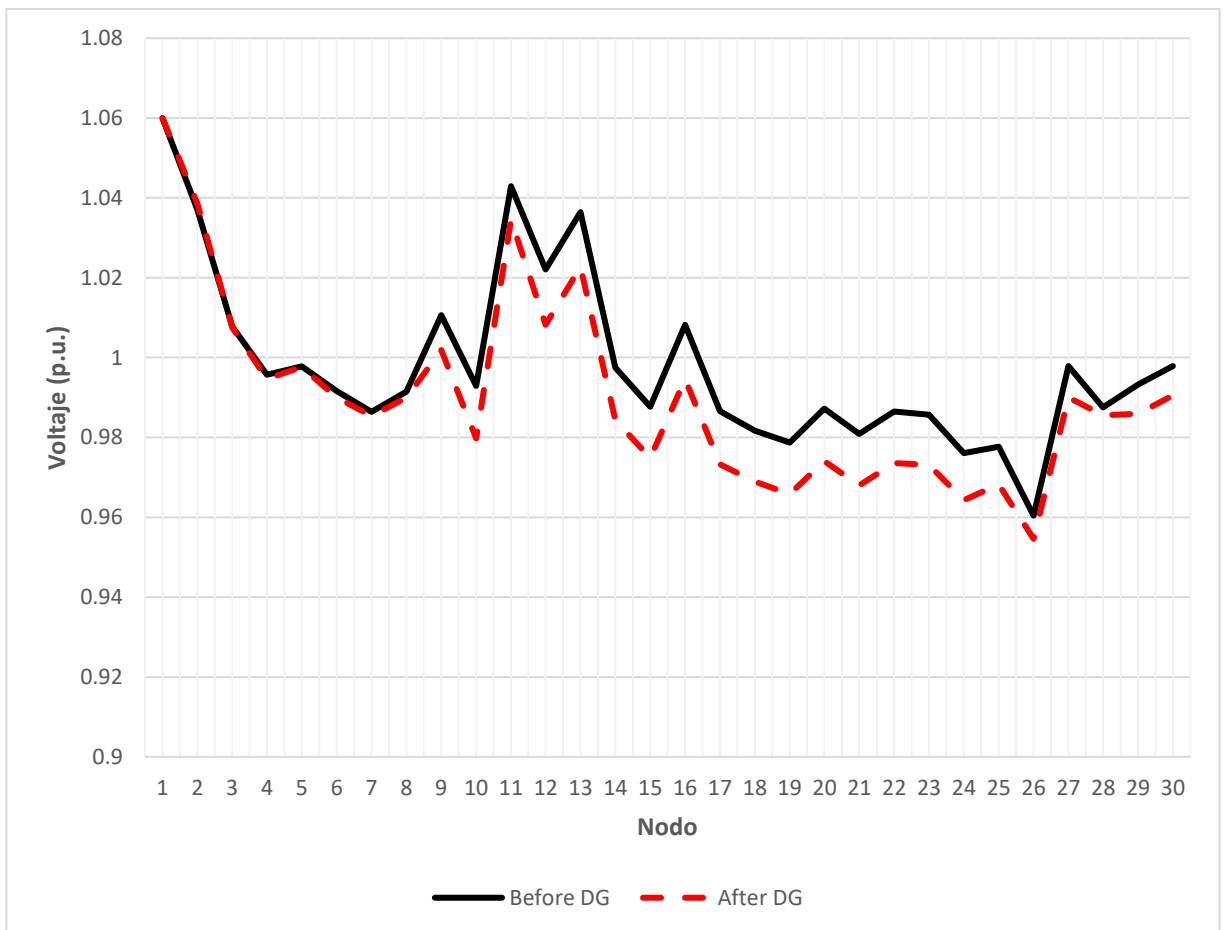


Fig. 15. Voltaje (p.u.) en cada uno de los nodos del sistema de 30-bus del IEEE. Una variación en el voltaje puede observarse después de la colocación de la GD en los nodos 6, 10, 12 y 4.

#### 4.5 Aproximación con la teoría de grafos

Después de agregar los elementos DG a los nodos 6, 10, 12 y 4, se colocaron las turbinas de viento en diferentes nodos para probar la eficiencia de la teoría de grafos y, para establecer qué nodos podrían ser más relevantes en el sistema. Se hizo una comparación en la tabla 3.

Tabla 3. Diferentes escenarios probados para determinar la eficiencia de la teoría de grafos para la colocación de GD.

	<b>Nodos donde se colocó la GD</b>	<b>Pérdida de potencia activa (MW)</b>
<b>Teoría de grafos</b>	6,10,12,4	12.62
<b>Nodos con la carga más grande conectada (132 KV)</b>	5,8,7,2	12.17
<b>Nodos con la carga más grande conectada (33 KV)</b>	21,12,30,19	12.20
<b>Nodos observados con la mayor reducción de pérdidas después de la adición de un solo elemento de GD (turbina de viento de 12 MW)</b>	19,18,23,15	12.85

Como se ve en la tabla 3, el criterio de la teoría de grafos para colocar nuevos elementos GD no es la forma más eficiente de reducir las pérdidas del sistema. Sin embargo, se pueden observar algunas mejoras en cuanto a reducción de pérdidas.

A través de la simulación, se ha comprobado que, para demostrar los beneficios de utilizar la teoría de grafos como criterio para la implementación de elementos de GD, es necesario realizar el análisis con cargas iguales en cada nodo comparado.

De esta forma (en la tabla 4) se ha comparado a uno de los nodos con la carga más significativa en el sistema (nodo 21) contra los nodos con valores altos de centralidad (para esto se supone que los nodos comparados tienen cargas

iguales), se les añadió un elemento de GD, y, se hizo una comparación en cuanto a reducción de pérdidas de energía.

Table 4. Comparación entre el nodo 21 y los nodos con valores altos de centralidad del sistema de 30-bus del IEEE.

<b>Nodo</b>	<b>Pérdida de potencia activa en el sistema (MW)</b>
21	17.375
10	15.928
21	16.394
12	16.535
21	17.434
27	17.340
21	16.793
15	16.7



## 5. Conclusión

La implementación de elementos de GD en una red de distribución, busca disminuir los costos de producción y transporte de energía que implica una generación central. En sí, los principales beneficios de posicionar GD cerca de los centros de carga se pueden generalizar como una reducción de pérdidas en redes de distribución y, como un respaldo de generación de energía.

La metodología propuesta demuestra que el sistema puede optimizarse implementando máquinas GD a los nodos más importantes, teniendo como criterio las centralidades calculadas con la teoría de grafos. Como se observó en la figura 15, el perfil de voltaje bajó sus valores con respecto al límite de tensión en la mayoría de los nodos de la red, esto es importante para el sistema de distribución, ya que evita problemas como: una carga desequilibrada entre las fases, sobrecargas, compensación inadecuada del factor de potencia, etc. [22]. Además, en la figura 14 se puede apreciar una reducción de pérdidas de potencia activa significativa.

Por otra parte, cabe mencionar que los casos en los que se aprecia una mayor eficiencia por parte de la metodología en cuanto a reducción de pérdidas de potencia son, cuando se asume que los nodos que son comparados tienen la misma tensión nominal, y, se encuentran suministrando cargas iguales, o similares. De esta forma, se demuestra que los nodos con mayor centralidad en el sistema ayudan a reducir las pérdidas si se les coloca un elemento de GD.

Esta metodología se diferencia de otras por la sencillez de su aplicación, sin embargo, su efectividad depende de condiciones muy específicas. Como se mencionó anteriormente, se necesita la misma tensión nominal y las mismas cargas conectadas en los nodos que serán comparados después de añadir GD. Para determinar la eficacia de la metodología propuesta, se sugiere aplicar los procedimientos descritos en este trabajo a otras redes de distribución y comparar resultados, no obstante, es bien sabido que la

implementación óptima de GD es un tema ampliamente estudiado, y, existen muchos métodos para este fin (algunos ejemplos se mencionan en [9]), es por esto que se recomienda que la metodología propuesta en este trabajo se utilice como una primera aproximación para la obtención rápida de datos de interés.

En conclusión, el objetivo de este trabajo fue crear una metodología que ayude a ubicar los nodos importantes en una red de distribución, considerando los valores de centralidad obtenidos por la teoría de grafos, y con base en esto, añadir elementos de GD de la Smart Grid para disminuir las pérdidas en el sistema.

## Referencias

- [1] E. León, A. Reyes, A. Gutiérrez y G. Chávez, «Smart Grids en México: Situación actual, retos y propuesta de implementación,» *Ingeniería Investigación y Tecnología*, vol. XX, nº 2, 2019.
- [2] M. A. Mohamed y A. M. Eltamaly, *Modeling and simulation of smart grid integrated with hybrid renewable systems*, New York: Springer, 2018.
- [3] J. A. Momoh, *Energy Processing and Smart Grid*, Hoboken, New Jersey: John Wiley & Sons, Inc., 2018.
- [4] A. Basco , G. Beliz, D. Coatz y P. Garnero, *Industria 4.0 fabricando el futuro*, Inter-American Development Bank, 2018.
- [5] S. Kakran y S. Chanana, «Smart operations of smart grids integrated with distributed generation: A review,» *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 81, pp. 524-535, 2018.
- [6] Z. M. Ali, I. M. Diaaeldin, A. El-Rafei, H. M. Hasanien, S. H. Abdel Aleem y A. Y. Abdelaziz, «A novel distributed generation planning algorithm via graphically-based network reconfiguration and soft open points placement using Archimedes optimization algorithm,» *Ain Shams Engineering Journal*, pp. 1923-1941, 2020.
- [7] G. V. Naga Lakshmi, A. Jayalaxmi y V. Veeramsetty, «Optimal placement of distributed generation using firefly algorithm,» *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, vol. 981, p. 042060, 2020.
- [8] A. Amos Ogunsina, M. Omolayo Petinrin, O. Olayemi Petinrin, E. Nelson Offornedo, J. Olawole Petinrin y G. Olusola Asaolu, «Optimal distributed generation location and sizing for loss minimization and voltage profile optimization using ant colony algorithm,» *SN Applied Sciences*, vol. 3, p. 248, 2021.
- [9] A. Shuaibu Hassan, Y. Sun y Z. Wang, «Optimization techniques applied for optimal planning and integration of renewable energy sources based on distributed generation: Recent trends,» *Cogent Engineering*, vol. 3, p. 248, 2021.
- [10] C.-C. Chu y H. H.-C. Iu, «Complex Networks Theory For Modern Smart Grid Applications: A Survey,» *IEEE Journal*, vol. 7, nº 2, pp. 177-191, 2017.
- [11] A.-L. Barabási, *Network Science*, Cambridge: Cambridge University Press, 2016.

- [12] S. Anuj, M. Mobi, M. Indradip y A. Naqui, «Approaches Leading to Different Definitions of Smart Grid: A Review,» *IEEE*, pp. 600-606, 2018.
- [13] X. Fang, S. Misra, G. Xue y D. Yang, «Smart Grid – The New and Improved Power Grid: A Survey,» *IEEE Communications Surveys & Tutorials*, vol. 14, nº 4, pp. 944-980, 2012.
- [14] R. N. Anderson, «Final Report on the Blackout in the United States and Canada: Causes and Recommendations Final Report on the Blackout in the United States and Canada: Causes and Recommendations,» 2004.
- [15] M. S. Rahman, *Basic Graph Theory*, Cham: Springer, 2017.
- [16] J. Zhang y Y. Luo, «Degree Centrality, Betweenness Centrality, and Closeness Centrality in Social Network,» *Advances in Intelligent Systems Research*, vol. 132, pp. 1-4, 2017.
- [17] J. Golbeck, *Introduction to Social Media Investigation: A Hands-on Approach*, Elsevier, 2015.
- [18] M. Nitti, *An Approach Based on Complex Network to Analyse and Optimise Smart Grid*, Cagliari: University of Cagliari, 2013.
- [19] M. Latapy y M. Clémence , «Complex Network Measurements: Estimating the Relevance of Observed Properties,» *IEEE* , pp. 1660-1668, 2008.
- [20] G. Henriquez Harper, *Manual de instalaciones eléctricas residenciales e industriales*, Limusa, 2019.
- [21] V. Jagadishprasad Mishra y M. D. Khardennis, «Contingency Analysis of Power System,» *IEEE Students' Conference on Electrical, Electronics and Computer Science*, pp. 1-4, 2012.
- [22] P. Sivaraman, C. Sharmeela y D. P. Kothari, «Enhancing the Voltage Profile in Distribution System with 40 GW of Solar PV Rooftop in Indian Grid by 2022: A review,» 2017.

Cuernavaca, Mor., a 27 de septiembre de 2022.



**Dr. J. Guadalupe Velásquez Aguilar**  
**Dr. Mario Limón Mendoza**  
**Dr. Luis Cisneros Villalobos**  
**Dr. Noureddine Lakouari**  
**Dr. Outmane Oubram**  
**PROFESORES DE LA FCQEI**  
**P R E S E N T E**

Por este conducto, me permito informarle que ha sido asignado como integrante de la Comisión Revisora de la tesis que presenta el Ing. Brian Daniel Gutiérrez Reyna titulada: Metodología basada en la teoría de grafos para el análisis y optimización de un sistema de distribución eléctrica a través de la implementación de elementos de una Smart Grid realizada bajo la dirección del Dr. Outmane Oubram y Dr. Noureddine Lakouari en el Programa Educativo de Maestría en Ingeniería Eléctrica y Electrónica. Agradezco su valiosa participación en esta Comisión y quedo a sus órdenes para cualquier aclaración o duda al respecto.

A T E N T A M E N T E  
*Por una humanidad culta*

**DRA. VIRIDIANA AYDEÉ LEÓN HERNÁNDEZ**  
**DIRECTORA DE LA FCQEI**

**D I C T A M E N**

**DRA. VIRIDIANA AYDEÉ LEÓN HERNÁNDEZ**  
**ENCARGADA DE DESPACHO DE LA DIRECCIÓN DE LA FCQEI**

**P R E S E N T E**

En respuesta a su amable solicitud para formar parte de la Comisión Revisora de la tesis mencionada y una vez realizada la revisión correspondiente, me permito informarle que mi VOTO es:.

**DICTAMEN**

NOMBRE	VOTO	FIRMA
Dr. J. Guadalupe Velásquez Aguilar		
Dr. Mario Limón Mendoza		
Dr. Luis Cisneros Villalobos		
Dr. Noureddine Lakouari		
Dr. Outmane Oubram		



UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DEL  
ESTADO DE MORELOS

Se expide el presente documento firmado electrónicamente de conformidad con el ACUERDO GENERAL PARA LA CONTINUIDAD DEL FUNCIONAMIENTO DE LA UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DEL ESTADO DE MORELOS DURANTE LA EMERGENCIA SANITARIA PROVOCADA POR EL VIRUS SARS-COV2 (COVID-19) emitido el 27 de abril del 2020.

El presente documento cuenta con la firma electrónica UAEM del funcionario universitario competente, amparada por un certificado vigente a la fecha de su elaboración y es válido de conformidad con los LINEAMIENTOS EN MATERIA DE FIRMA ELECTRÓNICA PARA LA UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE ESTADO DE MORELOS emitidos el 13 de noviembre del 2019 mediante circular No. 32.

### Sello electrónico

**VIRIDIANA AYDEE LEON HERNANDEZ** | Fecha:2022-09-27 15:31:45 | Firmante

XzEb3AiySwz+vAZa300cSwuTjmNUb+0jibIGS2yefzLQ7iRoMqeGg6QImBihk1luQyNi+ooTZNUTj2G2AnG2YvQQejAHQJJ+vBtRhuX7f4eMRvrbqa1D3km5QrpsyH7Eqn97XPXQcP2i7clPsdPKSdmi93PLEtGVFQXf/zYD0iQV4eLVZCys0OjZhfX7bl2MmPTRw7Lq6rETHN++RtGHNNNtfHvstJck02DZ5hW9bJlhOntE44ETzwiYedMM8TV/WksdbBJDbLFPx6Y3KAdio+hBMJD2N2guri38NZMXJEFBAZ9y17vEjv18Fb/0ZXWidNDUvs2EA2QIUvLgKunsw==

Puede verificar la autenticidad del documento en la siguiente dirección electrónica o escaneando el código QR ingresando la siguiente clave:



[Sc2idjKfh](#)

<https://efirma.uaem.mx/noRepudio/FHRk2bAwBSKBTI8zS3QI1oA1D37sAWFk>





UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DEL  
ESTADO DE MORELOS

Se expide el presente documento firmado electrónicamente de conformidad con el ACUERDO GENERAL PARA LA CONTINUIDAD DEL FUNCIONAMIENTO DE LA UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DEL ESTADO DE MORELOS DURANTE LA EMERGENCIA SANITARIA PROVOCADA POR EL VIRUS SARS-COV2 (COVID-19) emitido el 27 de abril del 2020.

El presente documento cuenta con la firma electrónica UAEM del funcionario universitario competente, amparada por un certificado vigente a la fecha de su elaboración y es válido de conformidad con los LINEAMIENTOS EN MATERIA DE FIRMA ELECTRÓNICA PARA LA UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE ESTADO DE MORELOS emitidos el 13 de noviembre del 2019 mediante circular No. 32.

### Sello electrónico

**OUTMANE OUBRAM | Fecha:2022-09-27 20:17:58 | Firmante**

PZAnyyjTqbajF8F6+xcCMIYhzUtoMPXMZnjDmfQIQVHCkQEvc/HGex20cgGEECoQu414kAWLh1rPX9NAu7/IRS1x9Uow29971VLjPwB4y6S9L7QVSz03mNOOWJFsaGPM7uxZl+d0eGSyBzhSfyip3MFQ3aAOCqTtk0zsTaeCS+TLA6nUA1Tw3rPXJDLHP1vgOuXnliHsAy+TMIDWwDj5w0P1jGjWGK8LxTR0pz5y0+JhUpRq4cvRGMcek3S4VWd42XZdmkB20tj15u1inqb7wk/ITG6Wyy/WCgYDCncfT28L2z3ubQT9j3ixWksM8romiVrDK8XpxUvW6miLIRYGEw==

**MARIO LIMON MENDOZA | Fecha:2022-09-27 20:25:31 | Firmante**

R963xCprciOVPOYGWcB/MQFiSvplxlzR1XdTN/0OGox8LT57hvD4LST8eXOA6N7KMDOXxEwCaLkcoRB+bjq0TBVkJZgtEjdsIFNVzIO4Sdl5y1I0zj9E711Q7eyzohHaD12f5qNLOwXA5PSEhr11/j9IMbrK1pl/gzrNfrIeudxPWinthe7wTIUq4rF5aMAavop5RMCPMH8ZzBOSSVDrVCyavfHCHZxOykC84AZ/SSNJVE2vDYJcv5SuF096SNVv10SaGuSe2P7SIAfDgZwNgLYINHEeOTpi1TKS3LOJQMEEBayw8PWp3X+Zl6j+OlpRG+R1lwkhviMu7rTrfNUfPw==

**NOUREDDINE LAKOUARI | Fecha:2022-09-27 21:47:21 | Firmante**

fDf8xsZ6ZPmBFTbagT4S9BSlgOGHtOnykBdf/mt2pmb095uOcgQ7SPR/GE4qBM4atWJKGbaNiUQyggHfjvffgpxbiRwPE2TkMm/GKUcadg0qm4N7Uu8DM/0AKKFj5uw6VytHmL/DfSIUQ4BogUxYECdnthbBMsAGVcyxRCYfnKChYXyqfMoLG7dLWH1ZMvsehP/XtEBqQLNcRY3HXCsfLzzBDwEh5ym1IOfliv1KkjtQuHtl+hiN4vsWhEaANM0Ph8bBV/0HGDoagylomyIL8fzDyk8PHsFzu8QGfJbJXmkym7YZlfQYpVcJ5MtujizKhqvx8fDMgZVErj9FQ==

**J GUADALUPE VELASQUEZ AGUILAR | Fecha:2022-09-28 08:28:16 | Firmante**

nUJKCPWMjW3g612tnfAlfPORuupSTUpQoXdlxfUdjOvd255rR9ib4HVmYznmzA5B9lerZfu8e9PCI20uEKkftW8CyknzTd97Hytl3Kdd6NVpGtUof517I/ARR01rW0vCRrahCtiPYVdA1vkbxnM1LvB7DczAa3TCQb43i9oOwVNWzxTy72kwlH2LRw02gISJKhq2MySq4Hu/Xrgo3HzEIo9/qP9sMSCmOw9qvBIU1p7PpjeRM6ZNgg6ppRE/OyKqXxVozYd+jBcAMc1qri58tFPJhwiuElfl1z3W6eydahYckjQAn+3x8CCg+4L4Xy7MQuP1Ai8QoipXfaaLAW==

**LUIS CISNEROS VILLALOBOS | Fecha:2022-09-28 16:49:45 | Firmante**

jq8fSycM8NoNJKTy77/wB13SPICfhaBKRbQMgR7QbJLphaO28A2uLo3UI7e0TkT7GN7zl4n9rh/RcpUeM2vyCNe+NQjXIRJba7t0h3nz4ETU0koDHSxVTzEeUEY6SG1pSyiJOJCmyz81r+/EetbhhZpLTjz7Llq6722RgZzQ7MMIMFgUgiSrCiuCazYiXZ4sjjIRnp4Hka9VlSrPiuPMzCKFYXJsp2ZpfGrQbN6KGj0w0/GLulft/cpdu5EXZBfng4dKw13qg2iuCE4s9gqmWZzjhHvCUT9nVgZSlvq4/AxxgmEbYWNQY3jP/8+4/yMX1DKvFDEIhR2KaDrQ==

Puede verificar la autenticidad del documento en la siguiente dirección electrónica o escaneando el código QR ingresando la siguiente clave:



y7zqMT0YB

<https://efirma.uaem.mx/noRepudio/NVBhNBISogestVpH5PvugOMIK2HtjBD3>

