

**MINIMIZACIÓN DE PÉRDIDAS EN REDES DE
TRANSMISIÓN BASADO EN EL ANÁLISIS DE
CAPACIDAD DE TRANSFERENCIA DE LAS
LÍNEAS, MEDIANTE ÓPTIMOS FLUJOS DE
POTENCIA**



**UNIVERSIDAD POLITÉCNICA SALESIANA
SEDE QUITO
CARRERA DE ELECTRICIDAD**

**MINIMIZACIÓN DE PÉRDIDAS EN REDES DE
TRANSMISIÓN BASADO EN EL ANÁLISIS DE
CAPACIDAD DE TRANSFERENCIA DE LAS
LÍNEAS, MEDIANTE ÓPTIMOS FLUJOS DE
POTENCIA**

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

**AUTOR: ANTHONY FRANCISO MANTILLA CIFUENTES
TUTOR: DIEGO FRANCISCO CARRIÓN GALARZA**

Quito -Ecuador
2022

Anthony Francisco Mantilla Cifuentes

MINIMIZACIÓN DE PÉRDIDAS EN REDES DE TRANSMISIÓN BASADO EN EL ANÁLISIS DE CAPACIDAD DE TRANSFERENCIA DE LAS LÍNEAS, MEDIANTE ÓPTIMOS FLUJOS DE POTENCIA

Universidad Politécnica Salesiana, Quito – Ecuador 2022

Carrera de Electricidad

Breve reseña histórica e información de contacto.



Anthony Fráncico Mantilla Cifuentes (Y'1996). Realizó sus estudios de nivel secundario en la Unidad Educativa “Pedro Pablo Borja N°1” de la ciudad de Quito. Estudiante de la carrera de Ingeniería Eléctrica de la Universidad Politécnica Salesiana. Su trabajo se basa en la minimización de pérdidas en redes de transmisión basado en el análisis de capacidad de transferencia de las líneas, mediante óptimos flujos de potencia. amantillac2@est.ups.edu.ec

Dirigido por:



Diego Francisco Carrión Galarza (Y'1981). Doctor y Máster en Ingeniería por la Universidad Pontificia Bolivariana, Medellín – Colombia, Máster en Energías Renovables por la Universidad de las Fuerzas Armadas, Sangolquí – Ecuador, Ingeniero Eléctrico por la Universidad Politécnica Salesiana, Quito – Ecuador. Profesor e investigador de la Universidad Politécnica Salesiana – Quito, Ecuador. En la actualidad es miembro del grupo de investigación Redes Eléctricas Inteligentes (GIREI). dcarrion@ups.edu.ec

Todos los derechos reservados:

Queda prohibida, salvo excepción prevista en la ley, cualquier forma de reproducción, distribución, comunicación pública y transformación de esta obra para fines comerciales, sin contar con la autorización de los titulares de propiedad intelectual. La infracción de los derechos mencionados puede ser constitutiva de delito contra la propiedad intelectual. Se permite la libre difusión de este texto con fines académicos o investigativos por cualquier medio, con la debida notificación a los autores.

DERECHOS RESERVADOS

©2022 Universidad Politécnica Salesiana

QUITO - ECUADOR

CERTIFICADO DE RESPONSABILIDAD Y AUTORÍA DEL TRABAJO DE TITULACIÓN

Yo, Anthony Francisco Mantilla Cifuentes con documento de identificación N° 1724303662 manifiesto que:

Soy el autor y responsable del presente trabajo; y, autorizo a que sin fines de lucro la Universidad Politécnica Salesiana pueda usar, difundir, reproducir o publicar de manera total o parcial el presente trabajo de titulación.

Quito, 13 de septiembre del año 2022

Atentamente,



Anthony Francisco Mantilla Cifuentes

1724303662

**CERTIFICADO DE CESIÓN DE DERECHOS DE AUTOR DEL TRABAJO DE
TITULACIÓN A LA UNIVERSIDAD POLITÉCNICA SALESIANA**

Yo, Anthony Francisco Mantilla Cifuentes con documento de identificación No. 1724303662, expreso mi voluntad y por medio del presente documento cedo a la Universidad Politécnica Salesiana la titularidad sobre los derechos patrimoniales en virtud de que soy autor del Artículo Académico: “Minimización de pérdidas en redes de transmisión basado en el análisis de capacidad de transferencia de las líneas, mediante óptimos flujos de potencia”, el cual ha sido desarrollado para optar por el título de: Ingeniero Eléctrico, en la Universidad Politécnica Salesiana, quedando la Universidad facultada para ejercer plenamente los derechos cedidos anteriormente.

En concordancia con lo manifestado, suscribo este documento en el momento que hago la entrega del trabajo final en formato digital a la Biblioteca de la Universidad Politécnica Salesiana.

Quito, 13 de septiembre del año 2022

Atentamente,



Anthony Francisco Mantilla Cifuentes

1724303662

CERTIFICADO DE DIRECCIÓN DEL TRABAJO DE TITULACIÓN

Yo, Diego Francisco Carrión Galarza con documento de identificación N° 1713703062, docente de la Universidad Politécnica Salesiana, declaro que bajo mi tutoría fue desarrollado el trabajo de titulación: MINIMIZACIÓN DE PÉRDIDAS EN REDES DE TRANSMISIÓN BASADO EN EL ANÁLISIS DE CAPACIDAD DE TRANSFERENCIA DE LAS LÍNEAS, MEDIANTE ÓPTIMOS FLUJOS DE POTENCIA, realizado por Anthony Francisco Mantilla Cifuentes con documento de identificación N° 1724303662, obteniendo como resultado final el trabajo de titulación bajo la opción Artículo Académico que cumple con todos los requisitos determinados por la Universidad Politécnica Salesiana.

Quito, 13 de septiembre del año 2022

Atentamente,



Ing. Diego Francisco Carrión Galarza, MSc.
1713703062

ÍNDICE GENERAL

1	Introducción	2
2	Pérdidas en líneas de transmisión.....	4
2.1	Clasificación de las pérdidas.....	4
2.2	Formulación de pérdidas en líneas de transmisión.....	4
2.2.1	Pérdidas por efecto corona.....	4
2.3	Estabilidad de sistemas de potencia	7
2.3.1	Estabilidad angular	7
2.3.2	Curva P- δ	7
2.3.3	Límites de estabilidad	7
2.3.4	Estabilidad de tensión.....	8
2.3.5	Curva P-V.....	8
3	Modelo de optimización para minimización de pérdidas	8
4	Formulación del problema.....	9
4.1	Modelo de optimización para minimización de pérdidas considerando efecto corona.....	10
4.2	Procedimiento de resolución.....	11
4.3	Caso de estudio	11
5	Análisis de los Resultados	11
5.1	Modelo de 9 barras.	12
5.1.1	Perfil de tensión modelo de 9 barras.....	12
5.1.2	Generación de potencia activa y reactiva.....	13
5.1.3	Transferencia de potencia activa para el modelo de 9 barras	14
5.1.4	Transferencia de potencia reactiva modelo de 9 barras	15
5.1.5	Pérdidas en potencia activa en líneas de transmisión para el modelo de 9 barras	15
5.1.6	Estabilidad angular para el modelo de 9 barras (Curva P- δ)	16
5.1.7	Estabilidad de tensión para el modelo de 9 barras (Curva P-V).....	17
5.2	Modelo de 14 barras	17
5.2.1	Perfil de tensión para el modelo de 14 barras	18
5.2.2	Generación de potencia activa y reactiva para el modelo de 14 barras.....	18
5.2.3	Transferencia de potencia activa modelo de 14 barras	21
5.2.4	Transferencia de potencia reactiva modelo de 14 barras.....	21
5.2.5	Pérdidas en líneas de transmisión.....	23
5.2.6	Estabilidad angular en sistema de 14 barras (Curva P- δ)	24

5.2.7	Estabilidad de tensión para el modelo de 14 barras (Curva P-V)...	25
6	Conclusiones.....	25
7	Trabajos a Futuro	26
8	Referencias.....	26
8.1	Matriz de estado del arte	30
8.2	Resumen de indicadores.....	35
9	Anexos.....	37

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1: Minimización de pérdidas al considerar presencia de efecto corona en L/T.....	3
Figura 2 : RMG para “n” número de sub-conductores.....	5
Figura 3: Flujograma efecto corona.	6
Figura 4: Modelo de 9 barras.	12
Figura 5: Perfiles de tensión para el modelo de 9 barras.	13
Figura 6: Generación de su potencia en activa modelo de 9 barras.	14
Figura 7: Generación de su potencia reactiva sistema de 9 barras.	14
Figura 8: Transferencia de activa para el modelo de 9 barras.....	15
Figura 9: Transferencia de reactivos para el modelo de 9 barras.	15
Figura 10: Pérdida en potencia activa en L/T para el modelo de 9 barras.	16
Figura 11: Curva (P- δ) para el modelo de 9 barras.....	17
Figura 12: Curva (P-V) para el modelo de 9 barras.	17
Figura 13: Modelo de prueba de 14 barras.....	18
Figura 14: Perfiles de tensión para el modelo de 14 barras.	19
Figura 15: Generación de su potencia activa para el modelo de 14 barras.	20
Figura 16: Generación de potencia en reactiva para el modelo de 14 barras.	21
Figura 17: Transferencia entre nodo [i-j] de activa para el modelo de 14 barras.	22
Figura 18: Transferencia entre nodo [i-j] de reactiva para el modelo de 14 barras.	23
Figura 19: Pérdidas en activa en L/T para el modelo de 14 barras.	24
Figura 20: Curva (P- δ) sistema de 14 barras.	25
Figura 21: Curva (P-V) sistema de 14 barras 33 [kV].	25
Figura 22: Curva (P-V) sistema de 14 barras 132 [kV].	25
Figura 23: Indicador de la temática - Estado del arte.	
Figura 24: Indicador de formulación del problema - Estado del arte.....	35

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1: Variables establecidas para en el modelo	8
Tabla 2: Algoritmo para minimización de pérdidas mediante programación no lineal	10
Tabla 3: Perfiles de tensión para el modelo de 9 barras.....	12
Tabla 4: Generación de potencia activa en modelo de 9 barras.....	13
Tabla 5: Generación de potencia reactiva en modelo de 9 barras.....	13
Tabla 6: Transferencia entre nodo [i-j] de activa para el modelo de 9 barras.....	15
Tabla 7: Transferencia entre nodo [i-j] de reactiva para el modelo de 9 barras.....	16
Tabla 8: Pérdida en potencia activa en L/T para el modelo de 9 barras.....	16
Tabla 9: Perfiles de tensión para el modelo de 14 barras.....	19
Tabla 10: Generación en activa para el modelo de 14 barras.....	20
Tabla 11: Generación de reactivos para el modelo de 14 barras.....	20
Tabla 12: Transferencia entre nodo [i-j] de activa para el modelo de 14 barras.....	22
Tabla 13: Transferencia entre nodo [i-j] de reactiva para el modelo de 14 barras.....	23
Tabla 14: Pérdidas en potencia activa en L/T para el modelo de 14 barras.....	24
Tabla 15: Datos técnico de potencia activa, reactiva y costo de generación de cada generador sistema de 9 barras	37
Tabla 16: Datos técnico de línea de transmisión sistema de 9 barras.....	37
Tabla 17: Datos técnico de transformadores sistema de 9 barras.....	37
Tabla 18: Datos de carga de cada barra sistema de 9 barras.....	37
Tabla 19: Parámetros de línea de transmisión sistema de 9 barras.....	38
Tabla 20: Cálculo con presencia de efecto corona sistema de 9 barras.....	38
Tabla 21: Cálculo sin presencia de efecto corona sistema de 9 barras.....	38
Tabla 22: Datos técnico de potencia activa, reactiva y costo de generación de cada generado sistema de 14 barras.....	38
Tabla 23: Datos técnico de línea de transmisión sistema de 14 barras.....	39
Tabla 24: Datos técnico de transformadores sistema de 14 barras.....	39
Tabla 25: Datos de carga de cada barra sistema de 14 barras.....	39
Tabla 26: Parámetros de línea de transmisión circuito simple sistema de 14 barras para 132 [kV].	40
Tabla 27: Parámetros de línea de transmisión circuito Doble sistema de 14 barras para 132 [kV].	40

Tabla 28: Cálculo con presencia de efecto corona sistema de 14 barras para 132 [kV]... 40
Tabla 29: Cálculo sin presencia de efecto corona sistema de 14 barras para 132 [kV]. ... 41
Tabla 30: Parámetros de línea de transmisión sistema de 14 barras para 33 [kV]..... 41
Tabla 31: Cálculo con presencia de efecto corona sistema de 14 barras para 33 [kV]. 41
Tabla 32: Cálculo sin presencia de efecto corona sistema de 14 barras para 33 [kV] 41

MINIMIZACIÓN DE PÉRDIDAS EN REDES DE TRANSMISIÓN BASADO EN EL ANÁLISIS DE CAPACIDAD DE TRANSFERENCIA DE LAS LÍNEAS, MEDIANTE ÓPTIMOS FLUJOS DE POTENCIA

Resumen

El estudio y análisis detallado de sistemas eléctricos de potencia en específico a los sistemas de transmisión se los consideran como ideales o sin pérdidas. Sin embargo, en la realidad esta condición representa un problema tanto para la gestión, control a nivel de calidad y estabilidad de los sistemas. Por lo que la minimización de pérdidas en líneas de transmisión puede llegar a ser fundamental para garantizar así una adecuada transferencia de potencia desde las centrales de generación hasta las cargas. El presente artículo académico se enfoca en la implementación de un algoritmo que permite minimizar las pérdidas a nivel de transmisión considerando variables como: efecto skin, efecto joule y efecto corona, implementadas en el software GAMS, bajo restricciones como balance de potencia, límites de potencia activa y reactiva que permitan al sistema mantener sus estándares operacionales dentro de los rangos admisibles y así obtener una mejor condición operativa. El algoritmo se implementará en los modelos de prueba del IEEE de 9 y 14 barras, mismos que serán valorados y aprobados por medio la simulación en el software Power Factory Disgsilent.

Palabras Clave: Despacho de potencia, efecto corona, estabilidad, minimización de pérdidas, sistema de transmisión.

Abstract

The detailed study and analysis of electrical power systems, specifically transmission systems, are considered ideal or without losses. However, in reality, this condition represents a problem for both management, quality control and system stability. Therefore, the minimization of losses in transmission lines can become essential to guarantee an adequate transfer of power from the generation plants to the loads. This academic article focuses on the implementation of an algorithm that allows minimizing losses at the transmission level considering variables such as: skin effect, joule effect and corona effect, implemented in the GAMS software, restrictions such as power balance, active power limits. and reactivate that allow the system to maintain its operating standards within the admissible ranges and thus obtain a better operating condition. The algorithm will be implemented in the IEEE test models of 9 and 14 bars, which will be evaluated and approved through simulation in the Power Factory Disgsilent software.

Keywords: Power dispatch, corona effect, stability, minimization of losses, system of transmission.

1 Introducción

La agrupación mediante elementos que permite el envío de electricidad desde el proceso de transformación de energía primaria, hacia los usuarios finales, se conoce como sistema eléctrico de potencia (SEP) [1], eso implica recorrer grandes distancias geográficamente [2], en general dentro los SEP, existe una parte fundamental que son los sistemas de transmisión.

Estas son grandes estructuras, diseñadas de tal manera que deben ser capaces de soportar, niveles elevados del tensión, al igual que conexiones y desconexiones, cambios de temperatura, incluidas las pérdidas que se producen durante el trayecto [3].

La estabilidad en el SEP en la última década se ha visto afectada gracias a la alta demanda de energía eléctrica, que ha aumentado considerablemente con el paso del tiempo, por lo que los sistemas de transmisión se ha visto en la obligación de expandir sus fronteras [4].

Esto representa un reto para los sistemas de transmisión, ya que debido a la distancia la tarea de suministrar los niveles adecuados de tensión, frecuencia, ángulo y potencia se ven afectados [5], por ende estas variables varían en función de la demanda eléctrica, bajo la condición de que la potencia despachada por los generadores debe ser similar a la potencia consumida por los usuarios más sus pérdidas [6].

Existen parámetros que definen la forma de evaluar el traspaso de electricidad mediante sistemas de transmisión, en este sentido, los parámetros más influyentes son: los niveles de tensión, la importancia de la geometría de cada línea transmisión (L/T), sin dejar de lado el análisis de la estabilidad del sistema [7], [8] dando así estos parámetros los cuales limitan la capacidad de transferencia de las líneas.

En [9] el autor hace énfasis en la problemática sobre la estabilidad que se

presenta en una línea de transmisión, ya que se la define como una reactancia y por su característica es indispensable un valor de tensión de capacidad, al igual que el índice de rendimiento de la línea con el fin de producir un flujo de potencia estable.

Este análisis está enfocado a la reducción de pérdidas en L/T, ya que dentro de la operación de un SEP es indispensable garantizar la estabilidad de todo el sistema [10].

Conforme pasa el tiempo los avances tecnológicos han concedido desarrollar algoritmos que permiten a los operadores estimar cálculos, frente a respuestas inmediatas, con el objetivo de verificar el estado actual del sistema [11].

En [12] y [13] los autores proponen una adecuada entrega de reactivos se puede utilizar como técnica de minimización de pérdidas, obteniendo así valores regulables acorde al ajuste de la potencia que es despachada por el generador, con el fin de mantener el perfil de tensión dentro del rango aceptable, al igual que mejora el margen de capacidad de cargabilidad.

En [14] y [15] los autores consideran que mediante la deducción matemática y la aplicación de óptimos flujos de potencia (OPF), se pueden mejorar los problemas de inestabilidad de tensión y pérdidas de energía a través de inyección de potencia reactiva, este se considera algo fundamental para la operación adecuada del SEP.

Desde hace décadas, las técnicas computacionales, han ayudado a resolver problemas de optimización, los cuales fueron cada vez más relevantes para dar soluciones óptimas a funciones objetivo, cuyas variables de control o restricciones marcan las pautas que se deben cumplir dentro del problema de optimización [16].

Los modelos que permiten encontrar los óptimos flujos de potencia (OPF), son métodos que establecen variables de control de generación con el fin de obtener valores exactos de despacho, cumpliendo sus criterios de igualdad o desigualdad,

correspondiente a una función objetivo [17].

El un método a implementar en este trabajo es flexible ya que permite analizar las pérdidas de ramales de manera centralizada, con el fin de determinar y estimar el total de pérdidas que se va a minimizar [18].

En [19] los autores consideran que el método de ramificación es muy útil en la labor de búsqueda y optimización, ya que descompone problemas en base a diferentes estrategias, con el fin de obtener delimitación bajo una tendencia con el propósito de encontrar una convergencia en una rama de solución óptima.

En [20] los autores realizan una crítica, ya que consideran se requiere dar solución a problemas de optimización no convexos conformados por una gran escala, por lo que proponen utilizar métodos como valor

mínimo singular (MSV), al igual que métodos locales de pérdidas, que simplifica el análisis de pérdidas para una sola opción y encontrar una solución óptima.

Aunque detallan que un análisis como subconjunto mediante ramales, se pueden obtener valores de pérdidas mucho más bajas, así obteniendo resultados menos complejas [20].

En el presente artículo se plantea mejorar la estabilidad angular del SEP, mediante un óptimo despacho de potencia, con el fin de minimizar las pérdidas en L/T, siendo así la función objetivo correspondiente a un problema de minimización a partir de las distintas restricciones que pueden afectar negativamente, este análisis se lo resolverá utilizando técnicas de programación no lineal, mediante software GAMS el cual está diseñado para modelar y resolver problemas de optimización

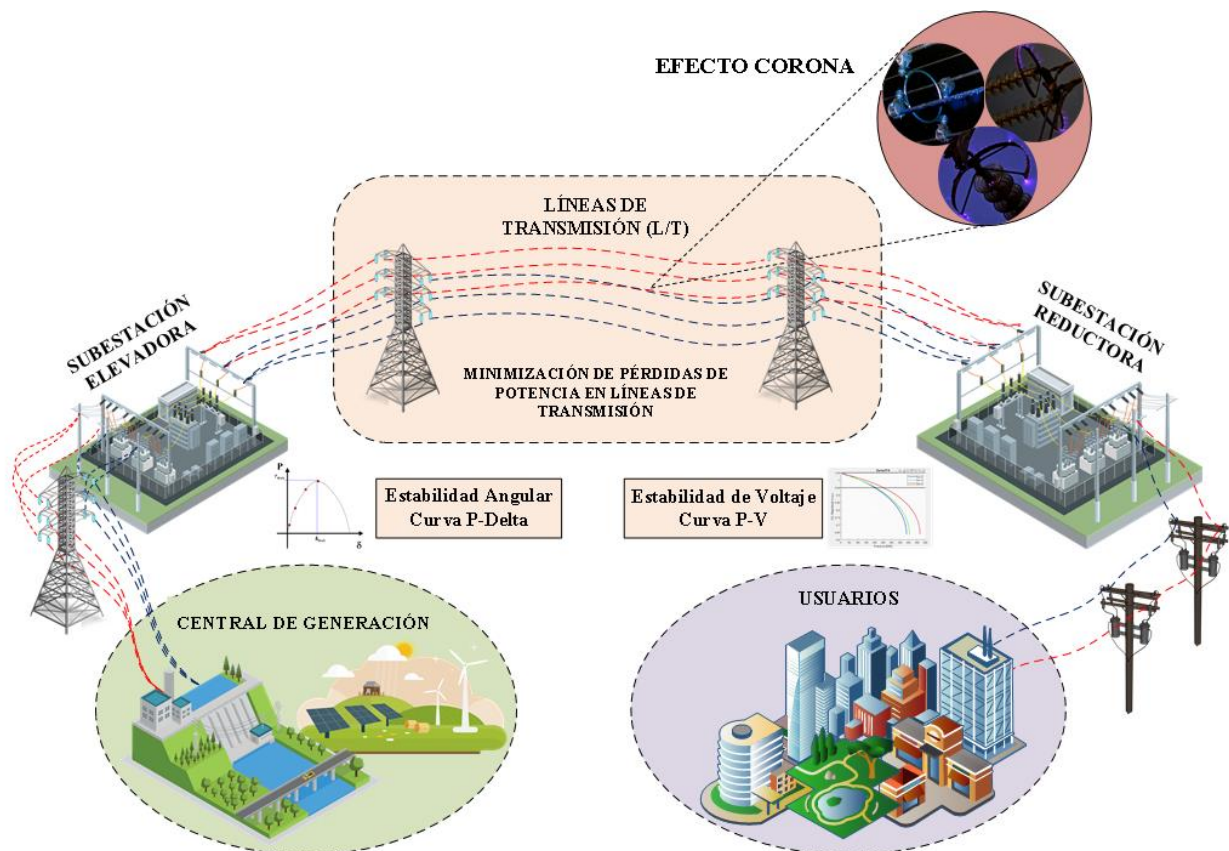


Figura 1: Minimización de pérdidas al considerar presencia de efecto corona en L/T. [Autor]

Se estudiará el comportamiento del OPF a partir de los resultados obtenidos en el Software GAMS y se los comparará con los resultados proporcionados por el programa DigSILENT Power Factory.

Mediante este análisis se pretende minimizar las pérdidas a nivel de transmisión, optando por mejorar la estabilidad angular SEP. Lo que se espera es reducir las pérdidas que se producen dentro del sistema propuesto son modelos estandarizados del IEEE, tomando en cuenta efectos como: pérdidas por la resistencia del conductor, pérdidas por efecto corona, las cuales pueden ocasionar desbalances entre fases, efecto piel, fugas de energía a través del análisis de pérdidas que existen en los conductores y disminución del nivel de potencia que se transporta por la L/T.

La presente investigación propuesta se desarrolla en base a diferentes secciones distribuidas de la siguiente manera:

En la sección 2 se define las pérdidas que se producen a nivel de transmisión de energía eléctrica dentro de un SEP, objeto de análisis para la realización del presente artículo.

En la sección 3 se formula y se define los parámetros que debe constar los OPF. En la sección 4 se define las variables y restricciones que se debe cumplir a cabalidad para la formulación del problema, al igual que la programación aplicada para realizar el problema de optimización. En la sección 5 se realiza una breve explicación sobre los análisis y resultados conseguidos durante el presente estudio.

Por último, mediante la sección 6 se justifica las conclusiones establecidas que se llegó una vez culminada toda la investigación y los trabajos que se pueden realizar en el futuro aplicando esta investigación como base.

2 Pérdidas en líneas de transmisión

Las pérdidas en L/T están representadas por la energía eléctrica que se pierde durante el trayecto desde las centrales de generación pasando por las L/T y distribución, hasta la ubicación de las cargas o los usuarios finales [21].

2.1 Clasificación de las pérdidas

La clasificación de las pérdidas energía se dividen en dos categorías: pérdidas no técnicas (PNT) y pérdidas técnicas (PT) [11].

Las PNT son aquellas en las que principalmente se ve involucrado el ser humano, mediante la manipulación de componentes eléctricos de tal manera que afecta el servicio eléctrico [10].

Las PT son aquellas que se producen por su naturaleza y se enfoca originalmente en la disipación de energía a través de elementos que conforman un SEP, como lo son los transformadores de potencia, redes de transmisión y distribución, además de otros componentes eléctricos [10]. La característica de PT radica en que se las puede controlar y medir [22].

2.2 Formulación de pérdidas en líneas de transmisión

Partiendo del concepto de pérdidas técnicas, este subtema se enfoca en la formulación de pérdidas que existen a nivel de transmisión.

2.2.1 Pérdidas por efecto corona

Representa una anomalía eléctrica que se produce por el choque entre electrones causando la ionización de los conductores [23]. Existen parámetros que afectan al efecto corona (EC):

- i. Nivel de tensión del sistema.
- ii. Separación entre conductores.
- iii. Atmosfera.
- iv. Tamaño del conductor.

En el estudio por efecto corona (EC) es indispensable conocer cómo afecta la configuración que existe entre conductores por fase de los sistemas de transmisión [24], por ello es de suma importancia considerar la distancia media geométrica (DMG) y el radio medio geométrico (RMG).

El análisis a partir del DMG equivalente representa la distancia que existe una fase respecto a sus otras fases [24], detalla en la ecuación (1).

$$DMG = \sqrt[3]{D_A * D_B * D_C} \quad (1)$$

Cada análisis se lo debe realizar por fase dependiendo de la configuración que disponga el diseño de la L/T.

En las ecuaciones (2), (3) y (4), se detalla el procedimiento para el cálculo de distancias considerando una fase como referencia con respecto a las otras fases presentes dentro de la configuración, el número de fases [25].

$$D_A = \frac{\sqrt{D_{AB} * D_{AC} * D_{AB'} * D_{AC'}}}{D_{AA}} \quad (2)$$

$$D_B = \frac{\sqrt{D_{SA} * D_{BC} * D_{BA'} * D_{BC'}}}{D_{BB'}} \quad (3)$$

$$D_C = \frac{\sqrt{D_{CA} * D_{CB} * D_{CA'} * D_{CB'}}}{D_{CC'}} \quad (4)$$

El radio medio geométrico (RMG), corresponde al radio medio geométrico de los sub-conductores que existe en una fase respecto a distancia de separación con los otros sub-conductores de su misma fase. La configuración de las redes de transmisión, varía dependiendo de la cantidad de sub-conductores en cada fase [26].

La ecuación (5), es la representación matemática para una configuración con “n” número de sub-conductores, tomando en cuenta el radio del conductor, y a su vez el radio de la configuración de la L/T considerando que es circular [27], representada por la figura (2).

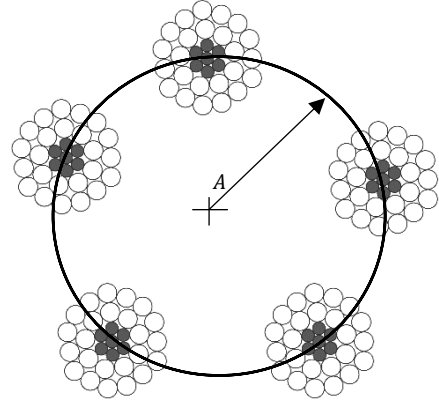


Figura 2 : RMG para “n” número de sub-conductores. [Autor]

$$RMG = \sqrt[n]{n \cdot r' \cdot A^{n-1}} \quad (5)$$

n : Número de sub-conductores.

r' : Radio del conductor.

A : Radio de la configuración entre sub-conductores.

El cálculo de voltaje corona expresada por la ecuación (6), determina la tensión disruptiva a partir de parámetros previamente calculados como el valor RMG Y DMG [28].

$$V_c = 84 * m_c * m_r * RMG * \delta * \ln \left(\frac{DMG}{RMG} \right) \quad (6)$$

V_c : Tensión crítica en eficaz [kV]

m_c : Coeficiente de rugosidad.

m_r : Coeficiente Ambiental.

δ : Densidad relativa del aire.

RMG : Radio medio geométrico.

DMG : Distancia media geométrica.

La condición para la determinación del coeficiente de rugosidad (m_c), varía a partir del estado de los conductores, el valor para conductores nuevos será de 1, el valor a considerar para conductores viejos es de 0.93 – 0.98 y el valor para conductores multifilares es de 0.83 – 8.87. La otra condición es para el cálculo del coeficiente ambiental (m_r), varía en función de medio ambiente, el valor para aire seco es de 1 y para un ambiente con aire húmedo o contaminado es de 0.8 [28] y [29].

La ecuación (7), corresponde al cálculo de densidad de aire tomando en cuenta factores como la presión atmosférica y la temperatura.

$$\delta = \frac{293}{273 + T} * \frac{P}{760} \quad (7)$$

P representa la presión atmosférica, T representa la temperatura.

En caso de que el voltaje corona sea menor al voltaje máximo de elevación (V_{me}), se deberá calcular las pérdidas producidas por efecto corona, caso contrario no hay efecto corona [30]. La ecuación (8), representa el cálculo del voltaje máximo de elevación.

$$V_{me} = 1.15 * V_{LL} \quad (8)$$

La ecuación (9), cuantifica las pérdidas de potencia causadas en base a la presencia del efecto corona por cada kilómetro de línea [31] y [30].

$$P_p = \frac{241}{\delta} (f + 25) \sqrt{\frac{RMG}{DMG} \left[\frac{V_{me}}{\sqrt{3}} - \frac{V_c}{\sqrt{3}} \right]^2} * 10^{-5} \quad (9)$$

P_p : Pérdida de potencia.
 f : Frecuencia.

El cálculo de pérdidas por efecto corona es un modelo lineal en donde el primer paso es ingresar datos que eventualmente se va a requerir, posteriormente se verificar la configuración por fase empleada en la línea de transmisión, a partir del cálculo de RMG Y DMG.

Una vez determinado el tiempo de configuración que se plantea se cuantifica el valor de tensión disruptiva y mediante la comparación con el voltaje máximo de elevación, se puede determinar si existe efecto corona o no, en caso de existir efecto corona se procede a calcular sus pérdidas, los cuales están detalladas en la figura (3).

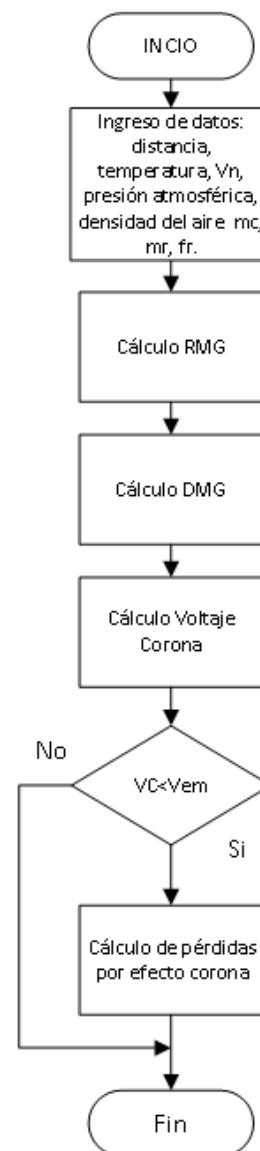


Figura 3: Flujograma efecto corona.

Las pérdidas por la resistencia del conductor, se produce gracias a la circulación de corriente que fluye a través de los cable, produciendo pérdidas por disipación de calor [32].

$$P_p = I^2 * R \quad (10)$$

Donde I representa la intensidad que fluye dentro del circuito y R es el valor de resistencia del material. La formulación y cálculo de estas pérdidas es para prevenir eventos negativos que pueden afectar al sistema, dentro de los problemas pueden ser desbalances entre líneas, la confiabilidad de sistemas de potencia busca nuevas estrategias para la minimización de pérdidas, con el fin de lograr una adecuada transferencia energía [33].

2.3 Estabilidad de sistemas de potencia

Dentro de la gestión y la acción de control de los SEP, se considera a la estabilidad un factor indispensable, ya que esta propiedad influye en la calidad del servicio eléctrico, para que tanto la oferta sea igual a la demanda, según la IEEE [34], la clasificación de estabilidad considera cinco tipos:

- i) Resonancia.
- ii) Impulsada por convertidores.
- iii) Angular.
- iv) De tensión.
- v) De frecuencia.

2.3.1 Estabilidad angular

Es la condición del SEP para conservarse con un funcionamiento adecuado bajo el establecimiento de restricciones nominales o la capacidad automática de recuperación del estado posterior a un evento, este estudio permite analizar la estabilidad enfocado a los generadores que representa un análisis dinámico o en el resto del sistema eléctrico que es un análisis estático,

con el fin de determinar si la maquina se encuentra en sincronismo [35].

Restricción de transferencia de potencia

$$P = \frac{V_1 * V_2}{X_L} * \text{sen}(\delta) \quad (12)$$

$$Q = \frac{V_1 * V_2}{X_L} * \text{cos}(\delta) - \frac{V_1^2}{X_L} \quad (13)$$

Donde V_1 y V_2 simboliza la magnitud de tensión desde un nodo i hasta un nodo j, X_L representa el equivalente Thevenin.

2.3.2 Curva P- δ

El estudio de estabilidad angular se lo resuelve a partir de la curva P- δ , en la cual se analiza el rotor de los generadores que es la representación de la variación del ángulo ($\Delta\delta$) en relación a la potencia activa de la maquina sincrónica, representada en la ecuación(13), este análisis se determina a través de la estabilidad transitoria [36].

$$P = \frac{E_i * V_j}{X_{ij}} \text{sen}(\delta) \quad (13)$$

Donde P representa la potencia activa entregada al sistema, E_i es el valor de voltaje interno de la máquina síncrona, V_j representa el voltaje de la barra en nodo j, X_{ij} representa la reactancia equivalente entre el nodo i y el nodo j.

2.3.3 Límites de estabilidad

Este análisis permite determinar el valor numérico para los límites en estado estable del margen de estabilidad angular, cuya función relaciona las áreas que determinan el comportamiento del rotor en estado transitorio, mismas que están detalladas por la curva P- δ [37].

$$\eta_{st} = A_1 - A_2 \quad (14)$$

Donde η representa el valor angular del margen de estabilidad, A_1 representa la condición de frenado el generador mientras que A_2 representa el aumento en la velocidad del generador, mediante el cálculo se puede interpretar su signo, sí el resultado es positivo significa que el sistema se conserva estable y sí el signo es negativo el sistema es inestable [37].

2.3.4 Estabilidad de tensión

Representa la tolerancia del SEP para conservar un nivel adecuado de tensión cuando se encuentra en un estado operacional estable en todos los nodos del sistema, posterior a un evento, ya sea por un considerable aumento en la demanda o diferentes contingencias provocadas [38].

2.3.5 Curva P-V

La curva P-V analiza la inestabilidad de tensión de los SEP, debido al aumento de demanda considerable lo que produce cambios en las condiciones operaciones del SEP o debido a perturbaciones, lo cual muestra en una progresiva caída de tensión, afectando los índices de estabilidad como la calidad del servicio [38].

La inestabilidad de tensión suele producirse debido a las largas distancias que debe recorrer la potencia activa desde las centrales de generación hasta las cargas [38].

3 Modelo de optimización para minimización de pérdidas

Estos modelos de optimización hacen referencia a la formulación matemática de un problema de minimización, representa por su función objetivo que contiene restricciones que tendrán su propio impacto sobre el resultado [39].

Función Objetivo

$$\begin{aligned} \text{Min } Z = & \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n G_{ij} (V_i^2 + V_j^2) \\ & - 2V_i V_j \cos(\delta_{ij}) \end{aligned} \quad (15)$$

$i \wedge j \in \# \text{ barras}$

Sujeto a:

$$\begin{aligned} V_i \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n V_j [G_{ij} \cos(\delta_{ij}) \\ + B_{ij} \text{sen}(\delta_{ij})] \\ - P_{gi} + P_{di} = 0 \end{aligned} \quad (16)$$

$$\begin{aligned} V_i \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n V_j [G_{ij} \text{Sen}(\delta_{ij}) \\ + B_{ij} \cos(\delta_{ij})] \\ - Q_{gi} + Q_{di} = 0 \end{aligned} \quad (17)$$

Donde:

$$V_i^{\min} \leq V_i \leq V_i^{\max} \quad (18)$$

$$P_{gi}^{\min} \leq P_{gi} \leq P_{gi}^{\max} \quad (19)$$

$$Q_{gi}^{\min} \leq Q_{gi} \leq Q_{gi}^{\max} \quad (20)$$

$$\delta_i^{\min} \leq \delta_i \leq \delta_i^{\max} \quad (21)$$

$$S_{Li} \leq S_{li}^{\max} \quad (22)$$

A continuación, en la siguiente tabla se encuentran definidas las variables establecidas para la creación del modelo de optimización enfocado en la minimización de pérdidas.

Nombre	Significado
G_{ij}	Conductancia del componente acoplado entre el nodo i y el nodo j.
V_i	Magnitud de tensión en el nodo i.
V_j	Magnitud de tensión en el nodo j.
δ_{ij}	Diferencia angular entre el nodo i y el nodo j.
B_{ij}	Susceptancia del componente acoplado entre el nodo i y el nodo j.
P_{gi}	Generación de potencia activa en el nodo i.
P_{di}	Demanda de potencia activa en el nodo i.
Q_{gi}	Generación de potencia reactiva en el nodo i.
Q_{di}	Demanda de potencia reactiva en el nodo i.
\max	Rango máximo.
\min	Rango mínimo.

Tabla 1: Variables establecidas para en el modelo

La función objetivo está dada por la ecuación (15), la cual hace referencia a las pérdidas existentes. Mediante (16) y (17) se detalla el equilibrio entre activa y reactiva, reflejadas a partir del análisis de los puntos estudiados, cumpliendo la condición de que la potencia que entra es la misma que se encuentra a través del nodo.

La condición (18) define el rango máximo y mínimo de tensión presentes en nodos. Siendo (19) y (20) las condiciones que restringen el nivel en su componente en activa, así como en reactivos proporcionado por cada generador establecido. Finalizando por la ecuación (21) la cual define los parámetros máximos y mínimos angulares considerados para este modelo.

4 Formulación del problema

El presente documento procura mantener una estabilidad angular y de tensión a partir de la minimización de pérdidas en redes de transmisión, formulando un proceso de optimización que cumpla criterio matemático en base a programación no lineal, la cual considera funciones y restricciones de tipo no lineal, mediante estas características la función objetivo que se plantea en la problemática corresponde a una minimización de pérdidas.

La propuesta de esta investigación permite, analizar las pérdidas por efecto skin, efecto joule y efecto corona producidas en las líneas de transmisión. A partir de la implementación de un algoritmo que permite minimizar las pérdidas, tomando en consideración datos longitudinales y transversales presentes en el diseño por fases de las líneas de transmisión, con el fin de evaluar el comportamiento bajo condiciones que permitan al sistema operar de forma óptima. Este análisis se empleará en sistemas de prueba del IEEE.

La función objetivo se encuentra definida bajo restricciones de potencia activa y reactiva que entregan cada

generador, así como cada una de las potencias balanceadas del sistema tanto activa como reactiva, niveles superiores e inferiores en su potencia activa como reactiva, al igual que la cargabilidad de las líneas de transmisión del sistema, valores de ángulo y magnitud de tensión, sin exceder los niveles de tensión que se consideran en los rangos entre 0.9 p.u. a 1.1 p.u., al igual que en los niveles angulares que se consideran en los rangos entre -0.6 a 0.6 en rad o -35° a $+35^\circ$ [35] grado sexagesimal, las incorporaciones de estas restricciones permiten que el sistema eléctrico propuesto se mantenga en un estado operacional estable, dentro de la función objetivo se planteó adecuar como restricción las pérdidas totales de potencia producidas por corona dentro de los sistemas de prueba, modificando la ecuación base de la minimización de pérdidas, pudiendo verificar las consecuencias presentes en el sistema al considerar y omitir las pérdidas por corona.

El modelo matemático se implementará en el sistema de 9 barras y 14 barras, modelos de prueba proporcionados por IEEE, con 100 MVA como potencia base para todo el sistema, como referencia para la normalización del sistema en p.u y respecto a su barra de referencia (slack) se consideró al bus 1 el cual tiene un valor de magnitud tensión de 1 y un ángulo 0° , se consideró para el sistema un voltaje de 1.06 p.u.

A continuación, para representar la minimización de pérdidas en L/T considerando corona, y el análisis de estabilidad con su restricción en transferencia de potencia (generación - carga), dicho proceso se encuentra formulado en el algoritmo guía detallado en la tabla 2, en donde podremos visualizar paso a paso como se generó el algoritmo de resolución para esta investigación en concreto.

Algoritmo solución del MINLT	
Paso 1:	Inicio
Paso 2:	Ingreso de datos Generadores, cargas y líneas de transmisión
Paso 3:	Definir variables $F, P_{ij}, Q_{ij}, P_g, Q_g, Q_c, U, \delta$
Paso 4:	Modelo matemático para minimización de pérdidas
Paso 5:	Minimizar F utilizando solve MINLP
Paso 6:	Introducir restricción de pérdidas por efecto corona (P_c)
Paso 7:	Minimización de pérdidas Función Objetivo. $F_{PC} = \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n G_{ij} (V_i^2 + V_j^2 - 2V_i V_j \cos(\delta_{ij})) + \sum_{k=1}^m P_{Ck}$ Minimizar $F + P_c$ utilizando solver MINLP Sujeto a: Restricción de balance de potencia
Paso 8:	Visualizar resultados F, F_{PC}
Paso 9:	Análisis de estabilidad Definir restricción de transferencia de potencia $P = \frac{V_1 * V_2}{X_L} * \text{sen}(\delta)$ $Q = \frac{V_1 * V_2}{X_L} * \text{cos}(\delta) - \frac{V_1^2}{X_L}$
Paso 10:	Visualizar resultados Gráfica curva ($P - \delta$)
Paso 11:	Fin

Tabla 2: Algoritmo para minimización de pérdidas mediante programación no lineal

4.1 Modelo de optimización para minimización de pérdidas considerando efecto corona

La propuesta como modelo de optimización para la minimización de pérdidas considerando como factor el efecto corona se detalla en la ecuación (22), esta restricción consiste en aplicar las ecuaciones demostradas en la ley de Peek, que se utiliza para cálculo de voltaje corona y por consiguiente demostrando sí hay presencia de efecto corona, cuantificar las pérdidas que se producen. A continuación, se detalla función Objetivo

$$F_{PC} = \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n G_{ij} (V_i^2 + V_j^2 - 2V_i V_j \cos(\delta_{ij})) + \sum_{k=1}^m P_{Ck} \quad (22)$$

$i \wedge j \in \# \text{barras}$
 $k \in \# \text{lineas}$

Sujeto a:

$$V_i \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n V_j [G_{ij} \cos(\delta_{ij}) + B_{ij} \text{sen}(\delta_{ij})] - P_g + P_d = 0 \quad (23)$$

$$V_i \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n V_j [G_{ij} \text{Sen}(\delta_{ij}) + B_{ij} \text{cos}(\delta_{ij})] - Q_g + Q_d = 0 \quad (24)$$

Donde:

$$V_i^{\min} \leq V_i \leq V_i^{\max} \quad (25)$$

$$P_{gk}^{\min} \leq P_{gk} \leq P_{gk}^{\max} \quad (26)$$

$$Q_{gk}^{\min} \leq Q_{gk} \leq Q_{gk}^{\max} \quad (27)$$

$$\delta_i^{\min} \leq \delta_i \leq \delta_i^{\max} \quad (28)$$

$$S_{Li} \leq S_{li}^{\max} \quad (29)$$

La función objetivo está proporcionada por la ecuación (22), hace referencia a las pérdidas existentes, considerando las pérdidas totales por corona. Mediante (24) y (23) se detalla el equilibrio entre activa y reactiva, reflejadas a partir del análisis de los puntos estudiados, cumpliendo la condición de que la potencia que entra es la misma que se encuentra a través del nodo.

La condición (25) define el rango máximo y mínimo de tensión presentes en nodos. Siendo (26) y (27) las condiciones que restringen el nivel en su potencia activa, así como en reactivos proporcionado por cada generador establecido. Al finalizar por medio de (28), en la que se define los parámetros máximos y mínimos angulares considerados para este modelo y por (29) se detalla el límite menor de cargabilidad.

4.2 Procedimiento de resolución

Para la resolución del problema de optimización, se optó por utilizar el software GAMS, este programa está diseñado para resolver y modelar sistemas cuya condición es optimizar en base a modelos lineales, no lineales y mixto [40]. Compilación de lenguaje de programación de cuarta generación y una extensa variedad de soluciones entre los que encontramos solucionadores tales como: BARON, SNOB, DICOP, CONOPT, entre otros.

Como cualquier software de programación su estructura es básica, el cual consta de un ingreso de datos, modelamiento de ecuaciones, salidas o resultados. Partiendo de estructura de programación del software GAMS, se formuló el planteamiento para resolver el problema de optimización el cual consiste en una minimización de pérdidas, primero se ingresó datos en activa y reactivos generados, al igual que sus costos de generación, líneas de transmisión con sus respectivos límites de cargabilidad balances entre potencias tanto activa como reactiva, valores en activa y reactivos para las cargas, niveles máximos y mínimos en potencias, así como su magnitud en p-u de tensión y su ángulo, incluyendo las pérdidas.

Por consiguiente, se planteó las ecuaciones que definen el modelo, así como sus restricciones las cuales nos permite hallar la solución óptima, luego de definir la función objetivo F_{PC} que corresponde a la minimización de pérdidas, obteniendo así valores óptimos para el análisis de los resultados.

4.3 Caso de estudio

Para demostrar los resultados obtenidos durante este estudio se optó por utilizar los modelos de 9 y 14 barras. En los modelos se optó por implementar 3 casos de estudio respectivamente, y dos análisis que a continuación se detallan:

Caso 1: Flujo óptimo de potencia AC.

Caso 2: Minimización de pérdidas considerando efecto corona.

Caso 3: Minimización de pérdidas sin considerar efecto corona.

El análisis angular mediante la (Curva P- δ) y el estudio de tensión con la (Curva P-V) nos servirán como medio para el estudio de estabilidad para los casos previos. Para el análisis y resultados del caso 1 correspondiente a la implementación y simulación del Flujo óptimo AC en GAMS, enfocado en programación no lineal (PNL), a través de la utilización del solver "CONOPT" para su resolución.

La validación de los resultados para cada caso de estudio se define mediante la función objetivo que considera como restricción a las pérdidas por corona. Los resultados obtenidos en el software GAMS, se compararán con los resultados obtenidos mediante el software Digsilent el cual nos permitirá tener una perspectiva más amplia sobre el comportamiento de cada caso.

Para el análisis de la curva P- δ , que representa la diferencia angular de la máquina síncrona en relación a la potencia activa de la máquina, este análisis se lo resolvió obteniendo los valores equivalentes de cada generador, al igual que su magnitud y ángulo en tensión desde la $Barra_i$ hasta la $Barra_j$ de los sistemas planteados, se utilizó como herramienta el software Matlab para graficar las curvas.

Para el análisis de la curva P-V, el cual nos ayuda a analizar la inestabilidad de tensión, se utilizó el software Digsilent para la obtención de los datos y se graficó mediante el software Matlab, delimitando los valores máximos y mínimos de magnitud de tensión y verificando que cumpla los niveles de calidad y estabilidad.

5 Análisis de los Resultados

Para la modelación y simulación de los diferentes casos de estudio se utilizó el software GAMS la versión 27.3.0 el cual

nos permite resolver problemas de optimización lineales y no lineales, y para comprobar las respuestas mediante la simulación se ocupó el software Power Factory Digsilent versión 2018-SP2.

5.1 Modelo de 9 barras.

Este modelo está conformado por 3 generadores cada uno está conectado a las barras 1, 2, 3 respectivamente. También cuenta con un total de 6 líneas de transmisión y 3 transformadores de potencia de los cuales sirven como interconexión entre todo el sistema.

A través de figura 4 se visualiza el diagrama unifilar del sistema de prueba, mientras que los datos empleados en este modelo se encuentran en anexos en la parte correspondiente al sistema de prueba de 9 barras del IEEE, tomadas de la referencia [36].

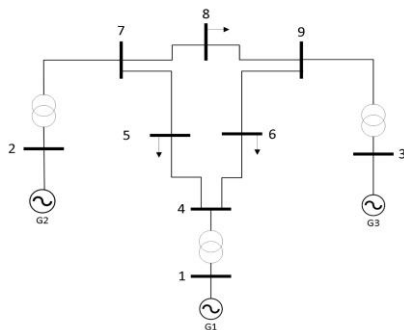


Figura 4: Modelo de 9 barras.

5.1.1 Perfil de tensión modelo de 9 barras

En la tabla 3 se encuentran especificados los resultados obtenidos correspondientes a los perfiles de tensión, en donde se consideró los casos de estudio 1, 2 y 3. Estos datos se obtuvieron a partir de la simulación del flujo modelado en el software GAMS, haciendo una comparativa con los datos obtenidos entre el software GAMS y el software Digsilent, en el cual se obtuvo valores iguales o similares al realizar la tabla comparativa, el caso 1 con respecto al caso 2 y 3, en la figura 5 se puede visualizar que existe una diferencia en magnitud en los perfiles de tensión de cada barra del sistema.

En el caso 2 y 3 que son los resultados obtenidos en GAMS, como se puede visualizar existe un aumento en el tensión en la barra 3 llegando en su punto máximo a valores de 1.1 en [p.u] que se encuentra dentro del rango admisible (0.95-1.1), tener perfiles de tensión altos disminuye la demanda de reactivos, pero no garantiza la estabilidad de tensión y en el caso 1 se puede visualizar que existe una disminución en el perfil de tensión en la barra 4 y posteriormente eleva su tensión en la barra 5 pero se encuentran dentro de los valores nominales.

Num. Barra	Caso 1	Caso 2	Caso 3
	Voltaje [p.u] Digsilent	Voltaje [p.u] GAMS	Voltaje [p.u] GAMS
1	1.04	1.04	1.04
2	1.025	1.027	1.025
3	1.025	1.025	1.025
4	1.026	1.100	1.026
5	0.996	1.093	0.996
6	1.0.13	1.091	1.013
7	1.026	1.096	1.026
8	1.016	1.096	1.016
9	1.032	1.100	1.032

Tabla 3: Perfiles de tensión para el modelo de 9 barras.

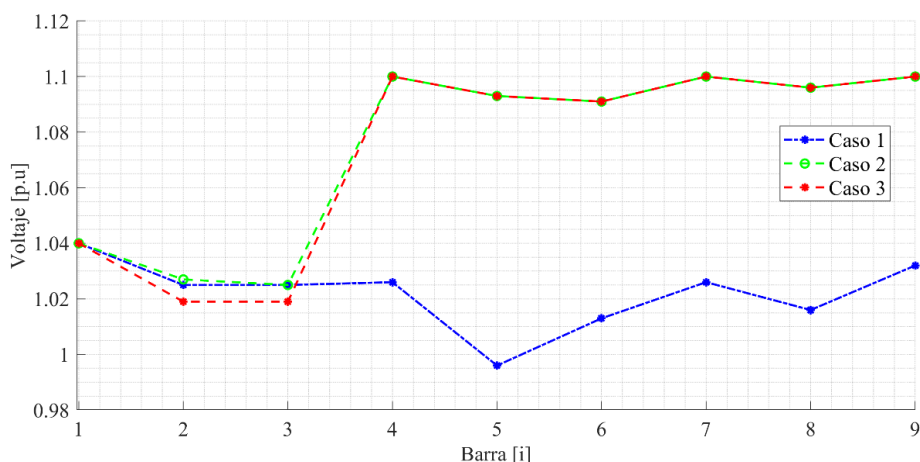


Figura 5: Perfiles de tensión para el modelo de 9 barras.

5.1.2 Generación de potencia activa y reactiva

Mediante el análisis de las tablas 4 y 5, el componente de generación en potencia activa obtenida para cada caso de estudio se logró evidenciar que la potencia despachada por el generador 1 en el caso 1, una vez simulado el flujo es 71.6 [MW] considerándolo como el generador slack, entregando solo la potencia que le hace falta al sistema para cumplir la demanda, el valor del generador 1 del caso 1 es un valor

inferior a la potencia despachada por el generador 1 del caso 2 y 3 cuya potencia es semejante, pero al hacer el balance total de potencia activa despachada por los generadores se presentan valores aproximados.

Los gráficos de las figuras 6 y 7 representan el comportamiento de la generación en potencia activa y reactiva respectivamente, con lo cual, se puede visualizar la variación de cada generador en base a cada caso de estudio.

Num. Barra	Caso 1	Caso 2	Caso 3
	P [MW] Digsilent	P [MW] GAMS	P [MW] GAMS
1	71.6	146.7	158.1
2	163	87.1	87.1
3	85	71.4	71.4
Total	292.6	296.2	294.8

Tabla 4: Generación de potencia activa en modelo de 9 barras.

Num. Barra	Caso 1	Caso 2	Caso 3
	Q [Mvar] Digsilent	Q [Mvar] GAMS	Q [Mvar] GAMS
1	26.3	23.2	25.9
2	7.1	6.4	6.4
3	-10.4	-10.3	-10.9
Total	23	19.3	21.4

Tabla 5: Generación de potencia reactiva en modelo de 9 barras.

Mediante la visualización de la figura 6, se detallan todos los datos de potencia activa suministrada por los generadores tanto para el caso 2 y 3, teniendo una potencia semejante en ellos, a diferencia del caso 1 en el cual el Gen 1 es el que más potencia activa genera, debido a la mayor presencia de pérdidas con respecto a los otros casos de estudio.

Mediante el grafico de barras de la figura 7, podremos visualizar que el generador 1 es el que más potencia reactiva entrega con respecto a los otros generadores, para el caso 2 que incluye la minimización de pérdidas considerando el efecto corona presente en las líneas, se obtiene una minimización de potencia reactiva de 3.7 [Mvar] con respecto al caso 1, para el caso 3 que es la minimización de pérdidas sin considerar el efecto corona de las líneas, la respuesta es favorable ya que la minimización presenta un valor de 1.6 [Mvar], con respecto al caso 1 que representa la simulación en el software Disgsilent, los generadores del caso 2 y 3 consumen potencia reactiva .

Sí analizamos los 3 casos se determina que el caso 2 es el que mejor respuesta tiene frente a la minimización.

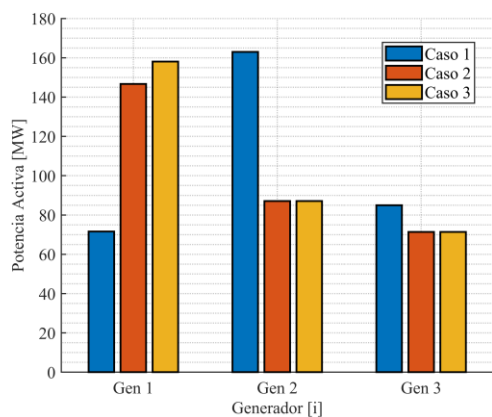


Figura 6: Generación de su potencia en activa modelo de 9 barras.

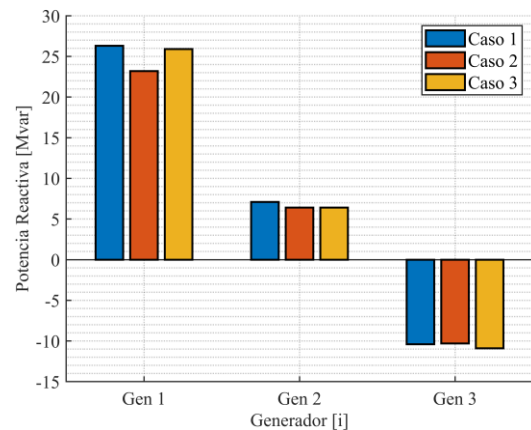


Figura 7: Generación de su potencia reactiva sistema de 9 barras.

5.1.3 Transferencia de potencia activa para el modelo de 9 barras

En la tabla 6, se detallan los resultados obtenidos mediante la transferencia de potencia activa para cada línea de transmisión, haciendo un análisis comparativo correspondiente a los casos de estudio 1, 2 y 3. En este sentido, para el caso 2 y 3, donde se consideran y no se consideran las pérdidas por efecto corona utilizando para el desarrollo de estos casos una función de minimización, con la finalidad de obtener valores muy parecidos al primer caso. A través de la figura 8 se puede visualizar los valores correspondientes al caso de estudio 2, en donde se presenta una mayor minimización de pérdidas gracias a la implementación del algoritmo propuesto en GAMS, siendo así la mayor disminución de potencia reactiva.

Se pudo determinar que existe una variación entre el caso 1 con respecto al caso 2 y 3, esto se debe a que en estos dos casos estamos utilizando la función de minimización considerando pérdidas por efecto corona consiguiendo una variación de 19.2 [MW], con respecto al caso 1.

Conexión nodo [i-j]	Caso 1	Caso 2	Caso 3
	P [MW] Digsilent	P [MW] GAMS	P [MW] GAMS
4-5	86.6	93	93.2
4-6	76.3	65.7	65.6
5-7	-30.8	-32.7	-32.8
6-9	-24.1	-25.1	-25
7-8	60.7	54.2	54.2
8-9	-40.6	-46.2	-46.2
Total	128.1	108.9	109

Tabla 6: Transferencia entre nodo [i-j] de activa para el modelo de 9 barras.

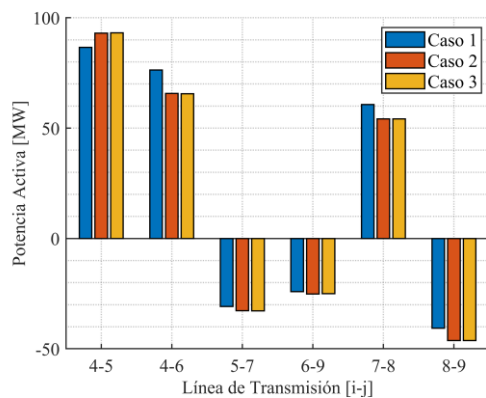


Figura 8: Transferencia de activa para el modelo de 9 barras.

5.1.4 Transferencia de potencia reactiva modelo de 9 barras

En la tabla 7, se detallan los resultados obtenidos mediante la transferencia de potencia reactiva que circula por las líneas de transmisión, teniendo en cuenta las características con las que cuenta cada caso de estudio planteado en este documento.

Los datos obtenidos tanto para el caso 2 y 3, que son los estudios que consideran y no consideran pérdidas por efecto corona obteniendo valores similares a diferencia del caso 1, como se puede visualizar en la figura 9, el caso de estudio 1 es el que mayor capacidad de transferencia de potencia reactiva tiene, con lo cual, se puede evidenciar que existe una variación entre el caso 1 con respecto al caso 2 y 3, esto se debe al uso de la función de minimización considerando pérdidas por efecto corona

consiguiendo una variación del 1.14 [p.u], específicamente en la línea 4-6, 5-7 y 6-9 en relación a la opción 1.

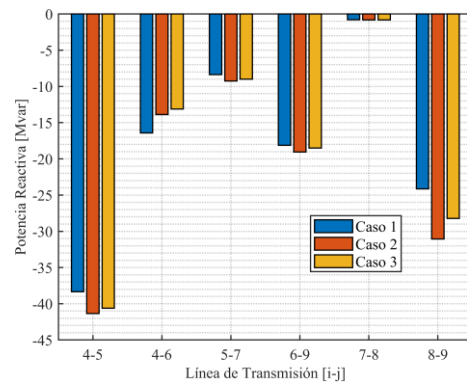


Figura 9: Transferencia de reactivos para el modelo de 9 barras.

5.1.5 Pérdidas en potencia activa en líneas de transmisión para el modelo de 9 barras

Mediante la figura 10, se detalla gráficamente el comportamiento que tiene cada línea de transmisión con respecto a las pérdidas de potencia activa existente. En la tabla 8 se especifica los resultados numéricos obtenidos por el software GAMS para validar la similitud con los resultados obtenidos en el software Digsilent, donde se puede evidenciar que la mayor presencia de pérdidas de potencia activa está dada por el caso 1 donde se analiza el OPF a diferencia de los casos 2 y 3, los cuales fueron similares y mínimos ya que para estos casos de estudio se utilizó la función de minimización de pérdidas.

Conexión nodo [i-j]	Caso 1	Caso 2	Caso3
	Q [Mvar] Digsilent	Q [Mvar] GAMS	Q [Mvar] GAMS
4-5	-38.35	-41.35	-40.61
4-6	-16.41	-13.87	-13.12
5-7	-8.37	-9.24	-9.00
6-9	-18.32	-19.05	-18.5
7-8	-0.79	-0.81	-0.80
8-9	-24.15	-31.06	-28.23
Total	-106.19	-115.38	-110.26

Tabla 7: Transferencia entre nodo [i-j] de reactiva para el modelo de 9 barras.

Conexión nodo [i-j]	Caso 1	Caso 2	Caso 3
	P [MW] Digsilent	P [MW] GAMS	P [MW] GAMS
4-5	0.255	0.07	0.06
4-6	0.167	0.06	0.07
5-7	0.296	0.03	0.02
6-9	0.347	0.02	0.02
7-8	0.473	0.02	0.01
8-9	0.088	0.02	0.02
Total	0.964	0.22	0.18

Tabla 8: Pérdida en potencia activa en L/T para el modelo de 9 barras.

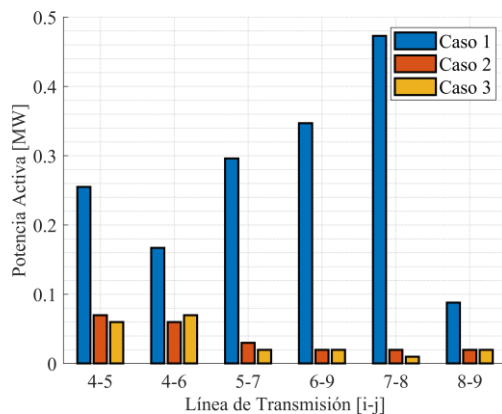


Figura 10: Pérdida en potencia activa en L/T para el modelo de 9 barras.

5.1.6 Estabilidad angular para el modelo de 9 barras (Curva P- δ)

Mediante la figura 11, se analiza el comportamiento de los ángulos de los rotores de los generadores sincrónicos a partir de la curva de oscilación implementado en el modelo de 9 barras.

Este análisis se obtuvo a partir de un estudio en estado estático, haciendo referencia a una perturbación mínima producida en el sistema, lo que provoca que las condiciones operacionales en estado estable sean muy parecidas a las condiciones normales, sin variar los límites de estabilidad estática, por lo que el sistema no se ve afectado bajo esta condición, por lo cual los generadores no pierden sincronismo y el sistema sigue operando

con normalidad, cumpliendo sus índices de estabilidad.

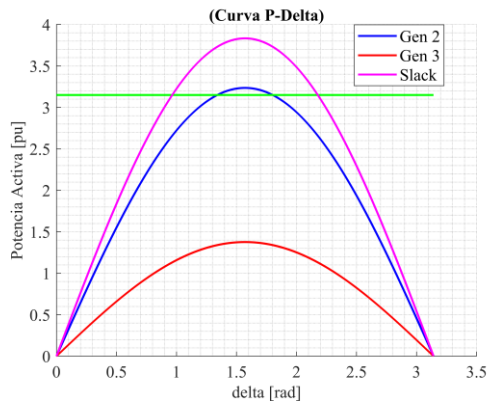


Figura 11: Curva (P- δ) para el modelo de 9 barras.

5.1.7 Estabilidad de tensión para el modelo de 9 barras (Curva P-V)

Mediante la figura 12, se detalla el comportamiento de la curva P-V. Este análisis se desarrolló a partir de la obtención de los valores de la barra asociada a la demanda del sistema. Los límites de estabilidad de tensión se encuentran delimitados entre 1.05 [p.u] y 0.95 [p.u] además del margen de cargabilidad total del sistema. Tanto para la curva azul (bus 6), curva verde (bus 5) y la curva roja (bus 8) se puede visualizar que están dentro del rango estable dada por la característica general de la Curva P-V cumpliendo los estándares de calidad y estabilidad del sistema.

Cuando el valor en magnitud de voltaje excede el límite inferior en el margen de cargabilidad, muestra que el sistema se acerca al sitio de colapso. Donde el valor mínimo de tensión llega al valor máximo de potencia del sistema lo cual representa un sistema inestable, este análisis se lo resuelve de manera global tomando en consideración todas las cargas del sistema para así poder realizar una comparación entre las diferentes curvas.

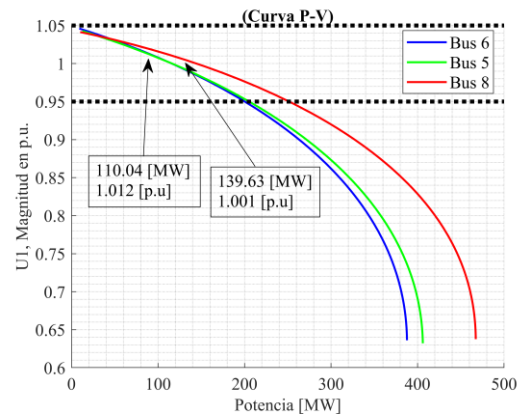


Figura 12: Curva (P-V) para el modelo de 9 barras.

5.2 Modelo de 14 barras

Este sistema de prueba consta de 5 generadores cada uno está conectado respectivamente a las barras 1, 2, 3, y 8. También cuenta con un total de 15 líneas de transmisión y 5 transformadores de potencia de los cuales sirven como interconexión entre todo el sistema.

A su vez cuenta con dos compensaciones reactivas la primera está conectada a barra 9 y las segunda compensación está conectada a la barra 14, el dato técnico para el dimensionamiento de la compensación reactiva es de 0.3 [p.u] y el valor empleado se encuentra en [41].

Mediante la figura 13 logramos visualizar su diagrama unifilar, los datos que posteriormente se emplearon en este sistema se tomaron de la referencia a partir del anexo 2 del presente documento, este sistema es muy completo ya que posee cargas de distintas capacidades distribuidas a lo largo de todo el sistema, al igual que se emplea dos diferentes rangos de tensión, 33 [kV] y 132 [kV] respectivamente, este dato nos permitirá generar un escenario en el cual exista pérdidas por efecto corona y posteriormente calcularlas cumpliendo así el caso 2, el cual es la minimización de pérdidas considerando las pérdidas por corona producidas en transmisión, los parámetros que se consideró para la obtención del valor total de pérdidas por corona de cada L/T se detallan las tablas de

los resultados en apartado de anexos correspondiente a la demostración de cómo se implementó las pérdidas por corona.

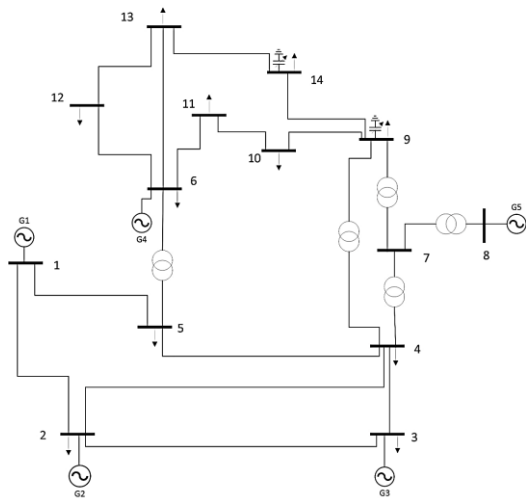


Figura 13: Modelo de prueba de 14 barras.

5.2.1 Perfil de tensión para el modelo de 14 barras

Los resultados obtenidos correspondiente a los perfiles de tensión implementados en el modelo de prueba 14 barras del IEEE, se detallan en la tabla 9, para este análisis se consideró los casos de estudio 1, 2 y 3. Estos datos se obtuvieron a partir de la simulación del flujo modelado en GAMS, haciendo una comparativa con los datos obtenidos entre el software GAMS y el software Digsilent.

Para los diferentes casos de estudio se obtuvo valores similares al realizar la tabla comparativa, el caso 2 con respecto al caso 1 y 3, en la figura 14 se puede visualizar que en la barra 1 todos inician con el mismo perfil de tensión de 1.06 [p.u] a medida que va tomando los valores en las barras restantes ese perfil de tensión va variando, en el caso 1, llegando a tener un valor máximo de perfil de tensión de 1.09 [p.u] y para el caso 3 llegando a tener un valor máximo de perfil de tensión de 1.068 [p.u], un valor mínimo para el caso 1 de 1.013 [p.u] y para el caso 3 un valor de 1.029 [p.u], sí bien estos resultados al inicio sobrepasan los límites de voltaje máximos y

mínimos establecidos, cuando se presentan perfiles de tensión elevados se considera que disminuye la demanda de reactivos, disminuyendo la estabilidad de tensión.

A medida que va simulando el perfil de tensión en las siguientes barras, al llegar a la barra 9 hasta la barra 14 el perfil de tensión se encuentra dentro del rango operacional estable, a diferencia del caso 2 el cual tiene un contraste en magnitud en los perfiles de tensión de cada barra del sistema con respecto al caso 1 y 3. El caso 2 se mantiene dentro del rango operacional estable cumpliendo los criterios de estabilidad al momento analizar el perfil de tensión que se producen en los nodos del sistema.

5.2.2 Generación de potencia activa y reactiva para el modelo de 14 barras

Mediante el análisis de las tablas 10 y 11, el componente de generación en potencia activa obtenida para cada caso de estudio se logró evidenciar que la potencia despachada por el generador 1 en el caso 1, una vez simulado el flujo es 141.3 [MW] considerándolo como el generador slack. Realizando un balance de los datos de potencia activa total comprobada para los diferentes casos de estudio se logró evidenciar que son valores parecidos para los tres casos de estudio, sin embargo en el caso 2 se puede verificar que se produjo una reducción en la potencia activa que entrega cada generador del sistema, considerando que para este caso se utilizó la función de minimización pérdidas por efecto corona se estableció un valor de 2.93 [MW], el cual es menor al valor de la potencia total del caso 1 y 3, ya que en estos dos casos solo se utilizó la función de minimización de pérdidas, reduciendo la potencia generada en 3 [MW] con respecto a la potencia total del caso 1.

Donde Gen 1 para el estudio 1 es el generador que mayor potencia activa inyecta con un valor de 141.3 [MW].

Num. Barra	Caso 1	Caso 2	Caso 3
	Voltaje [p.u] Digsilent	Voltaje [p.u] GAMS	Voltaje [p.u] GAMS
1	1.060	1.060	1.060
2	1.045	1.052	1.045
3	1.024	1.050	1.038
4	1.013	1.046	1.029
5	1.026	1.049	1.041
6	1.070	1.051	1.059
7	1.057	1.047	1.062
8	1.090	1.053	1.068
9	1.050	1.044	1.056
10	1.044	1.038	1.051
11	1.053	1.046	1.057
12	1.054	1.042	1.055
13	1.048	1.035	1.050
14	1.030	1.032	1.036

Tabla 9: Perfiles de tensión para el modelo de 14 barras.

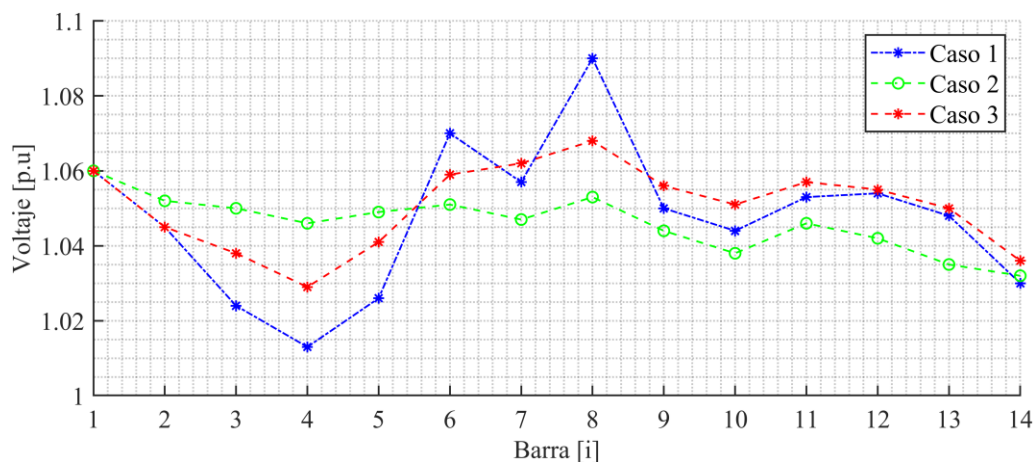


Figura 14: Perfiles de tensión para el modelo de 14 barras.

El Gen 1 representa a la máquina de referencia aportando la potencia que le falta al sistema para cubrir su demanda. El generador 3 para el caso 2, es el que mayor potencia activa despacha con un valor de 93.1 [MW]. El generador 3 para el caso 3 es el que mayor potencia activa despacha con un valor de 96.8 [MW], con respecto al caso 1 y 2.

En la figura 15 se especifica el comportamiento de los valores obtenidos en generación de potencia activa hacia los diferentes casos de estudio.

Los datos proporcionados por la tabla 11 corresponden a los datos de potencia reactiva de los distintos casos. Como se puede visualizar mediante la figura 16, podremos notar que el generador 1 no inyecta reactivos para ninguno de los casos.

Num. Barra	Caso 1	Caso 2	Caso 3
	P[MW] Digsilent	P [MW] GAMS	P [MW] GAMS
1	141.3	50.4	50
2	20.3	20	20
3	61.4	93.1	96.8
4	20	40.5	43.2
5	20	55	50
Total	263	259.07	260

Tabla 10: Generación en activa para el modelo de 14 barras.

Num. Barra	Caso 1	Caso 2	Caso 3
	Q[Mvar] Digsilent	Q [Mvar] GAMS	Q [Mvar] GAMS
1	0.0	0.0	0.0
2	8.1	-5.1	-4.7
3	19.5	16.4	17.5
4	18.3	17.1	17.8
5	20.17	-5.0	-6.0
C1	---	30	30
C2	---	7.0	7.2
Total	66.07	60.4	61.8

Tabla 11: Generación de reactivos para el modelo de 14 barras.

Realizando un balance total de la potencia reactiva de los generadores se obtuvo variaciones con respecto al caso 1. La variación de la potencia reactiva es producida por la incorporación de dos compensaciones capacitivas que son muy utilizadas para mejorar el perfil de tensión y aporta reactivos al sistema.

El generador 5 del caso 1 es el que mayor potencia reactiva despacha con un valor de 20.17 [Mvar] a comparación de los otros casos de estudio.

Para el caso 2 en el que se incluye la minimización de pérdidas por efecto corona, al igual que la incorporación en potencia reactiva mediante la compensación dio como resultado que se redujera los reactivos, ayudando a estabilizar la potencia que suministra el resto de generadores en un valor de 6.67 [Mvar], con respecto al caso 1. El caso 3 que es la minimización de

pérdidas sin considerar efecto corona, se obtiene una respuesta favorable en la minimización con un valor de 4.27 [Mvar] con respecto al caso 1 que representa la simulación en software Digsilent.

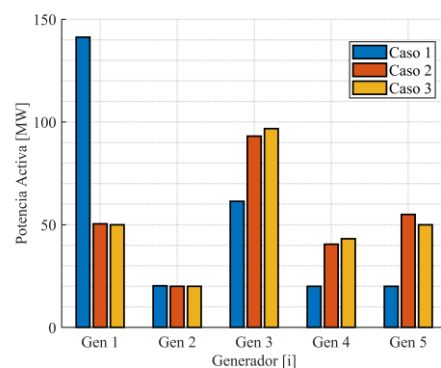


Figura 15: Generación de su potencia activa para el modelo de 14 barras.

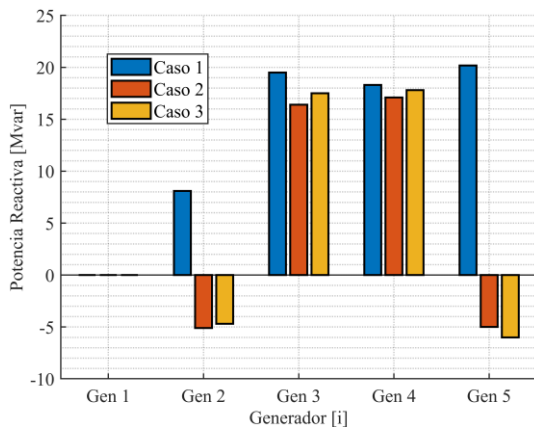


Figura 16: Generación de potencia en reactiva para el modelo de 14 barras.

5.2.3 Transferencia de potencia activa modelo de 14 barras

Mediante el análisis a partir de la tabla 12 podemos observar los valores numéricos totales de potencia activa que circula por las líneas de transmisión, teniendo en cuenta las características con las que cuenta cada caso de estudio planteado en este documento.

Los datos obtenidos tanto para el caso 2 y 3, donde se considera y no se considera efecto corona presentan resultados muy parecidos con respecto al caso 1 obteniendo una adecuada transferencia de potencia hacia todo el sistema.

En el caso 2 se puede visualizar que se obtiene una disminución en pérdidas gracias a la implementación de algoritmo propuesto en GAMS.

Realizando la sumatoria de potencias para cada caso de estudio se pudo evidenciar que el flujo de potencia AC simulado en Digsilent al no considerar la minimización de las pérdidas, nos arroja valores sumamente elevados en comparación al caso 2, llegando a tener en su punto más alto una transferencia de potencia de 85.66 [MW], esto se debe a que el sistema de 14 barras cuenta con cargas elevadas y dos diferentes niveles de voltaje los resultados para el nivel de 132 [kV] estén en un rango de 44-85 [MW] y los

resultados obtenidos mediante el análisis con el voltaje de 33 [kV] se encuentre en un rango de 1-18 [MW].

Caso contrario al analizar los resultados obtenidos de potencia activa por líneas de transmisión para el caso 2 y 3 en el software GAMS, en el cual además de utilizar los datos de minimización, se busca optimizar los procesos y encontrar una solución factible al flujo de potencia.

La representación gráfica de la transferencia de potencia activa se encuentra dada por la figura 17, en la cual se representa con varios colores cada caso de estudio para mejor apreciación de los resultados obtenidos.

5.2.4 Transferencia de potencia reactiva modelo de 14 barras

Mediante el análisis a partir de la tabla 13 se describen los datos numéricos de potencia reactiva que transmite a través de las líneas de transmisión.

Los datos obtenidos tanto para el caso 2 y 3, son los estudios que consideran y no consideran pérdidas por efecto corona presentan resultados muy parecidos con respecto al caso 1, como se puede visualizar en la figura 18, el caso de estudio 1 es el que mayor capacidad de transferencia de potencia reactiva tiene. En el caso 2 y 3 sí bien existe una transferencia de potencia reactiva es mínima ya que el rango de sus valores está entre 0.003-0.40 [p.u] por lo que existe una gran diferencia al caso 1. Los resultados obtenidos varían en función de la línea de transmisión que se analice, específicamente en el caso 1 a partir de la línea 6-12 hasta la 6-14 el valor de potencia reactiva tiende a 0 ya que este ramal cuenta con un voltaje de 33 [kV], el cual tiene una muy baja demanda de reactivos, en relación al caso 1.

La representación gráfica de la transferencia de potencia reactiva está representada por la figura 18.

Conexión nodo [i-j]	Caso 1	Caso 2	Caso 3
	P [MW] Digsilent	P [MW] GAMS	P [MW] GAMS
1-2	85.66	71.51	70.24
1-5	81.45	73.72	71.72
2-3	78.74	69.60	68.00
2-4	59.92	47.81	47.42
2-5	44.30	41.25	39.93
3-4	-24.72	-19.3	-19
4-5	65.81	53.71	52.83
6-11	-7.99	-8.2	-7.90
6-12	8.39	7.80	7.80
6-13	-18.87	-18.2	-18.2
9-10	5.41	4.41	4.48
9-14	-9.81	-9.0	-9.00
10-11	-4.22	-4.63	-4.60
12-13	1.78	1.68	1.65
13-14	6.20	6.31	6.12
Total	372.05	328.47	314.49

Tabla 12: Transferencia entre nodo [i-j] de activa para el modelo de 14 barras.

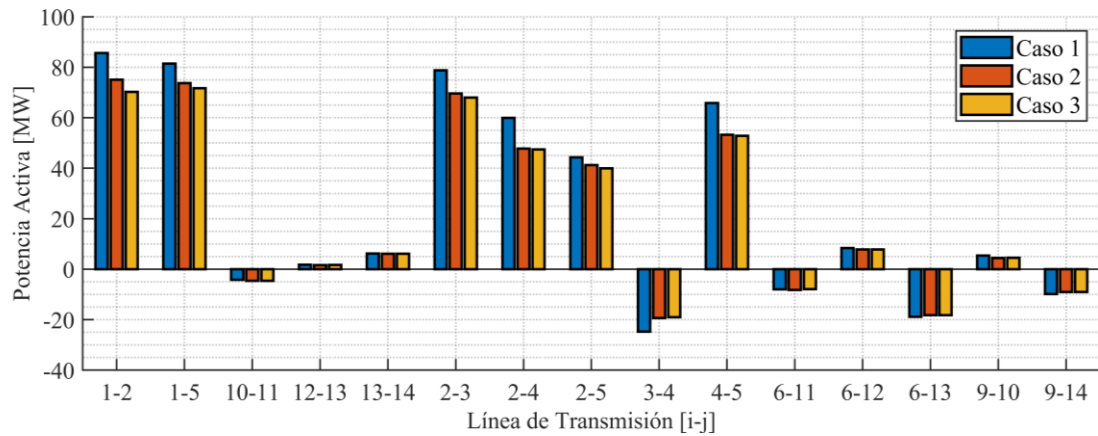


Figura 17: Transferencia entre nodo [i-j] de activa para el modelo de 14 barras.

Conexión nodo [i-j]	Caso 1	Caso 2	Caso 3
	Q [Mvar] Digsilent	Q [Mvar] GAMS	Q [Mvar] GAMS
1-2	-11.859	-11.623	-11.263
1-5	4.988	3.982	3.982
2-3	3.048	2.988	2.988
2-4	0.158	0.158	0.421
2-5	2.532	2.672	2.672
3-4	6.872	6.442	6.442
4-5	-12.909	-12.521	-12.521
6-11	-5.097	-4.991	-4.991
6-12	2.828	2.828	2.828
6-13	-7.822	-7.794	-7.794
9-10	5.166	5.023	5.023
9-14	-2.942	-2.942	-2.942
10-11	-3.122	-3.122	-3.122
12-13	0.940	0.940	0.940
13-14	2.549	2.549	2.549
Total	-15.767	-16.508	0.3823

Tabla 13: Transferencia entre nodo [i-j] de reactiva para el modelo de 14 barras.

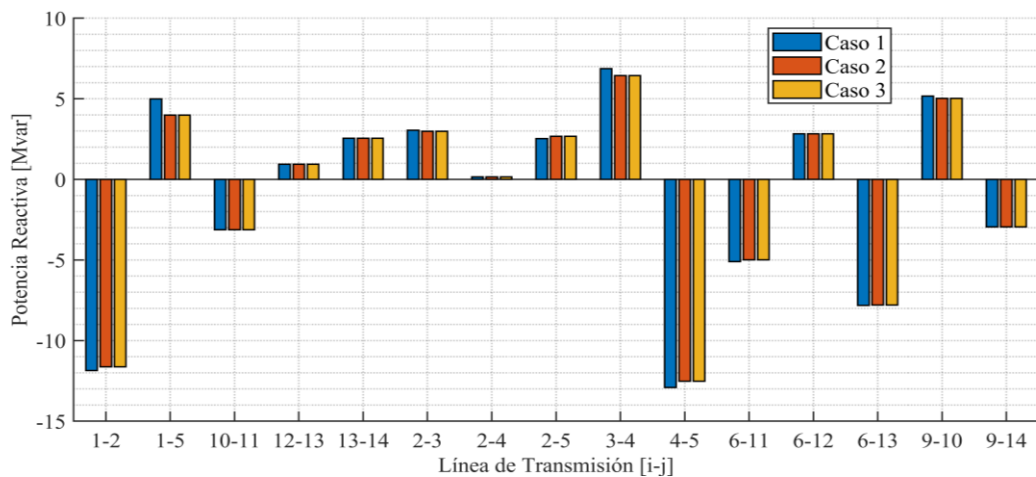


Figura 18: Transferencia entre nodo [i-j] de reactiva para el modelo de 14 barras.

5.2.5 Pérdidas en líneas de transmisión

Mediante el análisis detallado en la figura 19 se encuentran las pérdidas de potencia activa por cada línea de transmisión dentro del modelo de 14 barras del IEEE. Los datos recopilados se visualizan a través de la tabla 14 donde se especifican los resultados

obtenidos por el software GAMS para su comprobación el software Digsilent.

Las pérdidas de potencia activa para el caso 1, presenta incremento con un valor de 4.928 [MW], por otro lado, para el caso 2 y 3, los resultados obtenidos fueron mínimos llegando a ser de 2.092 [MW] y 1.295 [MW] respectivamente, casos de estudio donde se utilizó la función de minimización de pérdidas.

Conexión nodo [i-j]	Caso 1	Caso 2	Caso 3
	P [MW] Digsilent	P [MW] GAMS	P [MW] GAMS
1-2	1.600	0.205	0.221
1-5	1.136	0.104	0.131
2-3	0.510	0.013	0.027
2-4	0.618	0.100	0.116
2-5	0.306	0.059	0.071
3-4	0.003	0.044	0.059
4-5	0.200	0.038	0.047
6-11	0.071	0.060	0.078
6-12	0.080	0.070	0.083
6-13	0.200	0.200	0.220
9-10	0.011	0.017	0.023
9-14	0.100	0.095	0.110
10-11	0.018	0.016	0.025
12-13	0.007	0.005	0.013
13-14	0.068	0.066	0.071
Total	4.928	2.092	1.295

Tabla 14: Pérdidas en potencia activa en L/T para el modelo de 14 barras.

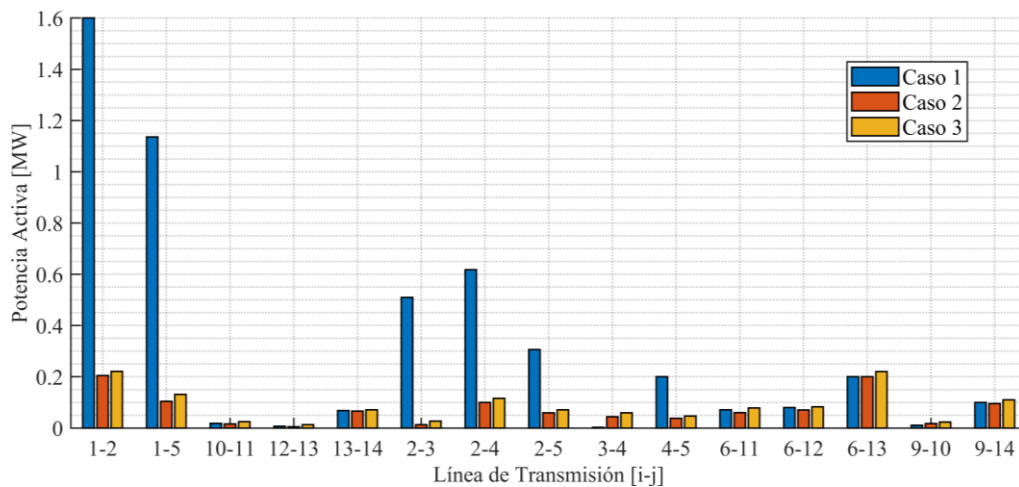


Figura 19: Pérdidas en activa en L/T para el modelo de 14 barras.

5.2.6 Estabilidad angular en sistema de 14 barras (Curva P- δ)

Mediante la figura 20, se analiza el comportamiento de los ángulos de los rotores de los generadores sincrónicos a partir de la curva de oscilación implementado en el modelo de 14 barras.

Este análisis en estado estático es la condición del sistema, lo que hace referencia a una perturbación mínima, lo

que provoca que las condiciones operacionales en estado estable sean muy parecidas a las condiciones normales, sin variar los límites de estabilidad estática, por lo que el sistema no se ve afectado bajo esta condición, causando que los generadores no pierden sincronismo y el sistema siga operación con normalidad, cumpliendo sus índices de estabilidad.

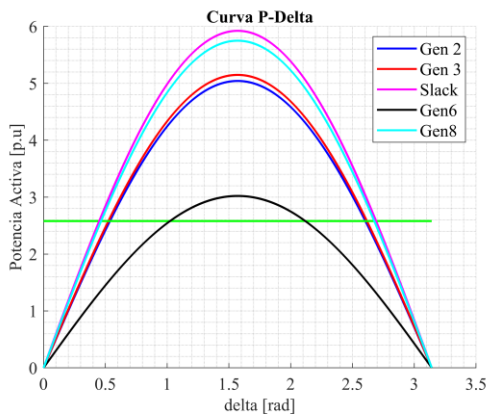


Figura 20: Curva (P- δ) sistema de 14 barras.

5.2.7 Estabilidad de tensión para el modelo de 14 barras (Curva P-V)

Mediante los resultados proporcionados por la figura 21 y 22 se presenta la curva P-V para el modelo de 14 barras.

Este análisis se lo resolvió obteniendo los valores de la barra asociada a la demanda del sistema, los límites de estabilidad de tensión se encuentran delimitados entre 1.05 [p.u] y 0.95 [p.u], teniendo también en cuenta el margen de cargabilidad total del sistema.

Tanto para las curvas de la gráfica de 132 [kV] y la curva de la gráfica de 33 [kV] se puede visualizar que están dentro del rango estable definido por la característica general de la Curva P-V cumpliendo los estándares de calidad y estabilidad.

Cuando el valor en magnitud de voltaje excede el límite inferior en el margen de cargabilidad, muestra que el sistema se acerca al sitio de colapso. Donde el valor mínimo de tensión llega al valor máximo de potencia del sistema lo cual representa un sistema inestable, este análisis se lo resuelve de manera global tomando en consideración todas las cargas del sistema para así poder realizar una comparación entre las diferentes curvas.

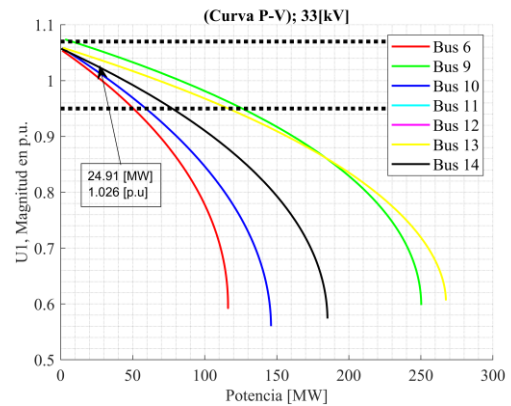


Figura 21: Curva (P-V) sistema de 14 barras 33 [kV].

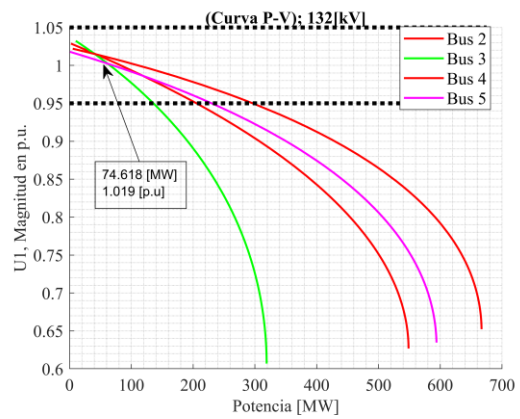


Figura 22: Curva (P-V) sistema de 14 barras 132 [kV].

6 Conclusiones

Mediante la implementación del algoritmo propuesto, se obtuvo una óptima respuesta frente a la minimización de pérdidas tanto para los modelos de 9, 14 del IEEE, logrando minimizar las pérdidas tanto en un 42.5%, equivalente al 2.092 [MW] para el caso 2 y un 26.2%, equivalente 1.295 [MW] para el caso 3, en relación al caso 1, el cual presenta pérdidas del 4.928 [MW] este caso nos sirvió como base para la comparativa entre los diferentes casos de estudio los cuales poseen distintas características. Mediante la implementación de la función objetivo para este estudio se obtuvieron resultados favorables tanto a nivel de generación mediante el óptimo despacho de potencia y adecuada transferencia de potencia por las líneas que es en donde se enfocó este estudio. Cumpliendo los límites previamente establecidos, con el fin de

validar que este modelo puede ser empleado en sistemas mucho más robustos.

El análisis correspondiente a la estabilidad estática en los generadores de los modelos 9 y 14 barras, demuestran que el sistema bajo perturbaciones pequeñas no sufre variación en la curva de oscilación de los generadores lo que demuestra que mediante el estudio los generadores no presentan una pérdida en su sincronismo y cumple con la demanda del sistema cuyo valor es de 277.10[MW] para el modelo de 14 barras, mientras que para el sistema de 9 barras los resultados obtenidos indican que el generador Slack y Gen2 se encuentran cumpliendo con la potencia eléctrica establecida de 315 [MW] y el Gen3 se encuentra bajo el límite.

Mediante el análisis de estabilidad de tensión se pudo visualizar que las curvas están dentro del rango estable dada por la característica general de la Curva P-V cumpliendo los estándares de calidad y estabilidad. Lo cual al revisar los resultados se estableció que el margen mínimo no sobrepasa la potencia máxima de 700 [MW] para el modelo de 14 barras, mientras que en el modelo de 9 se estableció que el margen mínimo no sobrepasa la potencia máxima de 500 [MW], considerando que ambos sistemas son estables.

Los resultados logrados a partir de la implementación del algoritmo en el software GAMS y comparados a través de la simulación de los sistemas en el software Digsilent demuestran que el algoritmo es confiable para su implementación en cualquier tipo de sistemas.

7 Trabajos a Futuro

El estudio referente a la minimización de pérdidas y estabilidad presentado en este artículo académico puede aprovecharse como referencia para futuros trabajos bajo la misma temática de investigación:

- Estabilidad en estado dinámico multimáquina considerando perturbaciones transitorias.

8 Referencias

- [1] G. Dimov, S. Tzvetkova, A. Petleshkov, and Y. Lozanov, "Organization of the operational management and change of the indicators for continuity of the electric power supply in Bulgaria," pp. 1–4, 2022, doi: 10.1109/bulef53491.2021.9690786.
- [2] S. E. Lyshevski and C. Yokomoto, "Nonlinear dynamics, control, and stability analysis of power systems," *Proc. Am. Control Conf.*, vol. 6, no. June, pp. 3408–3409, 2004, doi: 10.1109/ACC.1998.703222.
- [3] X. Chai, X. Liang, and R. Zeng, "Flexible Compact AC Transmission System a New Mode for Large-capacity and Long-distance Power Transmission," in *2006 IEEE Power Engineering Society General Meeting*, 2006, pp. 1–6. doi: 10.1109/PES.2006.1708986.
- [4] Q. Hui, J. Yang, X. Yang, Z. Chen, Y. Li, and Y. Teng, "A robust control strategy to improve transient stability for AC-DC interconnected power system with wind farms," *CSEE J. Power Energy Syst.*, vol. 5, no. 2, pp. 259–265, 2019, doi: 10.17775/cseejpes.2019.00250.
- [5] S. Ekici, "Classification of power system disturbances using support vector machines," *Expert Syst. Appl.*, vol. 36, no. 6, pp. 9859–9868, 2009, doi: 10.1016/j.eswa.2009.02.002.
- [6] C. Vásquez Ubilla and G. Reyes Vaca, "Analysis of power flow in long transmission lines," p. 179, 2017, [Online]. Available: <https://dSPACE.ups.edu.ec/bitstream/123456789/14177/1/UPS-GT001870.pdf>

- [7] A. F. M. Nor, M. Sulaiman, and R. Omar, "Study of voltage and power stability margins of electrical power system using ANN," *IET Conf. Publ.*, vol. 2016, no. CP688, pp. 7–13, 2016, doi: 10.1049/cp.2016.1292.
- [8] S. M. Jami Solis, "Evaluation of the stability of the electrical transmission system from symmetrical structures considering load transfer," *I+D Tecnológico*, vol. 16, no. 2, 2020, doi: 10.33412/idt.v16.2.2836.
- [9] C. Rafael, "Determination of Transmission Limits on Electric Power Systems," *Ing. Investig. y Tecnol.*, vol. 15, no. 2, pp. 271–286, 2014, [Online]. Available: [http://dx.doi.org/10.1016/S1405-7743\(14\)72216-4](http://dx.doi.org/10.1016/S1405-7743(14)72216-4)
- [10] J. F. Manirakiza and A. O. Ekwue, "Technical Losses Reduction Strategies in a Transmission Network," *IEEE AFRICON Conf.*, vol. 2019-Septe, pp. 1–5, 2019, doi: 10.1109/AFRICON46755.2019.9133886.
- [11] T. L. Alumona, M. O. Nwosu, A. O. Ezechukwu, and C. Jonah, "Overview Of Losses And Solutions In Power Transmission Lines," *Iiste*, vol. 4, no. 8, pp. 24–31, 2014.
- [12] S. Biansoongnern, S. Chusanapiputt, and S. Phoomvuthisarn, "Minimization of transmission loss with consideration of transformer taps constraint," *IEEE Reg. 10 Annu. Int. Conf. Proceedings/TENCON*, vol. 2007, no. 2, 2005, doi: 10.1109/TENCON.2005.300959.
- [13] A. M. Ramly, N. Aminudin, I. Musirin, D. Johari, and N. Hashim, "Reactive power planning for transmission loss minimization," *2011 5th Int. Power Eng. Optim. Conf. PEOCO 2011 - Progr. Abstr.*, no. June, pp. 116–120, 2011, doi: 10.1109/PEOCO.2011.5970457.
- [14] N. T. Rao, J. C. B. Yadav, and A. Jagannadham, "Optimal reactive power flow control for minimization of active power losses using Particle swarm Optimization," *2015 Conf. Power, Control. Commun. Comput. Technol. Sustain. Growth, PCCCTSG 2015*, pp. 38–41, 2016, doi: 10.1109/PCCCTSG.2015.7503954.
- [15] R. Ucheniya, "Real power transmission loss minimization and bus voltage improvement using STATCOM," pp. 236–241, 2019.
- [16] A. Malkhandi and E. Engineering, "Teaching and Learning based Optimization Applied to Optimization of Power Transmission Line Parameters," *2016 IEEE 6^a Conf. Int. sobre Sist. Potencia*, pp. 0–3, 2016.
- [17] T. Ding, R. Bo, F. Li, and H. Sun, "Optimal Power Flow with the Consideration of Flexible Transmission Line Impedance," *IEEE Trans. Power Syst.*, vol. 31, no. 2, pp. 1655–1656, 2016, doi: 10.1109/TPWRS.2015.2412682.
- [18] H. Glavitsch and R. Bacher, "Optimal power flow problem in ordinary systems," *Technology*, vol. 41, pp. 135–205, 1991.
- [19] H. Yang, Y. Gu, Y. Zhang, and Z. Bi, "Reactive power optimization of power system based on interior point method and branch-bound method," *PEITS 2009 - 2009 2nd Conf. Power Electron. Intell. Transp. Syst.*, vol. 3, pp. 5–8, 2009, doi: 10.1109/PEITS.2009.5406890.
- [20] V. Kariwala and Y. Cao, "Bidirectional branch and bound for controlled variable selection part III: Local average loss minimization," *IEEE Trans. Ind. Informatics*, vol. 6, no. 1, pp. 54–61, 2010, doi: 10.1109/TII.2009.2037494.
- [21] D. Chavez, S. Espinosa, and D. Arias

- Cazco, "Reactive Power Optimization of the Electric System based on Minimization of Losses," *IEEE Lat. Am. Trans.*, vol. 14, no. 11, pp. 4540–4546, 2016, doi: 10.1109/TLA.2016.7795826.
- [22] N. Othman, I. Musirin, M. A. Rahim, and Z. Othman, "Bees algorithm technique for loss minimization in power transmission network using static var compensator," *PEOCO 2010 - 4th Int. Power Eng. Optim. Conf. Progr. Abstr.*, no. June, pp. 164–169, 2010, doi: 10.1109/PEOCO.2010.5559165.
- [23] W. X. Pan, X. Chen, and Y. Li, "Calculation Method of Corona Loss of Transmission Line Based on AC/DC Power Flow," *ICHVE 2018 - 2018 IEEE Int. Conf. High Volt. Eng. Appl.*, no. 5, pp. 5–8, 2019, doi: 10.1109/ICHVE.2018.8642196.
- [24] W. X. Pan, X. Chen, and Y. Li, "Corona Loss of Transmission Line Based on AC," *ICHVE 2018 - 2018 IEEE Int. Conf. High Volt. Eng. Appl.*, no. 5, pp. 22–25, 2019, doi: 10.1109/ICHVE.2018.8642196.
- [25] J. Liang, L. Jiang, W. Li, and L. Pen, "Corona discharge characteristics for conductors of HVDC transmission lines with different heights to ground," *China Int. Conf. Electr. Distrib. CICED*, no. 201805280000153, pp. 888–891, 2018, doi: 10.1109/CICED.2018.8592569.
- [26] W. Chen, H. He, Y. Zou, and J. He, "Simulation of corona space charge generated from the $\pm 800\text{kV}$ UHVDC overhead transmission line in a thunderstorm," in *2016 IEEE International Conference on High Voltage Engineering and Application (ICHVE)*, 2016, no. 1, pp. 23–26. doi: 10.1109/ICHVE.2016.7800706.
- [27] F. C. Lü, S. H. You, Y. P. Liu, Q. F. Wan, and Z. Bin Zhao, "AC conductors' corona-loss calculation and analysis in corona cage," *IEEE Trans. Power Deliv.*, vol. 27, no. 2, pp. 877–885, 2012, doi: 10.1109/TPWRD.2012.2183681.
- [28] M. Tabibzadeh and M. Mirzaie, "Modeling and Transient analysis of Overhead Transmission Lines Considering Corona Phenomenon and Skin Effect," 2015. doi: 10.1109/KBEL.2015.7436120.
- [29] F. Yin, M. Farzaneh, and X. Jiang, "Corona investigation of an energized conductor under various weather conditions," *IEEE Trans. Dielectr. Electr. Insul.*, vol. 24, no. 1, pp. 462–470, 2017, doi: 10.1109/TDEI.2016.006302.
- [30] V. Kuchanskyy and I. O. Zaitsev, "Corona Discharge Power Losses Measurement Systems in Extra High Voltage Transmissions Lines," *2020 IEEE 7th Int. Conf. Energy Smart Syst. ESS 2020 - Proc.*, pp. 48–53, 2020, doi: 10.1109/ESS50319.2020.9160088.
- [31] I. Khairullin, A. Valeev, I. Yamalov, A. Nusenkis, and M. Okhotnikov, "Energy losses reduction on power lines," *Proc. - ICOECS 2019 2019 Int. Conf. Electrotech. Complexes Syst.*, pp. 3–7, 2019, doi: 10.1109/ICOECS46375.2019.8950003.
- [32] S. Fliscounakis, F. Lafeuillade, and C. Limousin, "Estimation of transmission loss coefficients from measurements," *2005 IEEE Russ. Power Tech, PowerTech*, no. 2, pp. 1–6, 2005, doi: 10.1109/PTC.2005.4524642.
- [33] S. S. Sharif, J. H. Taylor, and E. F. Hill, "On-line optimal reactive power flow by energy loss minimization," *Proc. IEEE Conf. Decis. Control*, vol. 4, no. December, pp. 3851–3856, 1996, doi: 10.1109/cdc.1996.577262.

- [34] N. Hatziaargyriou *et al.*, “Definition and Classification of Power System Stability - Revisited & Extended,” *IEEE Trans. Power Syst.*, vol. 36, no. 4, pp. 3271–3281, 2021, doi: 10.1109/TPWRS.2020.3041774.
- [35] J. U. Sevilla-Romero, C. R. Fuerte-Esquivel, A. Pizano-Martinez, and L. R. Merchan-Villalba, “Optimal preventive control of transient instabilities of rotor angles and nodal voltage magnitudes,” *2019 IEEE Int. Autumn Meet. Power, Electron. Comput. ROPEC 2019*, no. Ropec, 2019, doi: 10.1109/ROPEC48299.2019.9057046.
- [36] X. Li, Z. Li, L. Guan, L. Zhu, and F. Liu, “Review on Transient Voltage Stability of Power System,” *iSPEC 2020 - Proc. IEEE Sustain. Power Energy Conf. Energy Transit. Energy Internet*, pp. 940–947, 2020, doi: 10.1109/iSPEC50848.2020.9351059.
- [37] F. D. Rinaudo and L. M. Aromataris, “Impact of wind generation on transient stability of electrical power systems,” *2014 IEEE Bienn. Congr. Argentina, ARGENCON 2014*, pp. 438–442, 2014, doi: 10.1109/ARGENCON.2014.6868533.
- [38] Y. Song, S. Sahoo, Y. Yang, and F. Blaabjerg, “System-Level Stability of the CIGRE Low Voltage Benchmark System: Definitions and Extrapolations,” *2021 IEEE 22nd Work. Control Model. Power Electron. COMPEL 2021*, pp. 4–9, 2021, doi: 10.1109/COMPEL52922.2021.9645971.
- [39] Y. C. Kuyu and F. Vatansever, “Real Loss Minimization in Power Systems via Recent Optimization Techniques,” *ISMSIT 2018 - 2nd Int. Symp. Multidiscip. Stud. Innov. Technol. Proc.*, pp. 0–3, 2018, doi: 10.1109/ISMSIT.2018.8567060.
- [40] B. Das and A. Kumar, “Cost optimization of a hybrid energy storage system using GAMS,” *Int. Conf. Power Embed. Drive Control. ICPEDC 2017*, pp. 89–92, 2017, doi: 10.1109/ICPEDC.2017.8081065.
- [41] M. A. M. Shaheen, H. M. Hasanien, and A. Alkuhayli, “A novel hybrid GWO-PSO optimization technique for optimal reactive power dispatch problem solution,” *Ain Shams Eng. J.*, vol. 12, no. 1, pp. 621–630, 2021, doi: 10.1016/j.asej.2020.07.011.

8.1 Matriz de estado del arte

Tabla 15: Matriz de estado del arte.

MINIMIZACIÓN DE PÉRDIDAS EN REDES DE TRANSMISIÓN BASADO EN EL ANÁLISIS DE CAPACIDAD DE TRANSFERENCIA DE LAS LÍNEAS, MEDIANTE ÓPTIMOS FLUJOS DE POTENCIA																												
ITEM	DATOS			TEMÁTICA				FORMULACIÓN DEL PROBLEMA FUNCIONES OBJETIVO				RESTRICCIONES DEL PROBLEMA				PROPUESTAS PARA RESOLVER EL PROBLEMA				SOLUCIÓN PROPUESTA								
	AÑO	TÍTULO DEL ARTÍCULO	REFERENCIA	CITAS	Pérdidas en líneas de transmisión	Despacho óptimo de generación	Estabilidad angular sistemas de potencia	Estabilidad de voltaje en sistemas de potencia	Flujo de potencia AC	Metodología para reducción de pérdidas en líneas de transmisión	Método de resolución para funciones no lineales	Límite de cargabilidad en líneas de transmisión	Evaluación de estabilidad en sistemas de transmisión eléctrica	Optimización de parámetros en líneas de transmisión	Análisis de efecto corona en parámetros de líneas de transmisión	Límites en despacho de potencia activa y reactiva	Límites de potencia activa y reactiva	Límites de potencia en demanda del sistema	Cálculo de pérdidas de potencia en líneas de transmisión	Nuevo despacho de potencia reactiva	Evaluación de límites de voltaje y potencia en sistemas de transmisión	Evaluación de límites estabilidad angular	Minimización de pérdidas en líneas de transmisión	Simulación de sistemas de potencia en software especializado	Análisis de estabilidad angular en sistemas de potencia	Análisis de estabilidad de voltaje en sistemas de potencia	Pérdidas en líneas de transmisión	
1	2022	Organization of the operational management and change of the indicators for continuity of the electric power supply in Bulgaria	[1]	19	☒					☒			☒										☒					☒
2	2021	Definition and Classification of Power System Stability - Revisited & Extended	[34]	40			☒	☒				☒									☒	☒			☒	☒		
3	2021	System-Level Stability of the CIGRE Low Voltage Benchmark System: Definitions and Extrapolations	[38]	107				☒				☒									☒				☒			
4	2021	A novel hybrid GWO-PSO optimization technique for optimal reactive power dispatch problem solution	[41]	33	☒					☒					☒				☒	☒			☒					☒
5	2020	Evaluation of the stability of the electrical transmission system from symmetrical structures considering load transfer	[8]	305			☒				☒	☒	☒								☒	☒			☒	☒	☒	
6	2020	Corona Discharge Power Losses Measurement Systems in Extra High Voltage Transmissions Lines	[30]	158	☒					☒					☒				☒					☒				☒
7	2020	Review on Transient Voltage Stability of Power System	[36]	3				☒				☒									☒				☒			
8	2019	A robust control strategy to improve transient stability for AC-DC interconnected power system with wind farms	[4]	4				☒				☒									☒			☒		☒		
9	2019	Technical Losses Reduction Strategies in a Transmission Network	[10]	3	☒					☒	☒												☒	☒				☒

MINIMIZACIÓN DE PÉRDIDAS EN REDES DE TRANSMISIÓN BASADO EN EL ANÁLISIS DE CAPACIDAD DE TRANSFERENCIA DE LAS LÍNEAS, MEDIANTE ÓPTIMOS FLUJOS DE POTENCIA

ITEM	DATOS			TEMÁTICA				FORMULACIÓN DEL PROBLEMA FUNCIONES OBJETIVO				RESTRICCIONES DEL PROBLEMA			PROPUESTAS PARA RESOLVER EL PROBLEMA				SOLUCIÓN PROPUESTA									
	AÑO	TÍTULO DEL ARTÍCULO	REFERENCIA	CITAS	Pérdidas en líneas de transmisión	Despacho óptimo de generación	Estabilidad angular sistemas de potencia	Estabilidad de voltaje en sistemas de potencia	Flujo de potencia AC	Metodología para reducción de pérdidas en líneas de transmisión	Método de resolución para funciones no lineales	Límite de cargabilidad en líneas de transmisión	Evaluación de estabilidad en sistemas de transmisión eléctrica	Optimización de parámetros en líneas de transmisión	Análisis de efecto corona en parámetros de líneas de transmisión	Límites en despacho de potencia activa y reactiva	Límites de potencia activa y reactiva	Límites de potencia en demanda del sistema	Cálculo de pérdidas de potencia en líneas de transmisión	Nuevo despacho de potencia reactiva	Evaluación de límites de voltaje y potencia en sistemas de transmisión	Evaluación de límites estabilidad angular	Minimización de pérdidas en líneas de transmisión	Simulación de sistemas de potencia en software especializado	Análisis de estabilidad angular en sistemas de potencia	Análisis de estabilidad de voltaje en sistemas de potencia	Pérdidas en líneas de transmisión	
10	2019	Real power transmission loss minimization and bus voltage improvement using STATCOM	[15]	235	☒					☒	☒	☒			☒	☒	☒					☒						☒
11	2019	Calculation Method of Corona Loss of Transmission Line Based on AC/DC Power Flow	[23]	3					☒	☒					☒				☒					☒				☒
12	2019	Corona Loss of Transmission Line Based on AC	[24]	1					☒	☒					☒				☒									☒
13	2019	Energy losses reduction on power lines	[31]	16	☒					☒	☒	☒				☒	☒	☒					☒					☒
14	2019	Optimal preventive control of transient instabilities of rotor angles and nodal voltage magnitudes	[35]	78			☒						☒								☒	☒			☒			
15	2018	Corona discharge characteristics for conductors of HVDC transmission lines with different heights to ground	[25]	158	☒					☒		☒			☒				☒					☒				☒
16	2018	Real Loss Minimization in Power Systems via Recent Optimization Techniques	[39]	96	☒					☒	☒	☒				☒	☒	☒					☒					☒
17	2017	Analysis of power flow in long transmission lines	[6]	119					☒	☒	☒													☒				
18	2017	Corona investigation of an energized conductor under various weather conditions	[29]	11	☒					☒		☒			☒				☒									☒
19	2017	Cost optimization of a hybrid energy storage system using GAMS	[40]	4		☒					☒				☒				☒					☒				

MINIMIZACIÓN DE PÉRDIDAS EN REDES DE TRANSMISIÓN BASADO EN EL ANÁLISIS DE CAPACIDAD DE TRANSFERENCIA DE LAS LÍNEAS, MEDIANTE ÓPTIMOS FLUJOS DE POTENCIA

ITEM	DATOS			TEMÁTICA					FORMULACIÓN DEL PROBLEMA FUNCIONES OBJETIVO				RESTRICCIONES DEL PROBLEMA			PROPUESTAS PARA RESOLVER EL PROBLEMA				SOLUCIÓN PROPUESTA							
	AÑO	TÍTULO DEL ARTÍCULO	REFERENCIA	CITAS	Pérdidas en líneas de transmisión	Despacho óptimo de generación	Estabilidad angular sistemas de potencia	Estabilidad de voltaje en sistemas de potencia	Flujo de potencia AC	Metodología para reducción de pérdidas en líneas de transmisión	Método de resolución para funciones no lineales	Límite de cargabilidad en líneas de transmisión	Evaluación de estabilidad en sistemas de transmisión eléctrica	Optimización de parámetros en líneas de transmisión	Análisis de efecto corona en parámetros de líneas de transmisión	Límites en despacho de potencia activa y reactiva	Límites de potencia activa y reactiva	Límites de potencia en demanda del sistema	Cálculo de pérdidas de potencia en líneas de transmisión	Nuevo despacho de potencia reactiva	Evaluación de límites de voltaje y potencia en sistemas de transmisión	Evaluación de límites estabilidad angular	Minimización de pérdidas en líneas de transmisión	Simulación de sistemas de potencia en software especializado	Análisis de estabilidad angular en sistemas de potencia	Análisis de estabilidad de voltaje en sistemas de potencia	Pérdidas en líneas de transmisión
20	2016	Study of voltage and power stability margins of electrical power system using ANN	[7]	4				☒				☒				☒				☒	☒			☒	☒		
21	2016	Teaching and Learning based Optimization Applied to Optimization of Power Transmission Line Parameters	[16]	1					☒	☒						☒								☒			
22	2016	Optimal Power Flow with the Consideration of Flexible Transmission Line Impedance	[17]	18		☒			☒		☒				☒	☒	☒		☒								
23	2016	Reactive Power Optimization of the Electric System based on Minimization of Losses	[21]	7		☒			☒	☒	☒				☒	☒			☒			☒	☒				☒
24	2016	Simulation of corona space charge generated from the ±800kV UHVDC overhead transmission line in a thunderstorm	[26]	1	☒									☒													☒
25	2015	Optimal reactive power flow control for minimization of active power losses using Particle swarm Optimization	[14]	4	☒				☒	☒	☒				☒	☒			☒			☒	☒				☒
26	2015	Modeling and Transient analysis of Overhead Transmission Lines Considering Corona Phenomenon and Skin Effect	[28]	550					☒					☒		☒						☒					☒
27	2014	Determination of Transmission Limits on Electric Power Systems	[9]	2	☒						☒					☒				☒				☒			☒
28	2014	Overview Of Losses And Solutions In Power Transmission Lines	[11]	12	☒				☒		☒					☒						☒					☒

MINIMIZACIÓN DE PÉRDIDAS EN REDES DE TRANSMISIÓN BASADO EN EL ANÁLISIS DE CAPACIDAD DE TRANSFERENCIA DE LAS LÍNEAS, MEDIANTE ÓPTIMOS FLUJOS DE POTENCIA

ITEM	DATOS			TEMÁTICA				FORMULACIÓN DEL PROBLEMA FUNCIONES OBJETIVO				RESTRICCIONES DEL PROBLEMA			PROPUESTAS PARA RESOLVER EL PROBLEMA				SOLUCIÓN PROPUESTA										
	AÑO	TÍTULO DEL ARTÍCULO	REFERENCIA	CITAS	Pérdidas en líneas de transmisión	Despacho óptimo de generación	Estabilidad angular sistemas de potencia	Estabilidad de voltaje en sistemas de potencia	Flujo de potencia AC	Metodología para reducción de pérdidas en líneas de transmisión	Método de resolución para funciones no lineales	Límite de cargabilidad en líneas de transmisión	Evaluación de estabilidad en sistemas de transmisión eléctrica	Optimización de parámetros en líneas de transmisión	Análisis de efecto corona en parámetros de líneas de transmisión	Límites en despacho de potencia activa y reactiva	Límites de potencia activa y reactiva	Límites de potencia en demanda del sistema	Cálculo de pérdidas de potencia en líneas de transmisión	Nuevo despacho de potencia reactiva	Evaluación de límites de voltaje y potencia en sistemas de transmisión	Evaluación de límites estabilidad angular	Minimización de pérdidas en líneas de transmisión	Simulación de sistemas de potencia en software especializado	Análisis de estabilidad angular en sistemas de potencia	Análisis de estabilidad de voltaje en sistemas de potencia	Pérdidas en líneas de transmisión		
29	2014	Impact of wind generation on transient stability of electrical power systems	[37]	4			☒					☒			☒				☒		☒								
30	2012	AC conductors' corona-loss calculation and analysis in corona cage	[27]	31	☒				☒		☒				☒	☒		☒											☒
31	2011	Reactive power planning for transmission loss minimization	[13]	3		☒			☒	☒	☒				☒	☒			☒				☒	☒					☒
32	2010	Bidirectional branch and bound for controlled variable selection part III: Local average loss minimization	[20]	47	☒				☒	☒	☒				☒	☒	☒						☒						☒
33	2010	Bees algorithm technique for loss minimization in power transmission network using static var compensator	[22]	4	☒				☒	☒	☒				☒	☒			☒				☒	☒					☒
34	2010	Reactive power optimization of power system based on interior point method and branch-bound method	[19]	1			☒					☒			☒				☒		☒				☒				
35	2009	Classification of power system disturbances using support vector machines	[5]	77				☒				☒				☒				☒				☒			☒		
36	2006	Flexible Compact AC Transmission System a New Mode for Large-capacity and Long-distance Power Transmission	[3]	1					☒	☒						☒								☒					
37	2005	Minimization of transmission loss with consideration of transformer taps constraint	[12]	12	☒				☒	☒	☒				☒	☒			☒				☒	☒					☒
38	2005	Estimation of transmission loss coefficients from measurements	[32]	3	☒				☒	☒	☒				☒	☒			☒				☒	☒					☒

MINIMIZACIÓN DE PÉRDIDAS EN REDES DE TRANSMISIÓN BASADO EN EL ANÁLISIS DE CAPACIDAD DE TRANSFERENCIA DE LAS LÍNEAS, MEDIANTE ÓPTIMOS FLUJOS DE POTENCIA

DATOS			TEMÁTICA					FORMULACIÓN DEL PROBLEMA FUNCIONES OBJETIVO					RESTRICCIONES DEL PROBLEMA			PROPUESTAS PARA RESOLVER EL PROBLEMA				SOLUCIÓN PROPUESTA							
ITEM	AÑO	TÍTULO DEL ARTÍCULO	REFERENCIA	CITAS	Pérdidas en líneas de transmisión	Despacho óptimo de generación	Estabilidad angular sistemas de potencia	Estabilidad de voltaje en sistemas de potencia	Flujo de potencia AC	Metodología para reducción de pérdidas en líneas de transmisión	Método de resolución para funciones no lineales	Límite de cargabilidad en líneas de transmisión	Evaluación de estabilidad en sistemas de transmisión eléctrica	Optimización de parámetros en líneas de transmisión	Análisis de efecto corona en parámetros de líneas de transmisión	Límites en despacho de potencia activa y reactiva	Límites de potencia activa y reactiva	Límites de potencia en demanda del sistema	Cálculo de pérdidas de potencia en líneas de transmisión	Nuevo despacho de potencia reactiva	Evaluación de límites de voltaje y potencia en sistemas de transmisión	Evaluación de límites estabilidad angular	Minimización de pérdidas en líneas de transmisión	Simulación de sistemas de potencia en software especializado	Análisis de estabilidad angular en sistemas de potencia	Análisis de estabilidad de voltaje en sistemas de potencia	Pérdidas en líneas de transmisión
39	2004	Nonlinear dynamics, control, and stability analysis of power systems	[2]	2			☒					☒									☒	☒			☒	☒	
40	1996	On-line optimal reactive power flow by energy loss minimization	[33]	12	☒				☒	☒	☒				☒	☒			☒			☒	☒				☒
41	1991	Optimal power flow problem in ordinary systems	[18]	14				☒							☒	☒											
CANTIDAD:					19	4	5	7	6	24	15	22	11	2	8	17	31	5	7	12	10	8	16	17	10	7	25

8.2 Resumen de indicadores

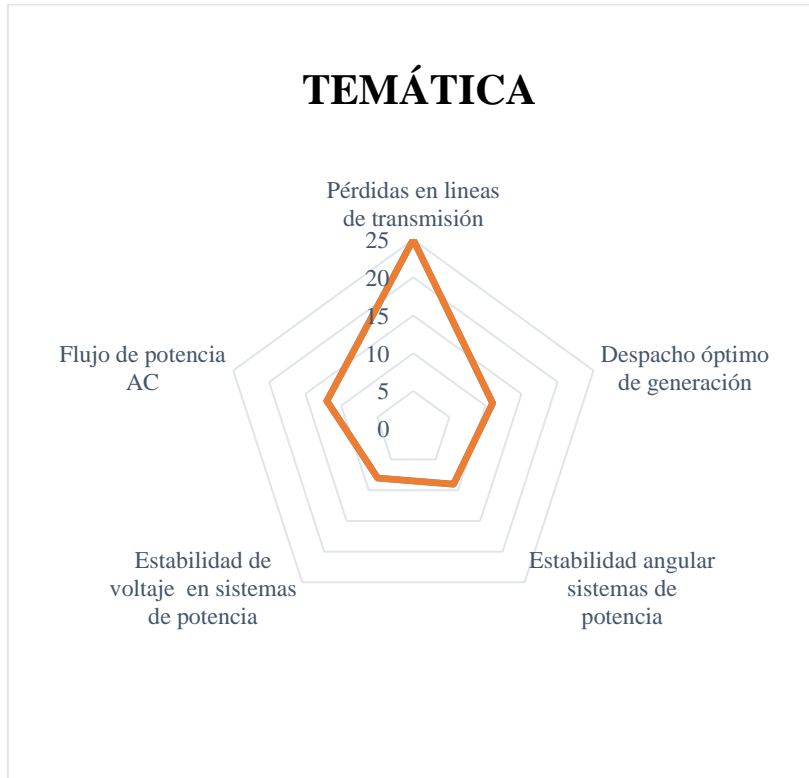


Figura 23: Indicador de la temática - Estado del arte.

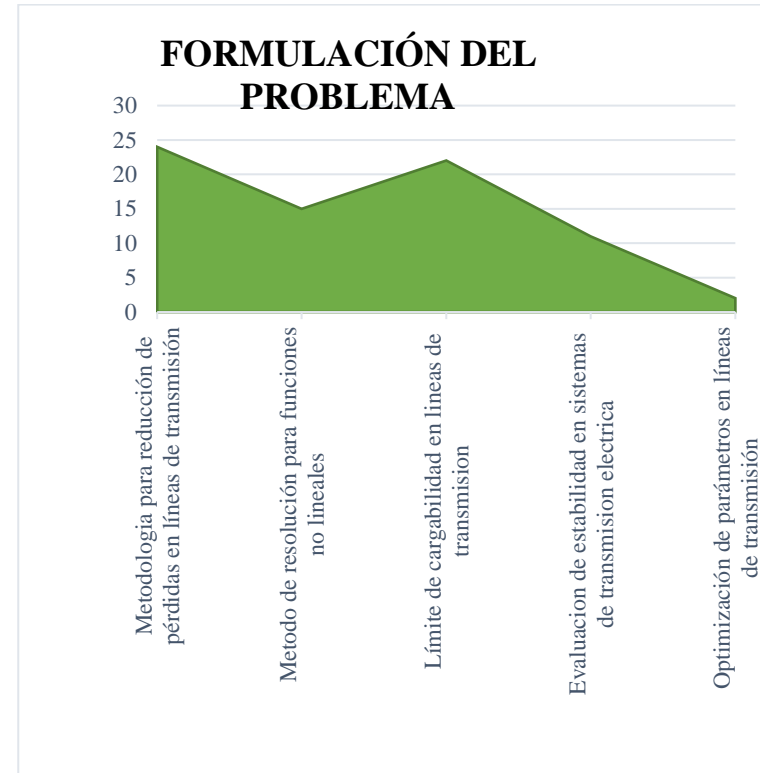


Figura 24: Indicador de formulación del problema - Estado del arte

SOLUCIÓN DADA MEDIANTE

- Minimización de pérdidas en líneas de transmisión
- Simulación de sistemas de potencia en software especializado
- Analisis de estabilidad angular en sistemas de potencia
- Analisis de estabilidad de voltaje en sistemas de potencia

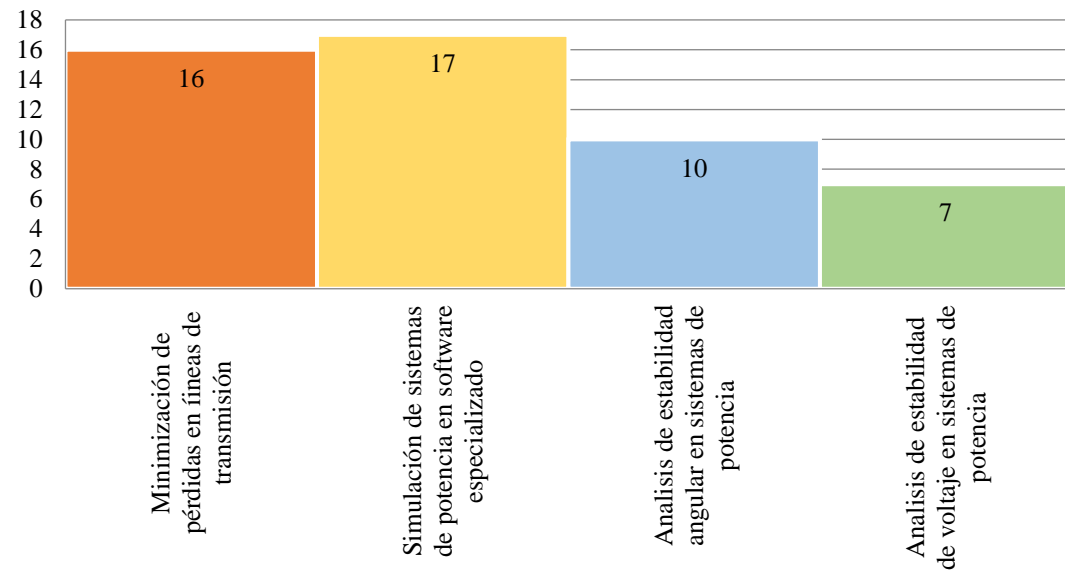


Figura 25: Indicador de solución - Estado del arte.

9 Anexos

Sistema de prueba 9 barras del IEEE.

Nº. Gen	Pmin [MW]	Pmax [MW]	Qmin [Mvar]	Qmax [Mvar]	a	b	c
1	10	250	-245.5	245.5	0.1100	5	150
2	10	300	-192	192	0.0850	1.2	600
3	10	270	-218	218	0.1224	1	270

Tabla 15: Datos técnico de potencia activa, reactiva y costo de generación de cada generador sistema de 9 barras

N. Línea	Barra Inicial	Barra Final	Impedancia Serie R[p.u]	X[p.u]	Susceptancia B[p.u]	Capacidad máxima [MVA]
1	4	5	0.0100	0.0850	0.0880	300
2	4	6	0.0170	0.0920	0.0790	300
3	5	7	0.0320	0.1610	0.1530	300
4	6	9	0.0390	0.1700	0.1790	300
5	7	8	0.0085	0.0720	0.0745	300
6	8	9	0.0119	0.1008	0.1045	300

Tabla 16: Datos técnico de línea de transmisión sistema de 9 barras.

Nº. Trafo	Barra Inicial	Barra Final	S [MVA]	HV [kV]	LV [kV]	X[p.u]
1	4	9	100	132.0	1.0	0.20912
2	4	9	100	132.0	33.0	0.55618
3	5	9	100	132.0	33.0	0.25202
4	7	9	100	11.0	1.0	0.17615
5	7	9	100	33.0	1.0	0.11001

Tabla 17: Datos técnico de transformadores sistema de 9 barras.

Nº. Barra	P[MW]	Q[Mvar]
1	0	0
2	0	0
3	0	0
4	0	0
5	125	50
6	90	30
7	0	0
8	100	35
9	0	0

Tabla 18: Datos de carga de cada barra sistema de 9 barras.

Análisis de efecto corona sistema de prueba 9 barras del IEEE.

Línea de transmisión	
Tipo de torre de transmisión	Retención trifásica
Nivel de voltaje	230 [kV]
Tipo de Circuito	Simple
Conductor	ACAR 1200
Diámetro externo del conductor	23.02 [mm]
Nº de conductores por fase	2
Radio medio geométrico (RMG)	1.601 [cm]
Distancia media geométrica (DMG)	75.595[cm]
Voltaje máximo de elevación (Vme)	264.5 [kV]

Tabla 19: Parámetros de línea de transmisión sistema de 9 barras.

Barra Inicial	Barra Final	Circuito	Voltaje [kV]	Voltaje Corona	Presencia de corona	Pérdidas Corona [W]
4	9	Simple	230	231.917	Sí	4181.858
4	9	Simple	230	231.917	Sí	4181.858
5	9	Simple	230	231.917	Sí	4181.858
7	9	Simple	230	231.917	Sí	4181.858
7	9	Simple	230	231.917	Sí	4181.858

Tabla 20: Cálculo con presencia de efecto corona sistema de 9 barras.

Barra Inicial	Barra Final	Circuito	Voltaje [kV]	Voltaje Corona	Presencia de corona	Pérdidas Corona [W]
4	9	Simple	230	476.795	No	0.00
4	9	Simple	230	476.795	No	0.00
5	9	Simple	230	476.795	No	0.00
7	9	Simple	230	476.795	No	0.00
7	9	Simple	230	476.795	No	0.00

Tabla 21: Cálculo sin presencia de efecto corona sistema de 9 barras.

Sistema de prueba 14 barras del IEEE.

Nº. Gen	Pmin [MW]	Pmax [MW]	Qmin [Mvar]	Qmax [Mvar]	a	b	c
1	50	500	0	10	0.0070	7	240
2	20	200	-40	50	0.0095	10	200
3	20	300	0	40	0.0090	8.5	220
4	20	150	-6	24	0.0090	11	200
5	20	200	-6	24	0.0080	10.5	220

Tabla 22: Datos técnico de potencia activa, reactiva y costo de generación de cada generado sistema de 14 barras.

N. Línea	Barra Inicial	Barra Final	Impedancia Serie		Susceptancia	Capacidad máxima
			R[p.u]	X[p.u]	B[p.u]	[MVA]
1	1	2	0.01938	0.05917	0.0528	200
2	1	5	0.05403	0.22304	0.0492	100
3	2	3	0.04699	0.19797	0.0438	100
4	2	4	0.05811	0.17632	0.034	100
5	2	5	0.05695	0.17388	0.0346	100
6	3	4	0.06701	0.17103	0.0128	50
7	4	5	0.01335	0.04211	0	100
8	4	7	0	0.20912	0	50
9	4	9	0	0.55618	0	50
10	5	6	0	0.25202	0	100
11	6	11	0.09498	0.1989	0	50
12	6	12	0.12291	0.25581	0	20
13	6	13	0.06615	0.13027	0	50
14	7	8	0	0.17615	0	50
15	7	9	0	0.11001	0	50
16	9	10	0.03181	0.0845	0	20
17	9	14	0.12711	0.27038	0	20
18	10	11	0.08205	0.19207	0	20
19	12	13	0.22092	0.19988	0	20
20	13	14	0.17093	0.34802	0	20

Tabla 23: Datos técnico de línea de transmisión sistema de 14 barras.

N°. Trafo	Barra Inicial	Barra Final	S [MVA]	HV [kV]	LV [kV]	X[p.u]
1	4	9	100	132.0	1.0	0.20912
2	4	9	100	132.0	33.0	0.55618
3	5	9	100	132.0	33.0	0.25202
4	7	9	100	11.0	1.0	0.17615
5	7	9	100	33.0	1.0	0.11001

Tabla 24: Datos técnico de transformadores sistema de 14 barras.

N°. Barra	P[MW]	Q[Mvar]
1	0.00	0.00
2	21.7	12.7
3	94.2	19.0
4	47.8	-3.9
5	7.60	1-60
6	11.2	7.50
7	0.00	0.00
8	0.00	0.00
9	29.5	16.6
10	9.00	5.80
11	3.50	1.80
12	6.10	1.60
13	13.5	5.80
14	14.9	5.00

Tabla 25: Datos de carga de cada barra sistema de 14 barras.

Análisis de efecto corona sistema de prueba 14 barras del IEEE.

Línea de transmisión 132 [kV]	
Tipo de torre de transmisión	Retención trifásica
Nivel de voltaje	132 [kV]
Tipo de Circuito	Simple
Conductor	ACAR CONDOR 795
Diámetro externo del conductor	27.72 [mm]
N° de conductores por fase	1
Radio medio geométrico (RMG)	1.386 [cm]
Distancia media geométrica (DMG)	57.53 [cm]
Voltaje máximo de elevación (Vme)	151.8 [kV]

Tabla 26: Parámetros de línea de transmisión circuito simple sistema de 14 barras para 132 [kV].

Línea de transmisión 132 [kV]	
Tipo de torre de transmisión	Retención trifásica
Nivel de voltaje	132 [kV]
Tipo de Circuito	Doble
Conductor	ACAR CONDOR 795
Diámetro externo del conductor	27.72 [mm]
N° de conductores por fase	1
Radio medio geométrico (RMG)	1.386 [cm]
Distancia media geométrica (DMG)	42.20 [cm]
Voltaje máximo de elevación (Vme)	151.8 [kV]

Tabla 27: Parámetros de línea de transmisión circuito Doble sistema de 14 barras para 132 [kV].

Barra Inicial	Barra Final	Circuito	Voltaje [kV]	Voltaje Corona [kV]	Presencia de corona	Pérdidas Corona [W]
1	2	Doble	132	138.681	Sí	2263.013
1	5	Simple	132	151.254	Sí	2641.061
2	3	Simple	132	151.254	Sí	2641.061
2	4	Simple	132	151.254	Sí	2641.061
2	5	Simple	132	151.254	Sí	2641.061
3	4	Simple	132	151.254	Sí	2641.061

Tabla 28: Cálculo con presencia de efecto corona sistema de 14 barras para 132 [kV].

Barra Inicial	Barra Final	Circuito	Voltaje [kV]	Voltaje Corona [kV]	Presencia de corona	Pérdidas Corona [W]
1	2	Doble	132	365.804	No	0.00
1	5	Simple	132	398.969	No	0.00
2	3	Simple	132	398.969	No	0.00
2	4	Simple	132	398.969	No	0.00
2	5	Simple	132	398.969	No	0.00

Tabla 29: Cálculo sin presencia de efecto corona sistema de 14 barras para 132 [kV].

Línea de transmisión 33 [kV]	
Tipo de torre de transmisión	Retención trifásica
Nivel de voltaje	33 [kV]
Tipo de Circuito	Simple
Conductor	AWG 2/0
Diámetro externo del conductor	10.7 [mm]
Nº de conductores por fase	1
Radio medio geométrico (RMG)	5.35 [cm]
Distancia media geométrica (DMG)	226.03 [cm]
Voltaje máximo de elevación (Vme)	37.95 [kV]

Tabla 30: Parámetros de línea de transmisión sistema de 14 barras para 33 [kV].

Barra Inicial	Barra Final	Circuito	Voltaje [kV]	Voltaje Corona [kV]	Presencia de corona	Pérdidas Corona [W]
6	11	Simple	33	35.751	Sí	121.009
6	12	Simple	33	35.751	Sí	121.009
6	13	Simple	33	35.751	Sí	121.009
9	10	Simple	33	35.751	Sí	121.009
9	14	Simple	33	35.751	Sí	121.009
10	11	Simple	33	35.751	Sí	121.009

Tabla 31: Cálculo con presencia de efecto corona sistema de 14 barras para 33 [kV].

Barra Inicial	Barra Final	Circuito	Voltaje [kV]	Voltaje Corona [kV]	Presencia de corona	Pérdidas Corona [W]
6	11	Simple	33	249.906	No	0.00
6	12	Simple	33	249.906	No	0.00
6	13	Simple	33	249.906	No	0.00
9	10	Simple	33	249.906	No	0.00
9	14	Simple	33	249.906	No	0.00
10	11	Simple	33	249.906	No	0.00

Tabla 32: Cálculo sin presencia de efecto corona sistema de 14 barras para 33 [kV]