

**ESTABILIDAD DE VOLTAJE EN SISTEMAS ELÉCTRICOS DE POTENCIA
INCLUYENDO CURVAS DE CAPACIDAD PARA LÍNEAS DE TRANSMISIÓN
BASADO EN EL MÉTODO CPF**

**UNIVERSIDAD POLITÉCNICA SALESIANA
SEDE QUITO**

**CARRERA:
INGENIERÍA ELÉCTRICA**

**Trabajo de titulación previo a la obtención del título de
INGENIERO ELÉCTRICO**

**TEMA:
ESTABILIDAD DE VOLTAJE EN SISTEMAS ELÉCTRICOS DE POTENCIA
INCLUYENDO CURVAS DE CAPACIDAD PARA LÍNEAS DE TRANSMISIÓN
BASADO EN EL MÉTODO CPF**

**AUTOR:
DANIEL ALEJANDRO SÁNCHEZ SALAZAR**

**DIRECTOR:
CARLOS ANDRÉS BARRERA SINGAÑA**

Quito, Julio 2018

Daniel Alejandro Sánchez Salazar

**ESTABILIDAD DE VOLTAJE EN SISTEMAS ELÉCTRICOS DE POTENCIA
INCLUYENDO CURVAS DE CAPACIDAD PARA LÍNEAS DE TRANSMISIÓN
BASADO EN EL MÉTODO CPF**

Universidad Politécnica Salesiana, Quito – Ecuador 2018

Ingeniería Eléctrica

Breve reseña histórica e información de contacto.



Daniel Alejandro Sánchez Salazar (Y'1994 – M'09). Realizó sus estudios de nivel secundario en el Colegio “Luciano Andrade Marín” de la ciudad de Quito. Egresado de Ingeniería Eléctrica de la Universidad Politécnica Salesiana. Su trabajo se basa en el estudio de estabilidad de voltaje en sistemas de transmisión eléctrica.
dsanchez@est.ups.edu.ec

Dirigido por:



Carlos Andrés Barrera Singaña (Y'1989). Realizó sus estudios superiores en la Escuela Politécnica Nacional de Quito, donde se graduó de Ingeniero Eléctrico en Octubre de 2013. Además, cursó estudios de posgrado en la Universidad de Zaragoza, España, donde obtuvo el título en Máster en Energías Renovables y Eficiencia Energética con Especialidad en Sistemas Eléctricos. Actualmente es profesor ocasional a tiempo completo de la Universidad Politécnica Salesiana.
cbarrera@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


©2018 Universidad Politécnica Salesiana

QUITO - ECUADOR

DECLARATORIA DE COAUTORÍA DEL DOCENTE TUTOR

Yo, Carlos Andrés Barrera Singaña declaro que bajo mi dirección y asesoría fue desarrollado el trabajo de titulación “*ESTABILIDAD DE VOLTAJE EN SISTEMAS ELÉCTRICOS DE POTENCIA INCLUYENDO CURVAS DE CAPACIDAD PARA LÍNEAS DE TRANSMISIÓN BASADO EN EL MÉTODO CPF*” realizado por Daniel Alejandro Sánchez Salazar, obteniendo un producto que cumple con todos los requisitos estipulados por la Universidad Politécnica Salesiana para ser considerados como trabajo final de titulación.

Quito, Julio de 2018



.....
Carlos Andrés Barrera Singaña

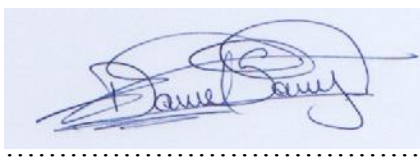
C.C.: 0503503336

CESIÓN DE DERECHOS DE AUTOR

Yo, Daniel Alejandro Sánchez Salazar, con documento de identificación N° 1600621500, manifiesto mi voluntad y cedo a la Universidad Politécnica Salesiana la titularidad sobre los derechos patrimoniales en virtud de que soy autora del trabajo de grado/titulación intitulado: “*ESTABILIDAD DE VOLTAJE EN SISTEMAS ELÉCTRICOS DE POTENCIA INCLUYENDO CURVAS DE CAPACIDAD PARA LÍNEAS DE TRANSMISIÓN BASADO EN EL MÉTODO CPF*”, mismo que 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 aplicación a lo determinado en la Ley de Propiedad Intelectual, en mi condición de autor me reservo los derechos morales de la obra antes citada. En concordancia, suscribo este documento en el momento que hago entrega del trabajo final en formato impreso y digital a la Biblioteca de la Universidad Politécnica Salesiana.

Quito, Julio de 2018

A handwritten signature in blue ink, appearing to read 'Daniel Sanchez', is shown within a light blue rectangular box. Below the box is a horizontal dotted line.

Daniel Alejandro Sánchez Salazar

C.C.: 1600621500

1. ÍNDICE GENERAL

1	Introducción	2
2	Marco teórico	4
2.1	Estabilidad de Sistemas Eléctricos de Potencia	4
2.2	Estabilidad de Voltaje	4
2.2.1	De corto plazo	4
2.2.2	De largo plazo	4
2.3	Curvas de Capacidad de Líneas de Transmisión.....	5
3	Modelación.....	6
3.1	Método CPF	7
3.2	Modelación matemática	7
3.2.1	Paso de predicción.....	7
3.2.2	Paso de Corrección.....	8
4	Implementación del modelo matemático	9
4.1	Sistema propuesto para estudio de estabilidad.....	9
4.2	Modelo para estudio de estabilidad.....	9
5	Análisis de resultados.....	10
5.1	Caso de Estudio.....	11
5.1.1	Resultados barra 28	11
5.1.2	Resultados barra 19	12
6	Conclusiones	12
6.1	Trabajos futuros	13
7	Referencias.....	13
7.1	Matriz de Estado del Arte	16
7.2	Resumen de Indicadores	18
8	Anexos	20

2. ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1. Estudio de estabilidad de voltaje aplicado al sistema de transmisión.	3
Figura 2. Sistema de potencia básico [28].	5
Figura 3. Curva de Capacidad de LT [26].....	6
Figura 4. Esquema del método de continuación [30].....	7
Figura 5. Pasos de Predicción-Corrección [30].....	8
Figura 6. Intersección perpendicular [30].	8
Figura 7. Sistema IEEE de 39 barras [31].....	9
Figura 8. Curva de Estabilidad de Voltaje.	10
Figura 9. Curva de Capacidad de Líneas de Transmisión.....	11
Figura 10. Barra de paso.	11
Figura 11. Barra tipo radial.	11
Figura 12. Análisis de estabilidad en la barra 28.	11
Figura 13. Curva de Capacidad de línea de transmisión 26-28.....	12
Figura 14. Curva de Capacidad de línea de transmisión 28-29.....	12
Figura 15. Análisis de estabilidad en barra 19.	12
Figura 16. Curva de Capacidad de línea de transmisión 16-19.....	12
Figura 17. Resumen e indicador de la temática - Estado del arte	18
Figura 18. Indicador de formulación del problema - Estado del arte.....	19
Figura 19. Indicador de solución - Estado del arte	19

3. ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1. Matriz de estado del arte.	16
Tabla 2. Datos del Sistema IEEE de 39 barras.....	20
Tabla 3. Datos de líneas del sistema IEEE de 39 barras.	21

ESTABILIDAD DE VOLTAJE EN SISTEMAS ELÉCTRICOS DE POTENCIA INCLUYENDO CURVAS DE CAPACIDAD PARA LÍNEAS DE TRANSMISIÓN BASADO EN EL MÉTODO CPF

Resumen

El presente documento se muestra un modelo para el estudio de estabilidad de voltaje en sistemas de transmisión incluyendo las curvas de capacidad de las líneas asociadas a la barra de estudio. Este documento hace referencia al método de flujos de potencia continuados (CPF), basado en el algoritmo de Predicción-Corrección, el cual a determina mediante soluciones sucesivas el punto de voltaje crítico de operación de cada barra del sistema; además, se puede observar el incremento del flujo de potencia por las líneas asociadas a la barra de estudio debido a una variación de potencia de carga con la finalidad de determinar si la potencia transportada se encuentra dentro del límite de operación segura de la línea asociada a la barra.

Palabras Clave: Curvas P-V, Estabilidad de Voltaje, Flujos de Potencia Continuados, Líneas de Transmisión, Sistema de Potencia.

Abstract

This document shows a model for the study of voltage stability in the transmission system including the capacity curves of the lines associated with the study bus. This document refers to the method of continuation power flow (CPF), based on the Prediction-Correction algorithm, which will help us determine through successive solutions the point of critical operation voltage of each bus of the system, in addition it will be possible to observe the increase of the power flow by the lines associated to the study bus due to a variation of load power in order to determine if the power transported is within the limit of safe operation of the line associated with the bus.

Keywords: P-V Curves, Voltage Stability, Continuation Power Flows, Transmission Lines, Power System.

1 Introducción

El sistema de transmisión de energía eléctrica es conocido por ser una de las infraestructuras más críticas de todo el sistema eléctrico. Debido a su naturaleza robusta y compleja puede ser susceptible a fallos o perturbaciones, siendo de mayor importancia aquellas que desembocan en la inestabilidad de voltaje [1].

El sistema de transmisión se encuentra conformado en su mayor parte por líneas de transmisión de tipo aéreas, las cuales se clasifican en función de su longitud que pueden ser cortas, medias o largas [2]. Las líneas de transmisión son las encargadas de transportar la energía eléctrica desde las zonas de generación hasta los centros de consumo [3]. Siendo las líneas de transmisión el principal medio para la transferencia de energía entre dos puntos de la red. La capacidad de carga de cada línea no debe ser llevada a niveles de sobrecarga, la cual en lo posterior puede derivar en un colapso del sistema eléctrico; monitorear el nivel de carga de un elemento de transmisión es un indicativo de eventuales contingencias, este motivo hace que la presente investigación se incluyan las curvas de capacidad en las líneas de transmisión [4][5].

Uno de los principales factores que genera el fenómeno de inestabilidad de voltaje es la variación de la potencia de demanda, dicha variación provoca que los niveles de voltaje en las barras del sistema incrementen o desciendan a valores fuera del rango normal de operación, y de no ser controlada a tiempo puede ocasionar el colapso de voltaje de la red [6]. El colapso de voltaje es un proceso en el cual una secuencia de eventos conduce a la aparición de voltajes bajos en lugares específicos de la red de transmisión [1][6].

La inestabilidad de voltaje generalmente acarrea consecuencias más perjudiciales al sistema eléctrico, una de ellas es la debilitación del sistema, pues producto de la variación de voltaje ocurren variaciones en los flujos de potencia por las líneas, variaciones de corrientes, cambios en el nivel de frecuencia, y en casos más extremos puede incluso desembocar en un blackout del sistema eléctrico [7] [8]. Los sistemas de transmisión en los que debido a su estructura o ruta de servicio están compuestos por líneas de transmisión largas, presentan un alto índice de presencia de inestabilidad de voltaje, estos han sido la mayor preocupación para los operadores del sistema, pues deben estar preparados ante cualquier aparición de inestabilidad de voltaje y poder solucionarla de la manera más rápida posible previniendo una posible sucesión de fallas en la red eléctrica [9].

El fenómeno de inestabilidad de voltaje se caracteriza en general por una disminución gradual en el perfil de voltaje en las barras del sistema, y continua hasta que el perfil de voltaje del sistema disminuye rápidamente hasta el punto de colapso [10][11].

Una de las consecuencias más perjudiciales tanto para las personas como para el sistema es la posible ocurrencia de pérdida total de energía eléctrica (blackout) [12][13]. Si bien es cierto el estudio del fenómeno de colapso de voltaje no es algo nuevo, resulta bastante conveniente sea tomado en cuenta, pues como se puede apreciar en [13], realizar un monitoreo del sistema permite prevenir posibles ocurrencias de blackouts, no obstante todavía existe la necesidad en cuanto al desarrollo e investigación de métodos de estudio de estabilidad, tal como se muestra en [9][14].

La mayoría de los autores que realizan investigación acerca de la estabilidad de voltaje aplican técnicas basadas en métodos convencionales, como puede ser el caso de: flujos de potencia continuados, análisis modal del Jacobiano, análisis de sensibilidad de curvas P-V, curvas Q-V, y el uso de los índices de estabilidad de voltajes. Estos se encuentran entre los métodos de estudio más utilizados por los autores de estabilidad de voltaje para sistemas de potencia [15][16].

En este artículo se enfoca en analizar la estabilidad de voltaje mediante el método de flujos de potencia continuados (CPF) o llamado también Método de

Continuación, con el detalle de incluir las curvas de capacidad de líneas de transmisión, lo cual permite apreciar gráficamente el punto de colapso por voltaje de una barra específica del sistema de transmisión, además de poder observar cómo se incrementa los niveles de potencia que fluyen por medio de las líneas de transmisión conectadas a la barra de análisis. La implementación del modelo CPF, se basa en los métodos de Newton Raphson, Predicción-Corrección; además del estudio de cargabilidad de líneas de transmisión mediante las curvas de Saint Clair [2][17][18][19].

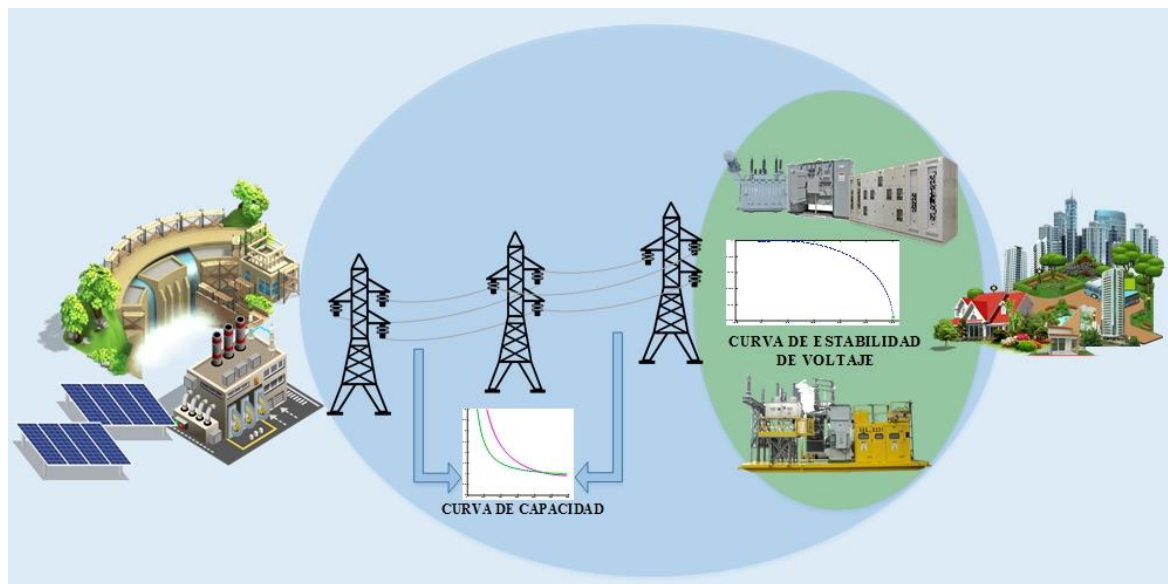


Figura 1. Estudio de estabilidad de voltaje aplicado al sistema de transmisión.

En el presente artículo se considera la implementación del sistema de prueba IEEE de 39 barras como modelo de sistema de transmisión. El análisis de estabilidad se realiza considerando una caída de voltaje máxima de 5%, y un margen de estabilidad en estado estable del 30%.

La estructura del presente documento es la listada a continuación: Sección I: introducción y antecedentes relacionados

al estudio de estabilidad de voltaje. Sección II: marco teórico relacionado al de concepto de estabilidad de voltaje y cargabilidad en líneas de transmisión. Sección III: modelado matemático del modelo CPF. Sección IV: planteamiento del problema. Sección V: análisis de resultados. Sección VI: conclusiones y trabajos futuros. Sección VII: referencias y anexos.

2 Marco teórico

2.1 Estabilidad de Sistemas Eléctricos de Potencia

En los últimos años el análisis de la estabilidad de voltaje se ha visto involucrado en diversas áreas del sistema, generación, transmisión y distribución, se realizan estudios de estabilidad de voltaje con la finalidad de mejorar la robustez del sistema, además de obtener mediante simulaciones los límites de operación segura de líneas de transmisión y barras del sistema, pues un fallo que provoque inestabilidad de voltaje podría acarrear riesgos aún mayores como el colapso total del sistema [7][20].

El estudio de la estabilidad de voltaje y la prevención del mismo, no solo sirve como método de evaluación del sistema, si no que permite al investigador u operador conocer los límites máximos y mínimos de operación del sistema, es decir, permite conocer el punto mínimo de voltaje antes de su colapso, logrando así convertirse en una herramienta preciada para los encargados en conducir los destinos diarios de un sistema de potencia [21][22].

2.2 Estabilidad de Voltaje

La estabilidad de voltaje para sistemas eléctricos de potencia (SEP), se encuentra definida por el IEEE o CIGRÉ como: La aptitud que posee un SEP para lograr mantener los voltajes a un nivel de estado estable en cada una de las barras del sistema después de que el SEP haya sido expuesto a un disturbio o perturbación desde una condición inicial específica. Es decir que la estabilidad de voltaje es la habilidad que posee el SEP para mantener los niveles de voltaje en todas las barras de la red dentro de los niveles normales de operación, ya sea por aumento de carga o por posibles contingencias [6].

La inestabilidad puede resultar en una caída progresiva de voltaje en las barras del sistema. Uno de las posibles causas que pueden provocar inestabilidad de voltaje en un sistema de potencia son aquellos elementos que provoquen una respuesta lenta en el sistema, por ejemplo, el funcionamiento de transformadores con tap bajo carga (OLTC), limitadores de corriente de las unidades generadoras, desconexiones forzadas de líneas de transmisión, incrementos o disminución de la potencia de carga [6].

En recientes estudios se ha logrado demostrar que la inclusión de nuevas tecnologías ambientalmente amigables puede influir de manera tanto positiva como negativa en la estabilidad general y de voltaje de un sistema de potencia [8][23]. El margen de estabilidad de voltaje se relaciona también con el margen de cargabilidad, dicho margen de cargabilidad se refiere a la máxima potencia que puede ser transportada por las líneas desde las unidades de generación hacia las cargas sin violar los límites máximos de operación, o sin causar colapsos de voltaje en el sistema [8].

2.2.1 De corto plazo

La estabilidad de voltaje de corto plazo se refiere a estudiar el impacto causado por elementos eléctricos en la red, dichos elementos consisten especialmente en motores eléctricos, sincronización de generadores u otros elementos con la red eléctrica. Este tipo de actividades causan una variación en el nivel de voltaje en régimen transitorio, lo cual está fuera del alcance de este trabajo [24].

2.2.2 De largo plazo

El estudio de estabilidad de voltaje de largo plazo puede ser realizado bajo diversos métodos de estudio, los más

usados son el análisis por curvas P-V ó curvas Q-V. En el primer caso es de interés, pues el método planteado en este artículo está relacionado con el análisis de curvas P-V. Este método permite observar el comportamiento del voltaje en una barra del sistema mientras la carga varía, es decir que al incrementar el porcentaje de carga en una barra del sistema gráficamente se puede inferir el comportamiento del voltaje hasta llegar al punto crítico de operación [23][25].

2.3 Curvas de Capacidad de Líneas de Transmisión

Uno de los parámetros de investigación propuestos, son las llamadas curvas de capacidad (cargabilidad) o curvas de Saint Clair de líneas de transmisión, en [4] se define la cargabilidad de las líneas de transmisión como: el límite de potencia que puede circular por una línea de transmisión en función de su longitud, y otros parámetros propios de cada línea tales como resistencia, reactancia, corriente de límite térmico, voltaje de operación, entre otros.

Entonces se puede decir que la cargabilidad está definida como: la potencia máxima entregada en el terminal de recepción del sistema de transmisión y expresada en por unidad del SIL propio de la línea. Cuando se realizan las gráficas de margen de estabilidad y caída de voltaje en función de la longitud de la línea de transmisión, se encuentra la curva de capacidad característica para líneas de transmisión, tal y como se muestra en la Figura 3, la envolvente de las curvas por caída máxima de voltaje y margen de estabilidad es la que define el límite de carga máximo de líneas de transmisión en función de su longitud. No se considera el límite térmico de transmisión, pues este es relevante únicamente para líneas cortas y cuyos voltajes de operación son inferiores

a los 138 kV. El límite térmico es relevante especialmente para el área de subtransmisión y distribución [4][26][27].

El primer paso para obtener las curvas de capacidad es calcular los límites de estabilidad de líneas de transmisión, es partir desde la forma básica del sistema de eléctrico de potencia [28], como el que es mostrado en la Figura 2.

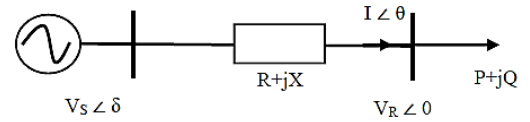


Figura 2. Sistema de potencia básico [28].

El primer límite considerado es el límite de estabilidad de voltaje, el cual se obtiene de resolver el flujo de potencia.

$$V_R * I^* = P + jQ \quad (1)$$

$$I = \frac{P - jQ}{V_R} \quad (2)$$

$$V_S = V_R + \left(\frac{P - jQ}{V_R}\right)jX = \left(V_R + \frac{QX}{V_R}\right) + j\left(\frac{PX}{V_R}\right) \quad (3)$$

Calculo de la magnitud de voltaje de envío.

$$V_S^2 = \left(V_R + \frac{QX}{V_R}\right)^2 + \left(\frac{PX}{V_R}\right)^2 \quad (4)$$

Asumiendo que el factor de potencia es igual a 1, y por lo tanto no existe flujo de potencia reactiva en el sistema:

$$P = \frac{\sqrt{V_S^2 - V_R^2}}{X} V_R \quad (5)$$

Donde:

V_S Voltaje de envío.

V_R Voltaje de recepción.

I Flujo de corriente por la línea de transmisión.

- R Valor de resistencia de la línea de transmisión.
- X Valor de reactancia de la línea de transmisión.
- P Potencia de carga activa.
- Q Potencia de carga reactiva.

Entonces la máxima potencia transferida por límite de estabilidad de voltaje está definido por la ecuación (6):

$$P_{V_stab_max} = \frac{V_S^2}{2X} \quad (6)$$

Donde $P_{V_stab_max}$ es la máxima potencia transferida por límite de estabilidad de voltaje.

Para incluir el margen de seguridad en [28] se asume una caída máxima de voltaje de 5%.

$$P_{V_stab} = 0.95 * \frac{V_S^2}{2X} \quad (7)$$

Donde P_{V_stab} es la potencia transferida usando el margen de estabilidad del 5%.

El segundo límite considerado es por estabilidad angular, el cual se basa en la máxima capacidad de transferencia de potencia.

$$P_{AS} = \frac{V_S^2}{X} \sin(\theta) \quad (8)$$

Donde P_{AS} corresponde a la potencia transferida usando el criterio de estabilidad angular y θ es el ángulo correspondiente al voltaje de envío final. La máxima potencia que se puede transferir ocurre cuando $\theta = 90^\circ$. En la curva de cargabilidad original se utiliza un margen de seguridad del 30%, lo que corresponde a un ángulo de 44° . Para el presente artículo se han efectuado las mismas consideraciones [28].

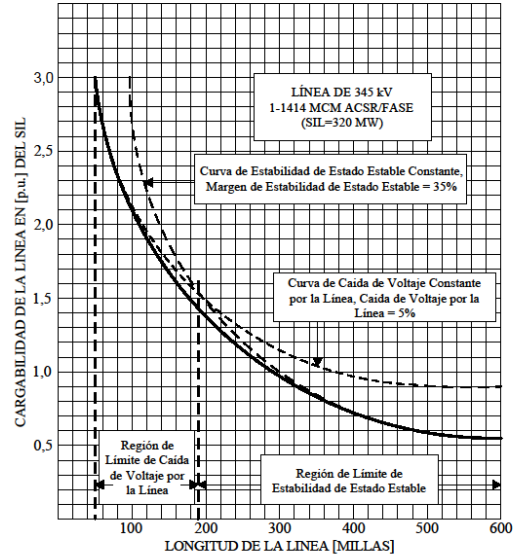


Figura 3. Curva de Capacidad de LT [26].

3 Modelación

Para realizar un estudio de estabilidad de voltaje en un sistema transmisión, primero debe realizarse la simulación de flujos de potencia mediante la aplicación del método de Newton Raphson, esto con la finalidad de obtener los valores de voltajes, corrientes y potencias el sistema [17]. Para complementar el proceso de estudio es necesario combinar el método de Newton Raphson con el método CPF para obtener la curva de estabilidad voltaje de cada una de las barras del sistema [18].

Asimismo de realizar la combinación de estos dos métodos matemáticos, se incluye el modelo matemático que permite trazar curvas de capacidad de líneas de transmisión., con el propósito de evaluar las condiciones de colapso del sistema, ya sea que colapse debido a potencia transportada a través de las líneas, o en su defecto colapse debido a niveles de voltaje inaceptables [2].

3.1 Método CPF

Este método usa un algoritmo predictor-corrector para hallar los puntos sucesivos en los que decrece el voltaje hasta llegar al punto de colapso, permitiendo obtener como resultado la gráfica conocida como curva de la nariz [19].

Partiendo de una solución inicial que es conocida, se traza una tangente predictora para lograr una estimación de la siguiente solución. Luego toma lugar el paso corrector, este será el encargado de hallar la solución exacta, es decir, encuentra el punto correcto en base a la predicción realizada en el paso de predicción [4][27].

El método de continuación es un algoritmo empleado para obtener las gráficas P-V de un sistema de potencia, este método presenta una ventaja en cuanto a tiempo de resolución, pues es capaz de obtener las curvas P-V del sistema de potencia, en un tiempo menor que métodos de flujos de potencia como: Newton Raphson o su variación llamada Newton Raphson Desacoplado Rápido [27][29].

3.2 Modelación matemática

Considerando la inyección de potencia en una barra, se tiene que para cualquier i -ésima barra del SEP:

$$P_i = \sum_{j=1}^n V_i (G_{ij} \cos(\theta_{ij}) + B_{ij} \sin(\theta_{ij})) V_j \quad (9)$$

$$Q_i = \sum_{j=1}^n V_i (G_{ij} \sin(\theta_{ij}) - B_{ij} \cos(\theta_{ij})) V_j \quad (10)$$

$$P_i = P_{Gi} - P_{Di} \quad (11)$$

$$Q_i = Q_{Gi} - Q_{Di} \quad (12)$$

Denominando a G como parámetro de generación y a D como parámetro de demanda, se denomina a λ (lambda) como

parámetro de variación de carga y se introduce en la ecuación (13) y (14).

$$\Delta P = P^{\text{especificado}} + \lambda P_D - P^{\text{calculado}} \quad (13)$$

$$\Delta Q = Q^{\text{especificado}} + \lambda Q_D - Q^{\text{calculado}} \quad (14)$$

Al sustituir las expresiones anteriores en las ecuaciones (11) y (12), los sistemas de ecuaciones toman la siguiente manera:

$$F(\theta, V, \lambda) = 0 \quad (15)$$

Donde:

θ Vector de ángulos de las barras de voltaje.

V Vector de magnitudes de voltaje en las barras.

λ Parámetro de variación de carga. La solución inicial para $\lambda = 0$ es hallada mediante flujo de potencia, luego se emplean los pasos de predicción y corrección.

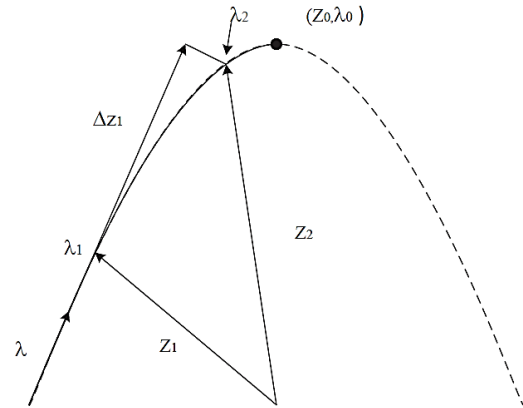


Figura 4. Esquema del método de continuación [30].

3.2.1 Paso de predicción.

Partiendo desde una condición inicial de equilibrio (z_1, λ_1) para obtener un vector de variables de estado denominado Δz , además de obtener el parámetro de continuación denominado $\Delta \lambda$. Partiendo entonces desde el punto $F(z_1, \lambda_1) = 0$, obtenemos que:

$$\frac{\partial F}{\partial \lambda} d\lambda + \frac{\partial F}{\partial z} dz = F(z_1, \lambda_1) = 0 \quad (16)$$

$$\frac{dz}{d\lambda} * \frac{dF}{dz} = - \frac{\partial F}{\partial \lambda} \quad (17)$$

Obteniendo el vector tangente predictor:

$$\frac{dz}{d\lambda} = - \left(\frac{\partial F}{\partial z} \right)^{-1} * \frac{\partial F}{\partial \lambda} = \frac{\Delta F}{\Delta \lambda} \quad (18)$$

Se obtiene el vector de variables de estado:

$$\Delta z = \Delta \lambda \frac{dz}{d\lambda} \quad (19)$$

Normalizando el parámetro de continuación, se obtiene la ecuación para el parámetro de continuación:

$$\Delta \lambda = \frac{k}{\left\| \frac{dz}{d\lambda} \right\|} \quad (20)$$

El parámetro k representa el tamaño asignado al paso de predicción. Se inicia el proceso de cálculo desde el punto $(z_1 + \Delta z_1, \lambda_1 + \Delta \lambda_1)$, luego mediante la normalización de la ecuación (20) se logra reducir el tamaño del paso de predicción a medida que se aproxima al punto de colapso. Posteriormente son recalculados los valores de potencia activa y reactiva [18][30].

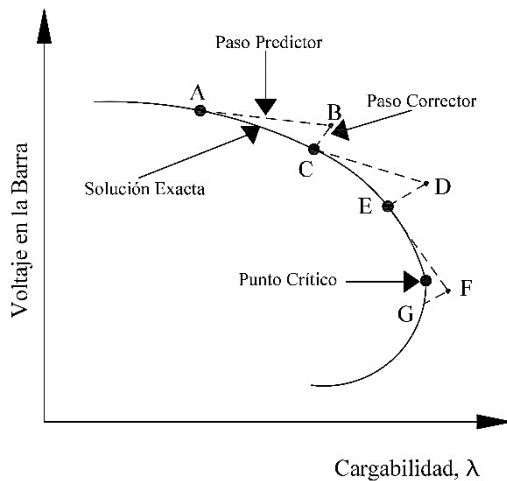


Figura 5. Pasos de Predicción-Corrección [30].

3.2.2 Paso de Corrección.

En este paso se calcula el punto siguiente (z_2, λ_2) , a partir de la suposición inicial obtenida en el paso de predicción $(z_1 + \Delta z_1, \lambda_1 + \Delta \lambda_1)$, los valores del siguiente punto se obtienen al resolver las ecuaciones:

$$F(z, \lambda) = 0 \quad (21)$$

$$\rho(z, \lambda) = 0 \quad (22)$$

La ecuación (21) describe a la singularidad del Jacobiano en el punto de colapso de voltaje, mientras que la ecuación (22) permite obviar dicha singularidad. Entonces se tiene que, para cada barra de la red:

$$\begin{bmatrix} D_z F & \frac{\partial F}{\partial \lambda} \\ D_z \rho & \frac{\partial \rho}{\partial \lambda} \end{bmatrix}_{(n+1) \times (m+1)} \quad (23)$$

Dos diferentes condiciones de fase ρ son usadas en el estudio de estabilidad de voltaje. El vector perpendicular a Δz_1 , el cual inicia en $(z_1 + \Delta z_1, \lambda_1 + \Delta \lambda_1)$ e intersecta la bifurcación en (z, λ) se describen en la Figura 6.

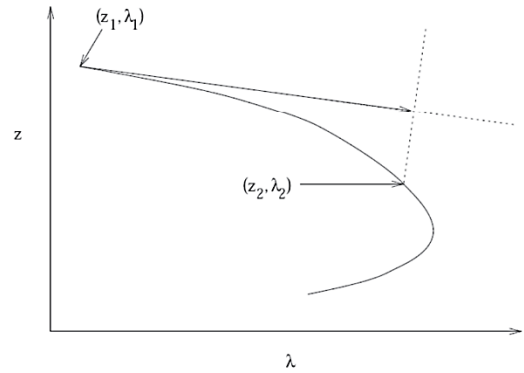


Figura 6. Intersección perpendicular [30].

Entonces basado en lo anterior se puede expresar matemáticamente [18][30]:

$$\rho(z, \lambda) = \Delta z_1^T (z - z_1 - \Delta z_1) + \Delta \lambda (\lambda - \lambda_1 - \Delta \lambda_1) \quad (24)$$

4 Implementación del modelo matemático

Las repentinas variaciones de potencia provocadas por conexiones o desconexiones de carga u operación de transformadores cambiadores de tap provocan alteraciones en el sistema de potencia, la alteración más común es la del nivel de voltaje en la barra en la que ocurre la variación de carga. El nivel de voltaje tiende a reducirse debido a la variación de carga conectada en la barra, si el nivel de voltaje se reduce hasta el punto crítico de operación, entonces ocurre el colapso del sistema.

Realizar un estudio de estabilidad y la aplicación del método CPF ayuda a observar cómo se reduce el nivel de voltaje en las barras del sistema hasta llegar al punto de crítico de operación en el cual ocurre el colapso de voltaje.

Para determinar el punto crítico y el comportamiento del voltaje en las barras debido a la variación de carga se implementa el método de flujos de potencia continuados (CPF), es un modelo basado en la resolución de flujos de potencia mediante la aplicación del algoritmo de Newton Raphson (NR), se añade un algoritmo de Predicción-Corrección, partiendo de una solución inicial obtenido del algoritmo de NR se determina las siguientes soluciones hasta llegar al punto crítico de operación permitiendo obtener la gráfica de estabilidad de voltaje.

Para complementar el estudio de estabilidad son añadidas las gráficas de capacidad de líneas de transmisión asociadas a cada barra, con este análisis se podrá observar el incremento de potencia a través de las líneas producto de la

variación de voltaje, complementando así el modelo CPF codificado en MATLAB.

4.1 Sistema propuesto para estudio de estabilidad

Para realizar el estudio de estabilidad de voltaje se toma como modelo de pruebas el sistema IEEE de 39 barras indicado en la Figura 7.

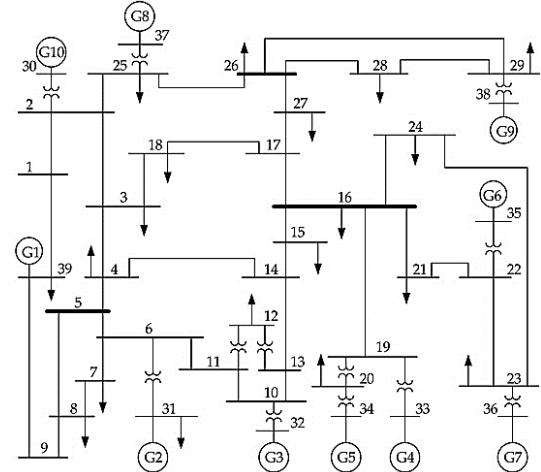


Figura 7. Sistema IEEE de 39 barras [31]

4.2 Modelo para estudio de estabilidad

A continuación se indica el algoritmo para la formulación del método CPF incluyendo la evaluación de capacidad de líneas de transmisión.

Algoritmo CPF

Paso 1:

Ingreso de Datos del sistema.

Paso 2:

Resolución de flujo de potencia mediante Newton Raphson.

Paso 3: - PREDICCIÓN

$Z0 = [V(\text{bfalla}); \theta(\text{bfalla})]$

V: Voltaje obtenido de Paso 2.

θ : Angulo obtenido de Paso 2.

bfalla: Barra en estudio de estabilidad.

Paso 4:

While $\Delta \lambda > 1$

$\Delta \lambda$: Variación del parámetro de continuación.

Paso 5:

$F = [\Delta P, \Delta Q]$

F: Ecuaciones de Flujos de potencia activa y reactiva.

Paso 6:

$[J, Pc, Qc] = \text{Jacobiano}(\text{buses}, v_teta, Y_{bus}, \text{bfalla})$

J: Jacobiano de la barra de falla.

Paso 7:

$V_{tan} = J^{-1} * SD$

SD: Variación de potencia de carga.

Paso 8:

$$\Delta\lambda = k / \text{norm}(V_{\text{tan}})$$

Paso 9:

$$\Delta Z = \Delta\lambda * V_{\text{tan}}$$

ΔZ : Cambio de variables de estado.

Paso 10:

$$Z = Z_0 + \Delta Z$$

$$\lambda = \lambda_0 + \Delta\lambda$$

Z: Valores de voltaje y ángulo

λ : Parámetro de continuación.

Paso 11: - CORRECCION

While $1 \times 10^{-3} \leq \text{norm}(\text{estatus})$
 $\text{estatus} = [\Delta Z; \Delta\lambda]$

Paso 12:

[J,Pc,Qc]=Jacobiano(buses,v_teta,Ybus,bfalla)

Paso 13:

Jaumentado=[J, SD; ΔZ , $\Delta\lambda$]

Jacobiano aumentado.

Paso 14:

$$F = \begin{bmatrix} P_{\text{esp}} \\ Q_{\text{esp}} \end{bmatrix} + \lambda [SD] - \begin{bmatrix} P_c \\ Q_c \end{bmatrix}$$

$\begin{bmatrix} P_{\text{esp}} \\ Q_{\text{esp}} \end{bmatrix}$: Valores obtenidos del flujo de potencia.

$\begin{bmatrix} P_c \\ Q_c \end{bmatrix}$: Obtenidos del Paso 12.

Paso 15:

$$\rho = \Delta Z(Z - Z_0 - \Delta Z) + \Delta\lambda(\lambda - \lambda_0 - \Delta\lambda)$$

ρ : Condiciones de fase.

Paso 16:

$$[\Delta Z; \Delta\lambda] = -\text{Jaumentado}^{-1} * [F; \rho]$$

Realizado el cálculo regrese al Paso 10 hasta cumplir la condición del lazo While, una vez cumplida la condición, regrese al Paso 4 para calcular el siguiente punto de la curva.

Paso 17:

Se procede a realizar la gráfica de estabilidad de voltaje en la barra de falla.

Paso 18: CURVAS DE CAPACIDAD

$$P_{V_{\text{stab,max}}} = \frac{V_S^2}{2X}$$

Realiza la gráfica considerando el límite de estabilidad de voltaje.

Paso 19:

$$P_{AS} = \frac{V_S^2}{X} \sin(\theta)$$

Grafica por estabilidad angular.

Paso 20:

Graficar el incremento de flujo de potencia por la línea.

Terminar

Una vez obtenidas las gráficas de estabilidad de la barra de estudio se procede a realizar el análisis mediante curvas de capacidad de líneas de transmisión.

5 Análisis de resultados

El análisis de resultados se enfoca en determinar a partir de las curvas P-V el punto de colapso de voltaje en diversas barras del sistema de prueba IEEE de 39 barras, por ejemplo esta curva se indica en la Figura 8.

Usando como base los resultados obtenidos del estudio de estabilidad de voltaje realizado, en el cual obtuvimos el punto de colapso de voltaje del sistema y la curva P-V propia de la barra de estudio como se muestra en la Figura 8. Se procede a realizar el análisis de estabilidad mediante nivel de potencia, para ello será necesario realizar un recálculo de los niveles de potencia que son transportados por las líneas de transmisión que se encuentren conectadas a la barra de estudio, pues al reducirse el nivel de voltaje en la barra la potencia se incrementa haciendo necesario un recálculo del flujo de potencia para poder apreciar los nuevos niveles de potencia que se encuentran circulando por las líneas de transmisión. La denominada curva de capacidad presentada en la Figura 9 nos permitirá determinar si los niveles de potencia que se encuentran circulando por la línea se encuentran o no bajo los límites de operación confiable, logrado así un análisis más completo del fenómeno de inestabilidad.

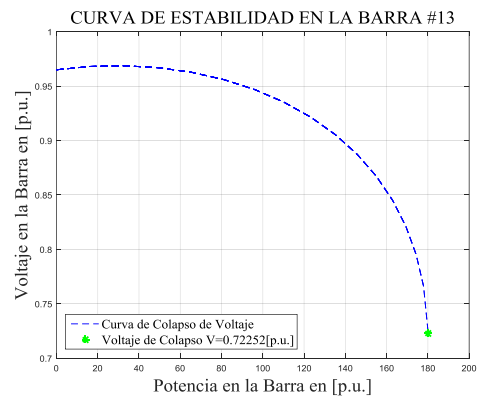


Figura 8. Curva de Estabilidad de Voltaje.

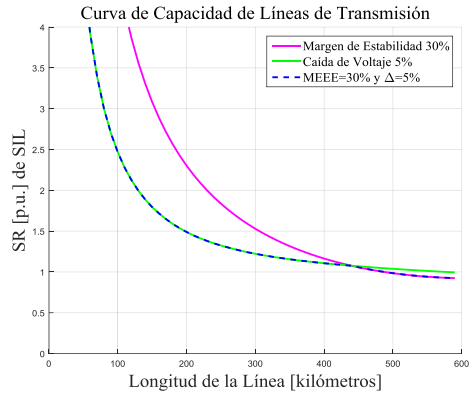


Figura 9. Curva de Capacidad de Líneas de Transmisión.

5.1 Caso de Estudio

Se considera el sistema de transmisión de la Figura 7, para el que se determinan las condiciones iniciales según los datos normales para este sistema de potencia. Se realiza el estudio de estabilidad de voltaje en las barras 28 y 19 del sistema.

La consideración de estas dos barras del sistema se realiza debido a la topología asociada a estas barras, la barra 28 es una barra de paso, donde no existe ni generación (Figura 10); mientras que la barra 19 es una barra radial en la únicamente se conectan transformadores o líneas de transmisión (Figura 11).

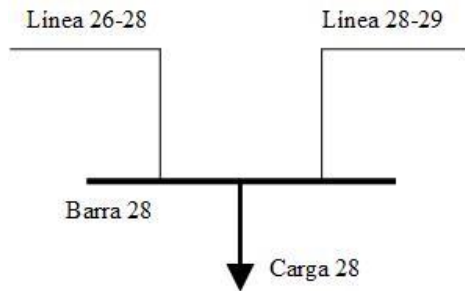


Figura 10. Barra de paso.

Una vez realizado el estudio de estabilidad de voltaje en las barras de prueba planteadas, se procede a graficar las curvas de capacidad de las líneas de transmisión asociadas a cada barra.

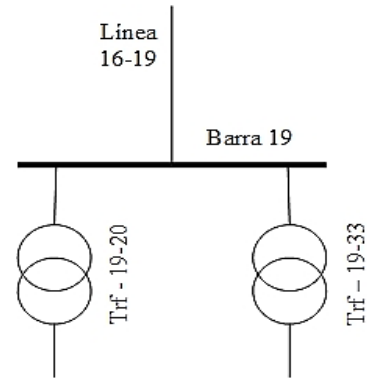


Figura 11. Barra tipo radial.

5.1.1 Resultados barra 28

Los resultados del estudio de estabilidad en la barra 28 indican que el colapso de voltaje ocurre a un voltaje en por unidad de 0.80353 como se puede observar en la Figura 12.

Para este caso la barra se encuentra conectada a dos líneas de transmisión, las cuales debido al proceso de estudio de estabilidad de voltaje sufren incrementos en el flujo de potencia que transportan, permitiendo observar que el colapso de voltaje ocurre antes de que las líneas lleguen a sobrepasar su máxima capacidad de transmisión de acuerdo a la Figura 13 y Figura 14.

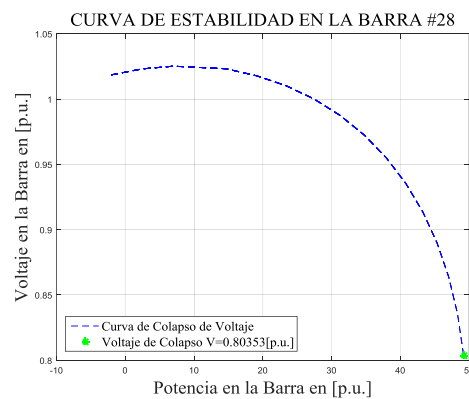


Figura 12. Análisis de estabilidad en la barra 28.

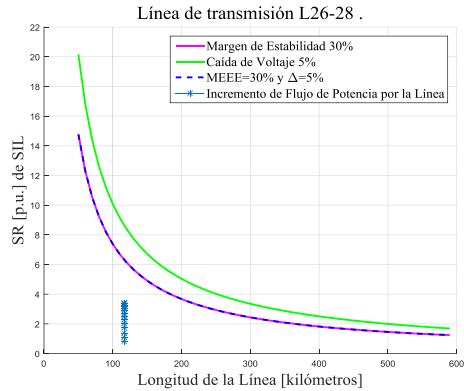


Figura 13. Curva de Capacidad de línea de transmisión 26-28.

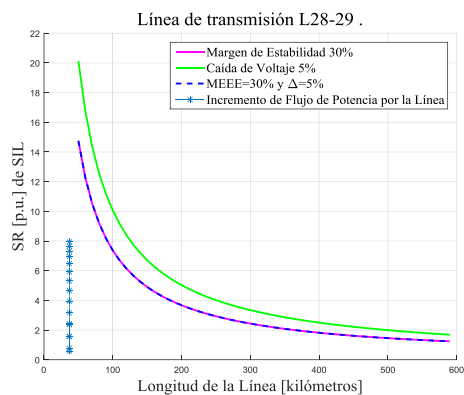


Figura 14. Curva de Capacidad de línea de transmisión 28-29.

5.1.2 Resultados barra 19

Para este caso se toma como referencia la barra 19 donde se obtiene el punto de colapso por voltaje del sistema, el cual se muestra en la Figura 15.

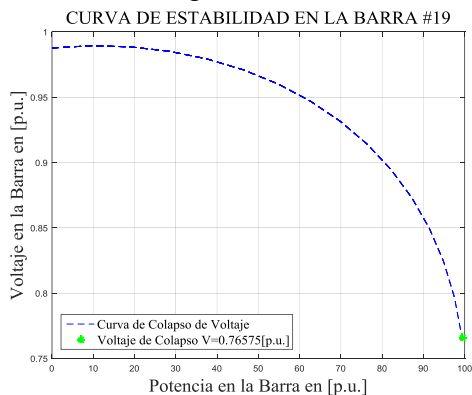


Figura 15. Análisis de estabilidad en barra 19.

Para este caso la barra se encuentra conectada a dos transformadores y una línea de transmisión, la cual debido al proceso de estudio de estabilidad de

voltaje sufre incrementos en los flujos de potencia que transporta, permitiendo apreciar si se sobrepasó el límite máximo de potencia que puede llevar la línea de acuerdo a su longitud [kilómetros], tal comportamiento se puede observar en las Figura 16.

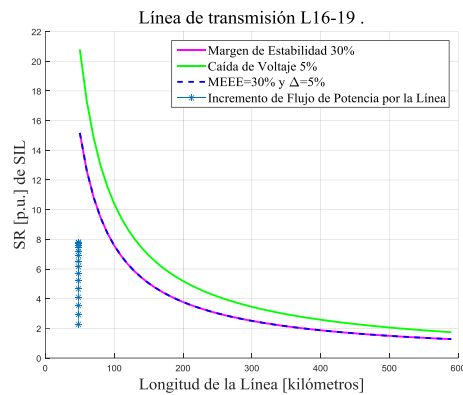


Figura 16. Curva de Capacidad de línea de transmisión 16-19

6 Conclusiones

El presente documento muestra la implementación del método CPF codificado en MATLAB para el estudio de estabilidad de voltaje, el cual permite obtener las curvas de la nariz (curvas P-V) de cada barra del sistema, las mismas que son una representación gráfica de la estabilidad de voltaje de largo plazo de un sistema eléctrico de potencia.

El análisis de estabilidad asociado a curvas de capacidad de líneas de transmisión, permite observar cómo se incrementa la potencia transportada por la línea y determinar si un colapso de voltaje ocurre antes de que la línea llegue a su máxima capacidad de transmisión.

Una de las ventajas del método CPF para estudio de estabilidad en sistemas de potencia, es que mediante su implementación se podrá obtener los puntos críticos de voltaje de cada barra del sistema, dichos puntos críticos representan numéricamente el valor de voltaje en el cual el sistema eléctrico

entrara en colapso, sabiendo de antemano cual es el nivel de voltaje en el cual ocurrirá el colapso es posible crear protocolos, alarmas o contramedidas para evitar el colapso del sistema y alejarnos del punto crítico de operación logrando devolver a la normalidad al sistema eléctrico.

Los resultados muestran que en ambos casos, la inestabilidad de voltaje ocurre antes que las líneas de transmisión lleguen a su límite operativo, siendo este un indicativo de que un colapso de voltaje puede llegar a producirse.

El producto obtenido en este trabajo es un algoritmo implementado en MATLAB con el cual se puede estudiar la estabilidad de voltaje mediante curvas P-V en cualquier sistema de potencia.

6.1 Trabajos futuros

Los logros obtenidos en este documento pueden ser tomados como punto de partida para investigaciones como:

- Estabilidad de voltaje considerando modelos de transformadores con tap.
- Estabilidad de voltaje mediante curvas Q-V.
- Estabilidad de voltaje y déficit de potencia reactiva en sistemas eléctricos de potencia.

7 Referencias

- [1] I. Adebayo, A. A. Jimoh, and A. Yusuff, "Voltage stability assessment and identification of important nodes in power transmission network through network response structural characteristics," *IET Gener. Transm. Distrib.*, vol. 11, no. 6, pp. 1398–1408, 2017.
- [2] D. K. Molzahn, Z. B. Friedman, B. C. Lesieutre, C. L. DeMarco, and M. C. Ferris, "Estimation of constraint parameters in optimal power flow data sets," in *2015 North American Power Symposium (NAPS)*, 2015, pp. 1–6.
- [3] P. M. Farsani, S. G. Vennelaganti, and N. R. Chaudhuri, "Synchrophasor-enabled power grid restoration with DFIG-based wind farms and VSC-HVDC transmission system," *IET Gener. Transm. Distrib.*, pp. 1339–1345, 2017.
- [4] O. Ziaee, O. Alizadeh Mousavi, and F. Choobineh, "Co-optimization of transmission expansion planning and TCSC placement considering the correlation between wind and demand scenarios," *IEEE Trans. Power Syst.*, vol. 33, no. 1, pp. 1–1, 2017.
- [5] S. N. Tiwari and A. S. Bin Saroor, "An investigation into loadability characteristics of EHV high phase order transmission lines," *IEEE Trans. Power Syst.*, vol. 10, no. 3, pp. 1264–1270, 1995.
- [6] P. Kundur *et al.*, "Definition and Classification of Power System Stability IEEE/CIGRE Joint Task Force on Stability Terms and Definitions," *IEEE Trans. Power Syst.*, vol. 19, no. 3, pp. 1387–1401, 2004.
- [7] S. Polster and H. Renner, "Voltage stability monitoring methods for distribution grids using the thevenin impedance," *Cired*, vol. 2017, no. June, pp. 12–15, 2017.
- [8] S. Nikkhah and A. Rabiee, "Voltage stability constrained multi-objective optimisation model for long-term expansion planning of large-scale wind farms," *IET Gener. Transm. Distrib.*, vol. 12, no. 3, pp. 548–555, 2018.

- [9] S. Nath and S. Pal, "A novel technique for determination of voltage stability margin," in *5th IET International Conference on System Safety 2010*, 2010, vol. 11, no. 6, pp. PO1-PO1.
- [10] H. M. Chou and K. L. Butler-Purry, "Investigation of voltage stability in unbalanced distribution systems with DG using three-phase current injection based CPF," *IEEE Power Energy Soc. Gen. Meet.*, vol. 2014–October, no. October, pp. 1–6, 2014.
- [11] N. Yorino, Y. Zoka, M. Watanabe, and T. Kurushima, "An Optimal Autonomous Decentralized Control Method for Voltage Control Devices by Using a Multi-Agent System," *IEEE Trans. Power Syst.*, vol. 30, no. 5, pp. 2225–2233, 2015.
- [12] A. B. M. Nasiruzzaman, H. R. Pota, and M. A. Barik, "Implementation of bidirectional power flow based centrality measure in bulk and smart power transmission systems," *2012 IEEE Innov. Smart Grid Technol. - Asia, ISGT Asia 2012*, pp. 1–6, 2012.
- [13] A. B. M. Nasiruzzaman, H. R. Pota, A. Anwar, and S. Member, "Comparative Study of Power Grid Centrality Measures using Complex Network Framework," *Power Eng. Optim. Conf.*, no. June, pp. 6–7, 2012.
- [14] Y. Qiu, H. Wu, Y. Zhou, and Y. Song, "Global parametric polynomial approximation of static voltage stability region boundaries," *IEEE Trans. Power Syst.*, vol. 32, no. 3, pp. 2362–2371, 2017.
- [15] T. Moger and T. Dhadbanjan, "A novel index for identification of weak nodes for reactive compensation to improve voltage stability," *Iet Gener. Transm. Distrib.*, vol. 9, no. 14, pp. 1826–1834, 2015.
- [16] S. Patra, D. Chatterjee, and S. Konar, "V–Q sensitivity-based index for assessment of dynamic voltage stability of power systems," *IET Gener. Transm. Distrib.*, vol. 9, no. 7, pp. 677–685, Apr. 2015.
- [17] F. Mumtaz, M. H. Syed, M. Al Hosani, and H. H. Zeineldin, "A Novel Approach to Solve Power Flow for Islanded Microgrids Using Modified Newton Raphson with Droop Control of DG," *IEEE Trans. Sustain. Energy*, vol. 7, no. 2, pp. 493–503, 2016.
- [18] N. Fnaiech, A. Jendoubi, M. Zoghlami, and F. Bacha, "Continuation power flow of voltage stability limits and a three dimensional visualization approach," in *2015 16th International Conference on Sciences and Techniques of Automatic Control and Computer Engineering (STA)*, 2015, pp. 163–168.
- [19] A. Jalali and M. Aldeen, "Novel continuation power flow algorithm," in *2016 IEEE International Conference on Power System Technology (POWERCON)*, 2016, no. i, pp. 1–6.
- [20] Y. Fan, S. Liu, L. Qin, H. Li, and H. Qiu, "A novel online estimation scheme for static voltage stability margin based on relationships exploration in a large data set," *IEEE Trans. Power Syst.*, vol. 30, no. 3, pp. 1380–1393, 2015.
- [21] S. Liu *et al.*, "A SIPSS-Lasso-BPNN scheme for online voltage stability assessment," *IEEE Power*

- Energy Soc. Gen. Meet.*, vol. 2014–Octob, no. October, pp. 1–5, 2014.
- [22] D. Q. Zhou, U. D. Annakkage, and A. D. Rajapakse, “Online monitoring of voltage stability margin using an artificial neural network,” *IEEE Trans. Power Syst.*, vol. 25, no. 3, pp. 1566–1574, 2010.
- [23] M. Bakhtvar and A. Keane, “Allocation of Wind Capacity Subject to Long Term Voltage Stability Constraints,” *IEEE Trans. Power Syst.*, vol. 31, no. 3, pp. 2404–2414, 2016.
- [24] N. Mithulananthan, D. Q. Hung, and K. Y. Lee, *Intelligent Network Integration of Distributed Renewable Generation*. Cham: Springer International Publishing, 2017.
- [25] K. Amarasekara, L. G. Meegahapola, A. P. Agalgaonkar, and S. Perera, “Characterisation of long-term voltage stability with variable-speed wind power generation,” *IET Gener. Transm. Distrib.*, vol. 11, no. 7, pp. 1848–1855, 2017.
- [26] R. Gutman, P. P. Marchenko, and R. D. Dunlop, “Analytical Development of Loadability Characteristics for EHV and UHV Transmission Lines,” *IEEE Trans. Power Appar. Syst.*, vol. PAS-98, no. 2, pp. 606–617, Mar. 1979.
- [27] B. Saroor *et al.*, “An investigation into loadability characteristics of EHV high phase order transmission lines,” *IEEE Trans. Power Syst.*, vol. 11, no. 3, pp. 1–6, Apr. 2015.
- [28] L. Dawson and A. M. Knight, “Transmission line length, operating condition and rating regime,” in *2016 IEEE Canadian Conference on Electrical and Computer Engineering (CCECE)*, 2016, pp. 1–6.
- [29] A. Bonini Neto, E. M. Magalhaes, and D. A. Alves, “Dishonest Newton Method Applied in Continuation Power Flow Through a Geometric Parameterization Technique,” *IEEE Lat. Am. Trans.*, vol. 14, no. 1, pp. 161–170, 2016.
- [30] F. L. Quilumba, G. E. Constante, J. A. Jativa, and W.-J. Lee, “Distributed energy resources placement in distribution networks considering proximity to voltage collapse,” *2015 IEEE Ind. Appl. Soc. Annu. Meet.*, pp. 1–6, 2015.
- [31] S. Azizi, M. Sanaye-Pasand, and M. Paolone, “Locating Faults on Untransposed, Meshed Transmission Networks Using a Limited Number of Synchrophasor Measurements,” *IEEE Trans. Power Syst.*, vol. 31, no. 6, pp. 4462–4472, 2016.

7.1 Matriz de Estado del Arte

Tabla 1. Matriz de estado del arte

ESTABILIDAD DE VOLTAJE EN SISTEMAS ELÉCTRICOS DE POTENCIA INCLUYENDO CURVAS DE CAPACIDAD PARA LÍNEAS DE TRANSMISIÓN BASADO EN EL MÉTODO CPF																									
ITEM	AÑO	DATOS		TEMÁTICA				FORMULACION DEL PROBLEMA				RESTRICCIONES DEL PROBLEMA			ALGORITMO DE OPTIMIZACIÓN			SOLUCIÓN PROPUESTA							
		TÍTULO DEL ARTÍCULO	CITAS	Estabilidad de Voltaje	Flujos de Potencia	Newton Raphson	Método de la Continuación	Flujos de Potencia Continuada	Variación de Potencia de carga en el sistema de transmisión	Cargabilidad de las líneas de transmisión	Límite de carga por Nivel de tensión	Límite de carga por potencia transportada	Realizar un estudio de estabilidad a largo plazo	Cargabilidad de líneas de transmisión	Límite de flujo de potencia por líneas de transmisión	Cargabilidad de líneas de transmisión	Algoritmos Iterativos	Newton Raphson	Flujos de potencia continuados	Método de la completación	Límites de carga para líneas de transmisión	Modelación del sistema de potencia	Simulación de flujos de potencia mediante el método de Newton-Raphson	Análisis del sistema de potencia mediante el método de la continuación	Estudio de estabilidad de voltaje a largo plazo
1	2017	Voltage stability assessment and identification of important nodes in power transmission network through network response structural characteristics.	0	☒				☒													☒			☒	
2	2015	Estimation of constraint parameters in optimal power flow data sets	0		☒											☒						☒			
3	2018	Synchrophasor-enabled power grid restoration with DFIG-based wind farms and VSC-HVDC transmission system	0	☒	☒			☒			☒														
4	2017	Co-optimization of transmission expansion planning and TCSC placement considering the correlation between wind and demand scenarios	1		☒			☒		☒	☒														
5	1995	An investigation into loadability characteristics of EHV high phase order transmission lines	7	☒	☒			☒	☒				☒												
6	2004	Definition and Classification of Power System Stability IEEE/CIGRE Joint Task Force on Stability Terms and Definitions	116	☒				☒				☒									☒				☒
7	2017	Voltage stability monitoring methods for distribution grids using the thevenin impedance	0	☒									☒			☒						☒			
8	2018	Voltage stability constrained multi-objective optimisation model for long-term expansion planning of large-scale wind farms	0	☒	☒		☒	☒								☒									
9	2010	A novel technique for determination of voltage stability margin	3	☒				☒	☒		☒		☒								☒				

10	2014	Investigation of voltage stability in unbalanced distribution systems with DG using three-phase current injection based CPF	3	✗	✗		✗								✗		✗		✗							
11	2015	An Optimal Autonomous Decentralized Control Method for Voltage Control Devices by Using a Multi-Agent System	9	✗	✗									✗	✗	✗				✗						
12	2012	Implementation of Bidirectional Power Flow Based Centrality Measure in Bulk and Smart Power Transmission Systems	1		✗			✗							✗				✗							
13	2012	Comparative Study of Power Grid Centrality Measures using Complex Network Framework	1												✗					✗						
14	2017	Global Parametric Polynomial Approximation of Static Voltage Stability Region Boundaries	1	✗	✗								✗								✗				✗	
15	2015	A novel index for identification of weak nodes for reactive compensation to improve voltage stability	7	✗	✗			✗	✗			✗								✗	✗					
16	2015	V-Q sensitivity-based index for assessment of dynamic voltage stability of power systems	4	✗	✗	✗		✗						✗	✗	✗	✗				✗	✗				
17	2015	A Novel Approach to Solve Power Flow for Islanded Microgrids Using Modified Newton Raphson With Droop Control of DG	18	✗	✗										✗	✗					✗	✗				
18	2015	Continuation power flow of voltage stability limits and a three dimensional visualization approach	0	✗	✗		✗	✗					✗			✗	✗	✗	✗		✗	✗	✗	✗	✗	
19	2016	Novel continuation power flow algorithm	3		✗		✗	✗								✗		✗	✗		✗	✗				
20	2014	A Novel Online Estimation Scheme for Static Voltage Stability Margin Based on Relationships Exploration in a Large Data Set	8	✗				✗					✗								✗					
21	2014	A SIPSS-Lasso-BPNN scheme for online voltage stability assessment	1	✗									✗												✗	
22	2010	Online monitoring of voltage stability margin using an artificial neural network	5	✗												✗									✗	
23	2016	Allocation of Wind Capacity Subject to Long Term Voltage Stability Constraints	0	✗	✗			✗					✗			✗		✗			✗				✗	
24	2017	Intelligent Network Integration of Distributed Renewable Generation	0	✗									✗									✗				
25	2017	Characterisation of long-term voltage stability with variable-speed wind power generation	1	✗	✗								✗			✗						✗			✗	
26	1979	Analytical Development of Loadability Characteristics for EHV and UHV Transmission Lines	79	✗			✗	✗		✗	✗		✗	✗		✗					✗					
27	1995	An investigation into loadability characteristics of EHV high phase order transmission lines	5					✗	✗	✗		✗	✗	✗							✗					
28	2016	Transmission line length, operating condition and rating regime	0					✗						✗							✗				✗	
29	2016	Dishonest Newton Method Applied in Continuation Power Flow Through a Geometric Parameterization Technique	0	✗	✗	✗				✗			✗	✗		✗	✗					✗	✗			
30	2015	Distributed energy resources placement in distribution networks considering proximity to voltage collapse	1	✗	✗		✗	✗								✗		✗				✗	✗			

31	2016	Locating Faults on Untransposed, Meshed Transmission Networks Using a Limited Number of Synchrophasor Measurements	9		☒				☒	☒				☒	☒		☒				☒					
			CANTIDAD:	23	19	2	5	7	11	8	3	5	8	8	6	3	18	5	5	2	7	18	6	2	9	

7.2 Resumen de Indicadores

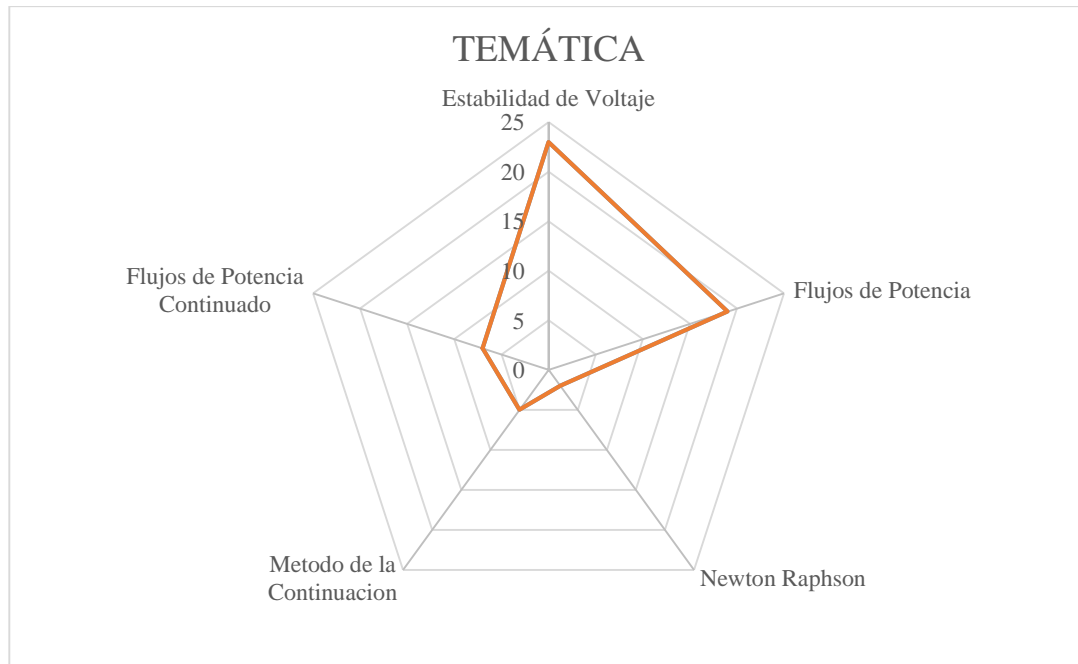


Figura 17. Resumen e indicador de la temática - Estado del arte

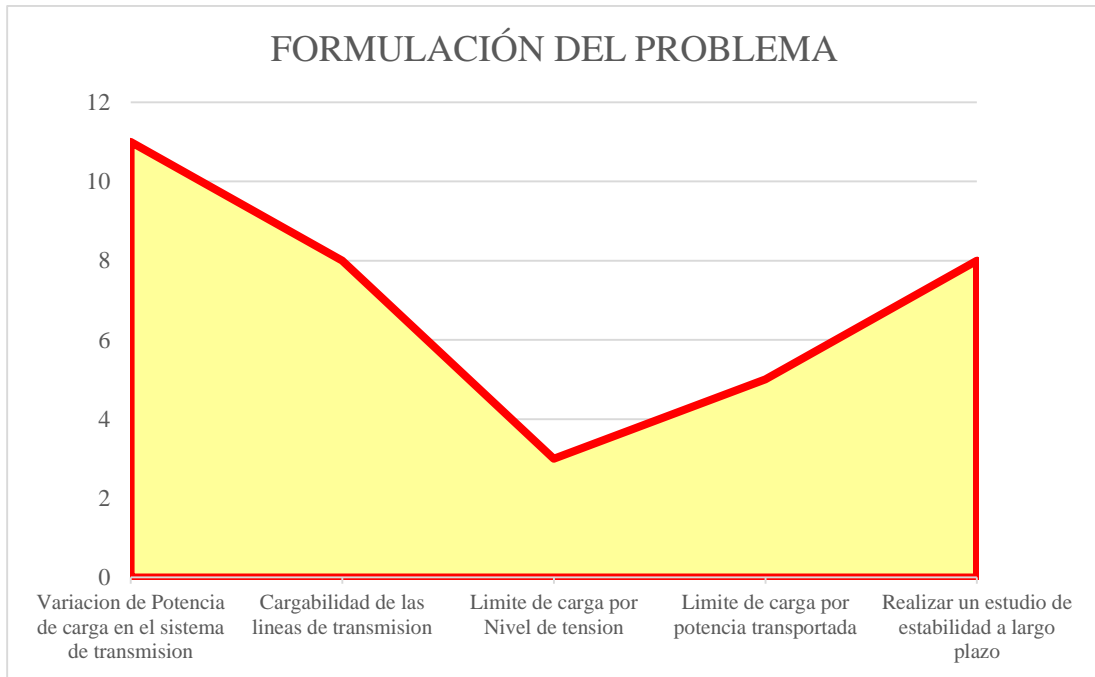


Figura 18. Indicador de formulación del problema - Estado del arte

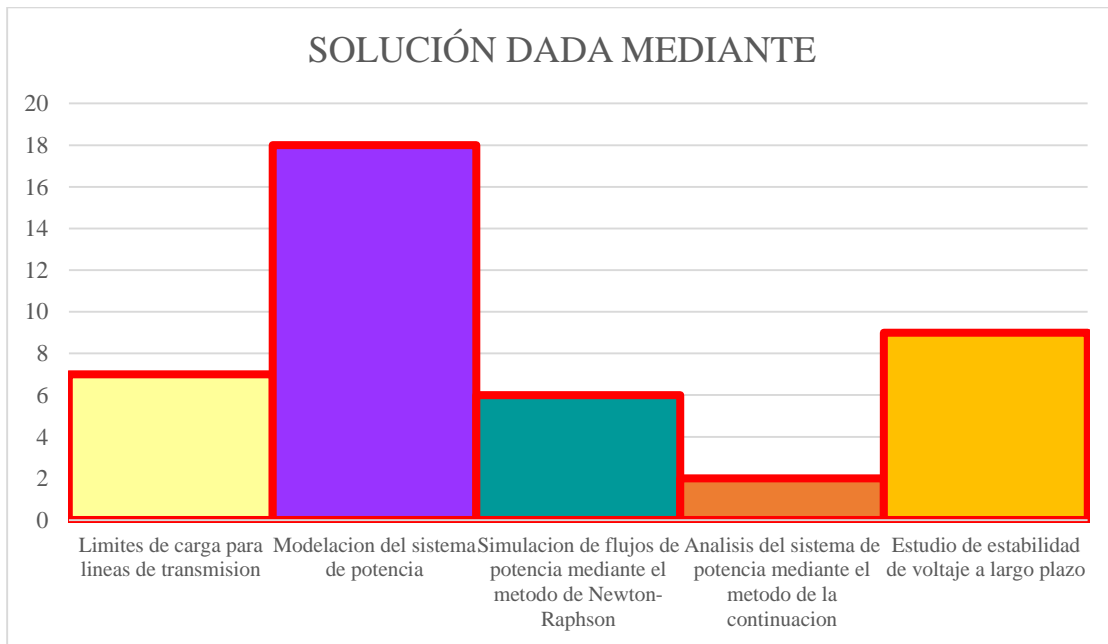


Figura 19. Indicador de solución - Estado del arte

8 Anexos

Tabla 2. Datos del Sistema IEEE de 39 barras

Datos del Sistema de Potencia								
Tipo de Barras: 1 - Barra de Referencia (Slack) 2 - Barra de Voltaje (P-V) 3 - Barra de Carga (P-Q)								
Barra N°	Voltaje	Angulo	Pg	Qg	Pc	Qc	Tipo	Ycomp
1	0.9820	0.0000	0.0000	0.0000	0.0920	0.0460	1	0
2	0.9831	0.0000	65.000	0.0000	0.0000	0.0000	2	0
3	0.9972	0.0000	63.200	0.0000	0.0000	0.0000	2	0
4	10.123	0.0000	50.800	0.0000	0.0000	0.0000	2	0
5	10.493	0.0000	65.000	0.0000	0.0000	0.0000	2	0
6	10.635	0.0000	56.000	0.0000	0.0000	0.0000	2	0
7	10.278	0.0000	54.000	0.0000	0.0000	0.0000	2	0
8	10.265	0.0000	83.000	0.0000	0.0000	0.0000	2	0
9	10.300	0.0000	100.000	0.0000	110.400	25.000	2	0
10	10.475	0.0000	25.000	0.0000	0.0000	0.0000	2	0
11	10.000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	3	0
12	10.000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	3	0
13	10.000	0.0000	0.0000	0.0000	32.200	0.0240	3	0
14	10.000	0.0000	0.0000	0.0000	50.000	18.400	3	0
15	10.000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	3	0
16	10.000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	3	0
17	10.000	0.0000	0.0000	0.0000	23.380	0.8400	3	0
18	10.000	0.0000	0.0000	0.0000	52.200	17.600	3	0
19	10.000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	3	0
20	10.000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	3	0
21	10.000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	3	0
22	10.000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0750	0.8800	3	0
23	10.000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	3	0
24	10.000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	3	0
25	10.000	0.0000	0.0000	0.0000	32.000	15.300	3	0
26	10.000	0.0000	0.0000	0.0000	32.900	0.3230	3	0
27	10.000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	3	0
28	10.000	0.0000	0.0000	0.0000	15.800	0.3000	3	0

29	10.000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	3	0
30	10.000	0.0000	0.0000	0.0000	62.800	10.300	3	0
31	10.000	0.0000	0.0000	0.0000	27.400	11.500	3	0
32	10.000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	3	0
33	10.000	0.0000	0.0000	0.0000	24.750	0.8460	3	0
34	10.000	0.0000	0.0000	0.0000	30.860	- 0.9220	3	0
35	10.000	0.0000	0.0000	0.0000	22.400	0.4720	3	0
36	10.000	0.0000	0.0000	0.0000	13.900	0.1700	3	0
37	10.000	0.0000	0.0000	0.0000	28.100	0.7550	3	0
38	10.000	0.0000	0.0000	0.0000	20.600	0.2760	3	0
39	10.000	0.0000	0.0000	0.0000	28.350	0.2690	3	0

Tabla 3. Datos de líneas del sistema IEEE de 39 barras

Datos de Líneas del Sistema					
Barra i	Barra j	R	X	Y	Longitud [km]
11	12	0.0035	0.0411	0.6987	163.0643
11	9	0.0010	0.0250	0.7500	99.1875
12	13	0.0013	0.0151	0.2572	59.90925
12	35	0.0070	0.0086	0.1460	34.1205
12	10	0.0000	0.0181	0.0000	0
13	14	0.0013	0.0213	0.2214	84.50775
13	28	0.0011	0.0133	0.2138	52.76775
14	15	0.0008	0.0128	0.1342	50.784
14	34	0.0008	0.0129	0.1382	51.18075
15	16	0.0002	0.0026	0.0434	10.3155
15	18	0.0008	0.0112	0.1476	44.436
16	17	0.0006	0.0092	0.1130	36.501
16	21	0.0007	0.0082	0.1389	32.5335
16	1	0.0000	0.0250	0.0000	0.0000
17	18	0.0004	0.0046	0.0780	18.2505
18	19	0.0023	0.0363	0.3804	144.0202
19	9	0.0010	0.0250	1.2000	99.1875
20	21	0.0004	0.0043	0.0729	17.06025
20	23	0.0004	0.0043	0.0729	17.06025
20	2	0.0000	0.0200	0.0000	0.0000
22	21	0.0016	0.0435	0.0000	0.0000

22	23	0.0016	0.0435	0.0000	0.0000
23	24	0.0009	0.0101	0.1723	40.07175
24	25	0.0018	0.0217	0.3660	86.09475
25	26	0.0009	0.0094	0.1710	37.2945
26	27	0.0007	0.0089	0.1342	35.31075
26	29	0.0016	0.0195	0.3040	77.36625
26	31	0.0008	0.0135	0.2548	53.56125
26	34	0.0003	0.0059	0.0680	23.40825
27	28	0.0007	0.0082	0.1319	32.5335
27	37	0.0013	0.0173	0.3216	68.63775
29	30	0.0007	0.0138	0.0000	0.0000
29	3	0.0007	0.0142	0.0000	0.0000
30	4	0.0009	0.0180	0.0000	0.0000
31	32	0.0008	0.0140	0.2565	55.545
32	33	0.0006	0.0096	0.1846	38.088
32	5	0.0000	0.0143	0.0000	0
33	34	0.0022	0.0350	0.3610	138.8625
33	6	0.0005	0.0272	0.0000	0
35	36	0.0032	0.0323	0.5310	128.1503
35	7	0.0006	0.0232	0.0000	0
36	37	0.0014	0.0147	0.2396	58.32225
36	38	0.0043	0.0474	0.7802	188.0595
36	39	0.0057	0.0625	1.0290	247.9688
38	39	0.0014	0.0151	0.2490	59.90925
39	8	0.0008	0.0156	0.0000	0