

**ESTABILIDAD DE VOLTAJE EN SISTEMAS DE TRANSMISIÓN
CONSIDERANDO LA OPERACIÓN DE TRANSFORMADORES CON TAPS**

**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 DE TRANSMISIÓN
CONSIDERANDO LA OPERACIÓN DE TRANSFORMADORES CON TAPS**

**AUTOR:
BAYRON GEOVANNI QUINCHIMBLA LLUGLLUNA**

**DIRECTOR:
CARLOS ANDRÉS BARRERA SINGAÑA**

Quito, Agosto 2019

Bayron Geovanni Quinchimbla Lluglluna

**ESTABILIDAD DE VOLTAJE EN SISTEMAS DE TRANSMISIÓN
CONSIDERANDO LA OPERACIÓN DE TRANSFORMADORES CON TAPS**

Universidad Politécnica Salesiana, Quito – Ecuador 2019

Ingeniería Eléctrica

Breve reseña histórica e información de contacto.



Bayron Geovanni Quinchimbla Lluglluna (Y'1992 – M'5). Realizó sus estudios de nivel secundario en el Colegio Juan Bautista Montini de la ciudad de San Francisco de Borja. 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. bquinchimbla@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

©2019 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 DE TRANSMISIÓN CONSIDERANDO LA OPERACIÓN DE TRANSFORMADORES CON TAPS*” realizado por Bayron Geovanni Quinchimbla Lluglluna, obteniendo un producto que cumple con todos los requisitos estipulados por la Universidad Politécnica Salesiana para ser considerados como trabajo final de titulación.

Quito D.M., Agosto de 2019



.....
Carlos Andrés Barrera Singaña

C.C.: 0503503336

CESIÓN DE DERECHOS DE AUTOR

Yo, Bayron Geovanni Quinchimbla Lluglluna, con documento de identificación N° 1500875370, manifiesto mi voluntad y cedo a la Universidad Politécnica Salesiana la titularidad sobre los derechos patrimoniales en virtud de que soy autor del trabajo de grado/titulación intitulado: *“ESTABILIDAD DE VOLTAJE EN SISTEMAS DE TRANSMISIÓN CONSIDERANDO LA OPERACIÓN DE TRANSFORMADORES CON TAPS”*, 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 D.M., Agosto de 2019



.....
Bayron Geovanni Quinchimbla Lluglluna

C.C.: 1500875370

1. ÍNDICE GENERAL

1	Introducción	2
2	Marco teórico	3
2.1	Estabilidad de Sistemas Eléctricos de Potencia	3
2.2	Estabilidad de Voltaje	3
2.2.1	De corto plazo	4
2.2.2	De largo plazo	4
2.3	Transformadores con taps	4
2.3.1	Control directo	4
2.3.2	Control inverso.....	5
2.3.3	Modelo generalizado del transformador con taps.	5
3	Modelo matemático del Método de Continuación de Flujos de Potencia.....	6
3.1.1	Paso de predicción.....	7
3.1.2	Paso de Corrección.....	8
4	Incorporación del modelo de transformador con taps en el método de continuación de flujos de potencia.....	8
5	Análisis de resultados.....	8
5.1	Caso de Estudio.....	9
5.1.1	Caso (a)	9
5.1.2	Caso (b).....	10
5.1.3	Análisis.....	11
6	Conclusiones	11
6.1	Trabajos Futuros	11
7	Referencias	12
7.1	Matriz de Estado del Arte	15
7.2	Resumen de Indicadores	17
8	Anexos	19

2. ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1. Control directo [28].	5
Figura 2. Control inverso [28].	5
Figura 3. Transformador con taps diagrama del modelo generalizado [28].	5
Figura 4. Transformador con taps modelo pi [28].	6
Figura 5. Curva PV [15][22].	7
Figura 6. Tangente predictor [19][28].	8
Figura 7. Intersección perpendicular [19][28].	8
Figura 8. Sistema de potencia de 9 barras IEEE [12].	9
Figura 9. Curva PV caso (a) en la barra 4.	10
Figura 10. Curva PV caso (a) en la barra 7.	10
Figura 11. Curva PV caso (a) en la barra 9.	10
Figura 12. Curva PV caso (b) en la barra 4.	10
Figura 13. Curva PV caso (b) en la barra 7.	10
Figura 14. Curva PV caso (b) en la barra 9.	10
Figura 15. Resumen e indicador de la temática - estado del arte	17
Figura 16. Indicador de formulación del problema - estado del arte.	18
Figura 17. Indicador de solución - estado del arte	18

3. ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1. Pseudocódigo del método de continuación con la inclusión de transformadores con taps.	9
Tabla 2. Taps primario y secundario. Caso (a)	9
Tabla 3. Taps primario y secundario. Caso (b)	10
Tabla 4. Puntos de colapso de voltaje.	11
Tabla 5. Matriz del estado del arte	15
Tabla 6. Datos del sistema de la IEEE 9 barras en [p.u.]	19
Tabla 7. Datos de las líneas del sistema IEEE 9 barras en [p.u.]	19
Tabla 8. Datos de transformadores del sistema IEEE 9 barras en [p.u.]	19

ESTABILIDAD DE VOLTAJE EN SISTEMAS DE TRANSMISIÓN CONSIDERANDO LA OPERACIÓN DE TRANSFORMADORES CON TAPS

Resumen

En este documento se presenta investigación de estabilidad de voltaje considerando la inclusión de transformadores con taps, conocido que la variación en el número de vueltas de los transformadores varía la magnitud del voltaje en las barras. Para efectos de analizar la estabilidad de voltaje se emplea el método de continuación de flujos de potencia para la construcción de las curvas PV. En esta formulación de flujos de potencia se integra el modelo generalizado de un transformador con taps. Los casos propuestos son planteados en función del control directo o inverso que pueden efectuar los transformadores. Los resultados encontrados permiten determinar que las posiciones de los taps modifican los puntos de colapso de voltaje, mejorando o empeorando la estabilidad de voltaje del SEP de prueba.

Palabras Clave: Estabilidad de Voltaje, Transformador con tap, Curvas PV, Continuación de flujos de potencia, SEP.

Abstract

This document presents a voltage stability research, considering the inclusion of transformers with taps, knowing that the variation in the number of turns in transformers changes the voltage magnitude in buses. In order to analyze the voltage stability, the continuation power flow method is used to create PV curves. This power flow formulation integrates the generalized model of a transformer with taps. The proposed cases are set as a function of the direct and inverse control that transformers can make. The results allow determining which tap positions modify the points of voltage collapse, improving or worsening the voltage stability in the test SEP.

Keywords: Voltage Stability, Tap transformer, PV curves, Continuation power flow, SEP.

1 Introducción

En el sistema eléctrico de potencia (SEP), el análisis de la estabilidad de voltaje juega un papel muy importante y es reconocida como un problema para la operación segura del mismo desde los años 1920. El desarrollo de estudios eléctricos acerca de estabilidad de voltaje se ha dado principalmente por apagones totales en las ciudades de mayor importancia en el mundo, es decir la ocurrencia del apagón total conocido como blackout, ha derivado en que los estados financien investigaciones al respecto [1].

El SEP es un sistema dinámico completo, que está compuesto por varios elementos, con características variables como son la carga, la generación, el sistema de transmisión con constantes perturbaciones [2]. En la literatura se define a la estabilidad de voltaje como la cabida del SEP en conservar los voltajes en un rango aceptable en las barras después de que ocurra una perturbación y no exista un colapso de voltaje dado en el sistema de transmisión [3].

Cuando existe un aumento de carga en el sistema eléctrico, la caída de voltaje en las líneas de transmisión se incrementa, a su vez esta reduce el voltaje en la misma barra de carga, llegando a un punto en el funcionamiento del SEP relativamente cercano a un posible colapso de voltaje; entonces, esto indica que la estabilidad de voltaje depende directamente en que haya un equilibrio entre la demanda y la generación [2][3].

La inestabilidad de voltaje se puede dar como un aumento o pérdida sucesiva de la dimensión del voltaje en su propia barra, o en casos mayores en su totalidad de las barras del SEP [4][5], por la actuación de protecciones que actúan ante bajos voltajes.

Para el problema que presenta la estabilidad de voltaje, este debe mantenerse dentro de límite de los rangos del margen de estabilidad determinados en las rutinas de trabajo de un sistema eléctrico de potencia [6][7].

Los transformadores con cambiadores de tomas bajo carga (OLTC) tienen una gran influencia en la estabilidad de voltaje [8], ya que este transformador es una máquina eléctrica estática, parte principal del SEP, que por inducción electromagnética tiene la capacidad de transformar el voltaje y corriente entre los devanados a nuevas magnitudes deseadas [8][9]. Se pretende que un transformador con cambiadores de tomas bajo carga entregue un voltaje estable que no sobrepase los límites de operación del sistema sea funcionando de manera correcta o en presencia de una perturbación como por ejemplo una carga altamente variable en la etapa de distribución [10]. En la operación del OLTC, este realiza un control para aumentar o disminuir el número de vueltas de un devanado y poder mantener un voltaje estable y deseable, al realizar la operación ya mencionada, esta posee la cabida de aumentar la transferencia de potencia principalmente potencia reactiva en el sistema eléctrico y por consecuencia no llegar a condiciones cercanas al colapso, conocido que la eficacia de la potencia reactiva (PQ) y la dimensión del voltaje sean variables estrechamente relacionadas; mejorando así la estabilidad de voltaje [8][9][11]. Por consecuencia de variar el número de vueltas en un devanado de un transformador la impedancia del mismo varía, siendo este un modelo o representación distinta a un modelo clásico con una reactancia, resultando en un modelo Pi, de similar forma al de una línea de transmisión [12]. Esta modificación se puede incluir en el estudio de flujos de potencia [11],

sabiendo que el transformador puede realizar un control directo y un control inverso sobre el voltaje de sus barras de conexión; siendo este control un beneficio al sistema eléctrico y por consecuencia una mejora en la estabilidad de voltaje, alejando a una barra de su colapso [7][11][13].

La estabilidad de voltaje tiene varios métodos de análisis como: el índice de estabilidad de línea VCPI (Voltage Collapse Prediction Index), la curva Q-V, el índice V/V, análisis de moda, el índice de estabilidad de línea LQP (Line Stability Factor), la curva P-Q, el índice de estabilidad de línea FVSI (Fast Voltage Stability Index), etc. [11][14]. Estos son algunos métodos encontrados en la literatura y que han sido formulados para estudiar la estabilidad de voltaje en un SEP. En este trabajo, se toma al método de las curvas PV que está fundamentado en utilizar la técnica de continuación de flujos de potencia (CPF) por sus siglas en inglés [15][16]. Cuando se realiza el estudio de la estabilidad de voltaje este método es una herramienta favorable [17].

En el presente documento se toma en consideración el sistema de potencia de la IEEE de nueve barras y se realiza un estudio de estabilidad de voltaje. Este análisis se realiza incluyendo transformadores con taps para observar cómo se comporta el sistema al realizar cambios en las tomas, definiendo un nuevo punto de colapso de voltaje ya sea realizando un control directo o control inverso.

Este documento se encuentra organizado como se indica a continuación: Sección I: Introducción. Sección II: Marco teórico. Sección III: Modelo matemático del método de continuación de flujos de potencia. Sección IV: Incorporación del modelo de transformador con taps en el método de

continuación de flujos de potencia. Sección V: Análisis de resultados. Sección VI: Conclusiones. Sección VII: Referencias. Sección VIII: Anexos.

2 Marco teórico

2.1 Estabilidad de Sistemas Eléctricos de Potencia

En la estabilidad de un SEP, se mira en la capacidad de un SEP, dada una condición inicial operativa, esta debe reestablecer su etapa de trabajo o armonía original luego de pasar por una perturbación de gran escala o pequeña que se encuentra en un SEP ya sea en los sistemas de distribución, generación y transmisión. Las variables del sistema deben llegar a nuevos valores estacionarios, así el sistema tiene la cabida de ajustarse a las condiciones cambiantes por dichas perturbaciones y poder funcionar de manera satisfactoria [1][15].

Un sistema de potencia puede ser inestable para una perturbación física y estable para otra, dicho eso no es práctico ni económico tener un SEP que sea estable para cada posible perturbación, para esto el sistema debe ser robusto, y con la capacidad de llegar a un nuevo estado de equilibrio [19] independiente del evento que suceda.

La estabilidad tradicionalmente se clasifica en: voltaje, de frecuencia y angular, la estabilidad de voltaje se clasifica en: corto y largo tiempo [1][20].

2.2 Estabilidad de Voltaje

Es la competencia de un SEP poder conservar los voltajes constantes en su totalidad de las barras del sistema eléctrico luego de pasar por una perturbación. Esta recuperación depende de la aptitud del sistema en restablecer la armonía que existe entre la generación y carga. También la inestabilidad de voltaje se puede dar en forma de caída sucesiva

de los voltajes de algunas barras [10][21]. Una posible causa de que haya inestabilidad de voltaje es la supresión de una carga grande en una específica área, la respuesta lenta de los transformadores con taps bajo carga o la desconexión del sistema de transmisión [2].

La caída sucesiva de los voltajes en las barras, igualmente puede asociarse con la inestabilidad que se tiene en el ángulo del rotor, por el contrario, el tipo de desplome de voltaje que esté relacionada para que haya inestabilidad del voltaje involucra pérdida de cargas y esta se puede dar cuando la estabilidad del ángulo del rotor no esté siendo un problema [4][22].

El colapso de voltaje se da por una secuencia de eventos que están ligados a una disminución progresiva de la magnitud del voltaje, debido a incrementos de carga en un área principalmente [1][3][19]. Uno de los factores que aportan a la inestabilidad del voltaje es el flujo de potencia reactiva y potencia activa que atraviesa por las líneas de transmisión, esto limita la transferencia total de potencia y por ende el soporte de voltaje por potencia reactiva [1][6][23].

2.2.1 De corto plazo

Estudia la dinámica de los mecanismos del SEP en períodos de tiempo muy pequeños, como resultado de eventos que afectan al voltaje, como cortocircuitos, rechazos de carga, conexión de compensación reactiva, energización de elementos y demás [24]. Este estudio se lo realiza en régimen transitorio, fundamentado en una representación matemática del SEP mediante ecuaciones diferenciales [1][25].

2.2.2 De largo plazo

Implica al estudio de equipos de acción lenta como es el transformador con taps bajo carga, cargas controladas por

termostatos, limitadores de corriente de los generadores entre otros. Este estudio se lo realiza en orden de los minutos [6][23].

La inestabilidad de voltaje esta se da por la pérdida de equilibrio a largo plazo; como por ejemplo el aumento de carga en cambios de demanda media a máxima [26]. A largo plazo se emplea un análisis estático, donde la representación del sistema es en estado estacionario, eliminando la dependencia del tiempo en las variables de estado. Las curvas PV son una herramienta que permite de forma gráfica observar el comportamiento del voltaje en cada barra de carga del sistema de potencia, encontrando así el punto de colapso de voltaje en una barra de forma gráfica [1][6].

2.3 Transformadores con taps

El transformador con taps es una máquina eléctrica que tiene por función elevar el voltaje para propósitos de transmisión de energía o disminuir el mismo para adecuarlo a las necesidades de consumo de los usuarios [8][12]. Estos propósitos pueden ser alcanzados de mejor manera, si el transformador tiene relación de espiras variable. El OLTC tiene la función de realizar cambios de tap para mantener un voltaje constante y de valor adecuado en una barra de acuerdo a las necesidades de operación, las cuales pueden ser incrementos o decrementos de la dimensión de voltaje en función siempre de dicha carga [8][9]. En horas de demanda máxima es necesario elevar el voltaje, caso que no se realiza en horas de demanda mínima.

2.3.1 Control directo

El control directo describe la variación de voltaje que se obtiene en la barra secundaria (V_2), después que se haya realizado una variación en el tap del lado secundario del transformador, como se

indica a continuación en la Figura 1 [13][27].

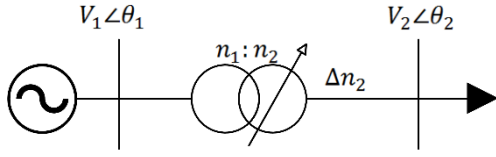


Figura 1. Control directo [28].

$$\bar{V}_2 = \frac{n_2}{n_1} \bar{V}_1 \quad (1)$$

$$\bar{V}_2 = \frac{n_2 + \Delta n_2}{n_1} \bar{V}_1 \quad (2)$$

El cambio de magnitud de voltaje se da por:

- Si Δn_2 es positivo $\rightarrow \bar{V}_2$ aumenta en magnitud.
- Si Δn_2 es negativo $\rightarrow \bar{V}_2$ disminuye en magnitud.

Donde:

V_1 : Magnitud de Voltaje en barra 1.
 θ_1 : Ángulo del Voltaje en barra 1.
 V_2 : Magnitud de Voltaje en barra 2.
 θ_2 : Ángulo del Voltaje en barra 2.
 $n_1:n_2$: Relación de Transformación
 Δn_2 : Cambio de tap en el lado 2.

2.3.2 Control inverso

El control inverso describe el cambio de dimensión del voltaje en la barra secundaria (V_2), por un cambio en el tap que se encuentra en el devanado opuesto a continuación se muestra en la Figura 2 [28].

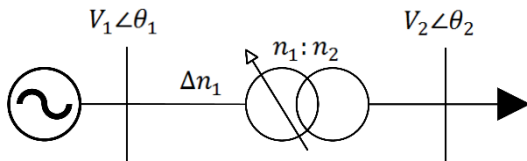


Figura 2. Control inverso [28].

$$\frac{\bar{V}_1}{n_1} = \frac{\bar{V}_2}{n_2} \quad (3)$$

$$\bar{V}_2 = \frac{n_2}{n_1 + \Delta n_1} \bar{V}_1 \quad (4)$$

El cambio de magnitud de voltaje se da por:

- Si Δn_1 es positivo $\rightarrow \bar{V}_2$ disminuye en magnitud
- Si Δn_1 es negativo $\rightarrow \bar{V}_2$ aumenta en magnitud

Donde:

V_1 : Magnitud de Voltaje en barra 1.
 θ_1 : Ángulo del Voltaje en barra 1.
 V_2 : Magnitud de Voltaje en barra 2.
 θ_2 : Ángulo del Voltaje en barra 2.
 $n_1:n_2$: Relación de Transformación
 Δn_1 : Cambio de tap en el lado 1.

2.3.3 Modelo generalizado del transformador con taps.

Este modelo se lo utiliza en los transformadores de potencia con taps, y es un circuito equivalente Pi, que permite representar de forma matemática los taps de cada lado del transformador ya sea en el primario y secundario. El modelo Pi se obtiene desde las igualdades planteadas de corriente y voltaje que se da en un cuadripolo que representa un transformador, con sus impedancias de dispersión en cada devanado, despreciando la rama de magnetización y con relación de número de vueltas $n_1:n_2$ [29], como se muestra en la Figura 3.

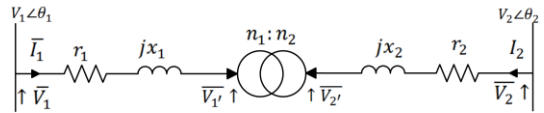


Figura 3. Transformador con taps diagrama del modelo generalizado [28].

De la siguiente manera, se indica el progreso del modelo Pi, con el diagrama de la Figura 3. La relación de voltajes se establece como:

$$\frac{\bar{V}'_1}{n_1} = \frac{\bar{V}'_2}{n_2} \quad (5)$$

$$\frac{\bar{V}_1 - \bar{I}_1 \bar{z}_1}{n_1} = \frac{\bar{V}_2 - \bar{I}_2 \bar{z}_2}{n_2} \quad (6)$$

Por lo que la corriente por el lado primario y secundario del transformador está dada por.

$$\frac{\bar{I}_1}{n_2} = -\frac{\bar{I}_2}{n_1} \quad (7)$$

$$\bar{I}_1 = -\bar{I}_2 \frac{n_2}{n_1} \quad (8)$$

$$\bar{I}_2 = -\bar{I}_1 \frac{n_1}{n_2} \quad (9)$$

Se introduce la ecuación (9) en la ecuación (6), y se obtiene:

$$\bar{I}_1 = \frac{n_2[n_1(\bar{V}_1 - \bar{V}_2) + \bar{V}_1(n_2 - n_1)]}{n_1^2 \bar{z}_2 + n_2^2 \bar{z}_1} \quad (10)$$

Desglosando los términos que son independientes se obtiene:

$$\bar{y} = \frac{1}{n_1^2 \bar{z}_2 + n_2^2 \bar{z}_1} \quad (11)$$

Entonces si la resistencia se considera despreciable, la admitancia \bar{y} puede escribirse como:

$$\bar{y} = -j \frac{1}{n_1^2 x_1 + n_2^2 x_2} \quad (12)$$

Al denominador de la igualdad (12) se le nombra con X_e por lo tanto se tiene que:

$$\bar{y} = -j \frac{1}{X_e} \quad (13)$$

Remplazando la ecuación (13) en (10):

$$\bar{I}_1 = n_1 n_2 (\bar{V}_1 - \bar{V}_2) \bar{y} + n_2 (n_2 - n_1) \bar{V}_1 \bar{y} \quad (14)$$

Así se encuentra la bifurcación serie y paralelo izquierda del modelo pi del transformador con taps de la Figura 3. Un procedimiento análogo debe llevarse a cabo para determinar la rama paralelo derecha. Para este fin se plantea la ecuación (15) que representa la corriente I_2 .

$$\bar{I}_2 = -\bar{I}_1 \frac{n_1}{n_2} \quad (15)$$

$$\bar{I}_2 = n_1 n_2 (\bar{V}_2 - \bar{V}_1) \bar{y} + n_1 (n_1 - n_2) \bar{V}_2 \bar{y} \quad (16)$$

Es así que la bifurcación paralelo derecha es encontrada, y estableciendo el modelo Pi de la Figura 4 [28].

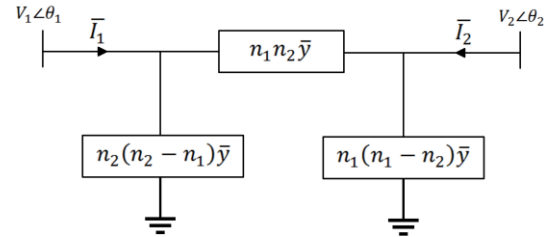


Figura 4. Transformador con taps modelo pi [28].

3 Modelo matemático del Método de Continuación de Flujos de Potencia

El método de continuación de flujos de potencia (CPF) es una herramienta matemática aplicada a la Ingeniería Eléctrica que permite llevar a cabo un planteamiento para al análisis de estabilidad de voltaje en términos estacionarios por medio de una curva de Potencia-Voltaje (PV), para esto se realizan múltiples cálculos iterativos para los flujos de potencia. En este método se emplea el método de Newton-Raphson (NR) añadiendo en el algoritmo de pasos de predicción y corrección [30].

La curva PV es la analogía entre lapotencia activa y dimensión del voltaje, esta es una herramienta para establecer el

margen de estabilidad de voltaje en etapa permanente en un SEP en el largo plazo, a partir de un punto de trabajo en MW al limite de colapso de voltaje [22], como a continuación se indica en la Figura 5.

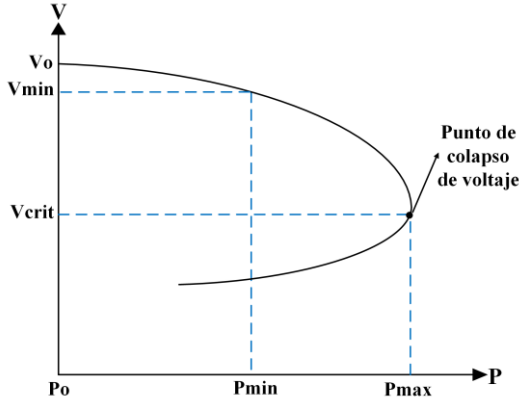


Figura 5. Curva PV [15][22].

En este trabajo se emplea el método CPF con el objetivo de encontrar una solución al flujo de potencia en el SEP para cada condición de carga, es decir cuando la misma varíe el voltaje de la barra puede alcanzar su punto de colapso, en este caso por un incremento de carga.

El método CPF realiza dos pasos, el primero de predicción el segundo de corrección, ambos para encontrar un siguiente punto de operación en la curva PV para cualquier barra del sistema de potencia [31].

Para este efecto, se toma como partida las igualdades de potencia reactiva y activa para todas las barras del sistema, añadiendo el factor de carga (μ) [14][31].

$$P_i = P_{Gi} - P_{Di} \quad (17)$$

$$Q_i = Q_{Gi} - Q_{Di} \quad (18)$$

Entonces incluyendo factor de carga se tiene:

$$\Delta P = P^{\text{especificado}} + \mu P_D - P^{\text{calculado}} \quad (19)$$

$$\Delta Q = Q^{\text{especificado}} + \mu Q_D - Q^{\text{calculado}} \quad (20)$$

Por lo que las ecuaciones algebraicas no lineales (19) y (20) sustituidas en (17) y (18) se pueden representar de la siguiente manera:

$$f(\theta, V, \mu) = 0 \quad (21)$$

Donde:

θ : Angulo de los voltajes en la barra.

V : Magnitud de voltaje en la barra.

μ : Factor de carga.

3.1.1 Paso de predicción

Este paso del método CPF se emplea para obtener la longitud del arco ya parametrizado para la cual se define como $s \equiv \mu$, por consiguiente para obtener un paso genérico i y dar solución $(y^{(i)}, \mu^{(i)})$ [32], se aplica la siguiente relación para la obtención del grafico ψ :

$$\left. \frac{\partial \psi}{\partial \mu} \right|_i = 0 = \psi_y \Big|_i \frac{\partial y}{\partial \mu} \Big|_i + \psi_\mu \Big|_i \quad (22)$$

Por consiguiente, el vector dirección tangente para dar solución a $(y^{(i)}, \mu^{(i)})$, se puede aproximar con:

$$\lambda^{(i)} = \left. \frac{\partial y}{\partial \mu} \right|_i \approx \frac{\Delta y^{(i)}}{\Delta \mu^{(i)}} \quad (23)$$

Reemplazando (22) en (23) se tiene:

$$\Delta y^{(i)} = \lambda^{(i)} \Delta \mu^{(i)} \quad (24)$$

El parámetro k indica el tamaño correcto al paso de predicción y para poder determinar el incremento en $\Delta y^{(i)}$ y $\Delta \mu^{(i)}$, mediante la normalización de la ecuación $\left\| \left(\frac{\partial y}{\partial s}, \frac{\partial \mu}{\partial s} \right) \right\|_2 = 1$, por consiguiente se acorta el tamaño del paso de predicción, aproximándose así al punto de colapso.

$$\Delta\mu^{(i)} = \frac{k}{\|\lambda^{(i)}\|_2} \quad (25)$$

$$\Delta y^{(i)} = \frac{k\lambda^{(i)}}{\|\lambda^{(i)}\|_2} \quad (26)$$

Para la cual la variable k indica si aumenta o disminuye μ . Al realizar una curva PV completa se tiene que $k > 0$ se ubica en la parte superior y $k < 0$ en la parte inferior. En la Figura 6 se indica una representación gráfica del paso de predicción [19][28].

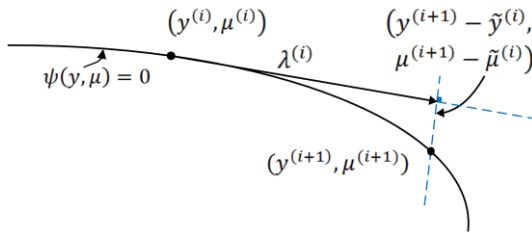


Figura 6. Tangente predictor [19][28].

3.1.2 Paso de Corrección.

Se realiza el cálculo del nuevo punto $(y^{(i+1)}, \mu^{(i+1)})$. Para obtener los valores del mismo se obtiene con la solución de $f(y, \mu) = 0$. Esta ecuación también indica la particularidad del Jacobiano al alcanzar el límite del colapso [30].

$$f(y, \mu) = \begin{bmatrix} \Delta y^{(i)} \\ \Delta \mu^{(i)} \end{bmatrix}^T \begin{bmatrix} y - \tilde{y}^{(i)} \\ \mu - \tilde{\mu}^{(i)} \end{bmatrix} \quad (27)$$

Entonces para la parametrización local el parámetro μ o una variable y_k son forzados a ser un valor ya asignado con las ecuaciones (28) y (29).

$$f(y, \mu) = \mu - \tilde{\mu}^{(i)} \quad (28)$$

$$f(y, \mu) = y_k - \tilde{y}_k^{(i)} \quad (29)$$

La elección de la variable a ser asignada depende de la variedad de la división en dos ramales de la curva, como se indica en la Figura 7 [19][28].

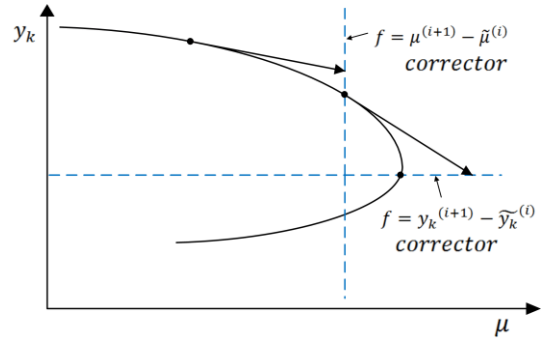


Figura 7. Intersección perpendicular [19][28].

4 Incorporación del modelo de transformador con taps en el método de continuación de flujos de potencia

Se tiene el propósito de analizar los efectos, sean estos positivos o negativos, de la presencia de un transformador con taps en el estudio de la estabilidad de voltaje de tiempo largo, el modelo generalizado desarrollado se integra en el también desarrollado método CPF para la elaboración de curvas PV sobre un SEP general.

Para el modelo planteado, se realiza en un programa computacional en Matlab. A continuación, en la Tabla 1 se indica el pseudocódigo del transformador con taps que se ha incluido al método de continuación de flujos de potencia.

5 Análisis de resultados

El estudio consiste en una comparación de resultados del punto crítico del voltaje con un SEP sin la inclusión de transformadores con taps y con el mismo sistema de potencia, pero con la inclusión de transformadores con taps.

Además, se integran los conceptos de control directo e inverso en la operación de transformadores con taps a fin de evaluar como estos tipos de control influyen en el punto crítico del voltaje.

Tabla 1. Pseudocódigo del método de continuación con la inclusión de transformadores con taps.

Pseudocódigo
Paso 1: Ingreso de Datos del sistema de potencia IEEE 9 barras.
Paso 2: Ingreso de datos de los transformadores con Taps.
Paso 3: Construcción de la matriz de datos de los transformadores con tap con el modelo π .
Paso 4: Construcción de la Ybarra con la inclusión de los transformadores con taps.
Paso 5: Resolución del flujo de potencia por método de Newton-Raphson.
Paso 6: Elige la barra en la que se realiza el estudio.
Paso 7: Obtener el vector de datos $f(\theta, V, \mu) = 0$, con el caso base, de la resolución del flujo.
Paso 8: Formar la matriz Jacobiano [J].
Paso 9: Paso de predicción Obtener el parámetro de continuación.
$\Delta y^{(i)} = \frac{k\lambda^{(i)}}{\ \lambda^{(i)}\ _2}$
Paso 10: Obtener las variables de estado $\Delta y = \Delta\lambda \frac{dz}{d\lambda}$.
Paso 11: Recalculo de la potencia activa y reactiva.
Paso 12: Paso de corrección. Cálculo del estado estacionario y singularidad del Jacobiano respectivamente $(y^{(i+1)}, \mu^{(i+1)})$.
Paso 13: Cálculo de la condición de fase.
$f(y, \mu) = y_k - \tilde{y}_k^{(i)}$
Paso 14: Guardar los valores y regresar al paso 9, hasta cumplir con el valor con la condición del punto de colapso.
Paso 15: Dibujar la curva PV con los datos obtenidos.

5.1 Caso de Estudio

Como red de prueba del modelo desarrollado, se emplea el sistema de potencia IEEE 9 barras, indicado en la Figura 8.

En los siguientes puntos se describen los casos de estudio propuestos para llevar a cabo un estudio de estabilidad de voltaje sobre este SEP, considerando que los tres transformadores disponibles son

representados por su modelo Π , donde es posible tener taps continuos tanto en el primario, como en el secundario o ambos devanados.

En primera instancia y para los casos propuestos se encuentran las curvas PV sin considerar presencia de relación de vueltas variable en los transformadores. Se seleccionan las barras 4, 7 y 9 para efectos de analizar el punto crítico del voltaje dado que a las respectivas barras que corresponden a los terminales de alto voltaje de los transformadores para el sistema presente puesto a prueba.

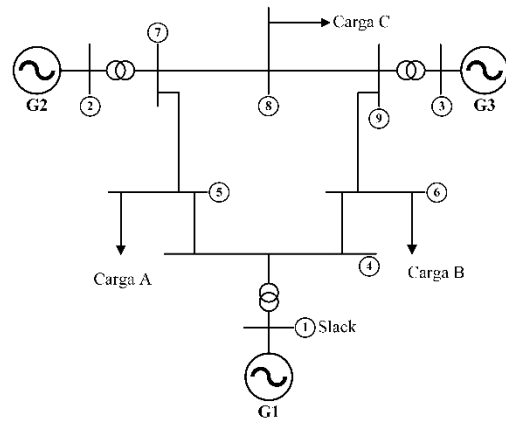


Figura 8. Sistema de potencia de 9 barras IEEE [12].

5.1.1 Caso (a)

La Tabla 2, presenta las posiciones seleccionadas para los taps primarios y secundarios, en este caso con valores mayores a 1. En el control directo la posición n_j es 1, mientras que en control inverso la posición n_i es 1.

Tabla 2. Taps primario y secundario. Caso (a)

Transformador	Control directo	Control inverso
1	$n_i = 1.030$	$n_j = 1.027$
2	$n_i = 1.017$	$n_j = 1.015$
3	$n_i = 1.025$	$n_j = 1.023$

Una vez realizada la simulación en Matlab con el modelo desarrollado, se obtienen las curvas PV de las figuras siguientes.

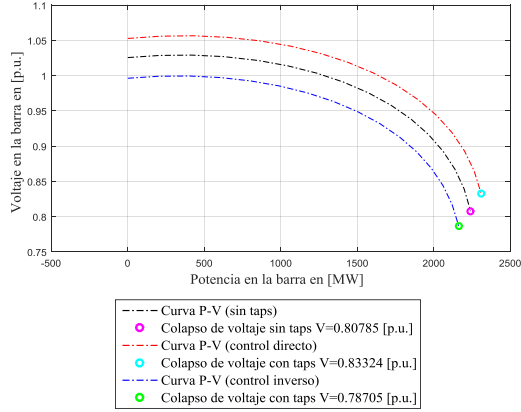


Figura 9. Curva PV caso (a) en la barra 4.

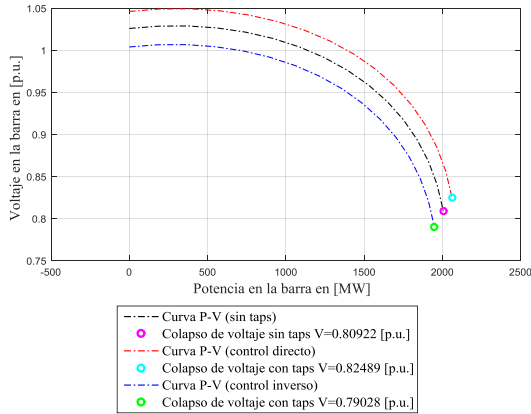


Figura 10. Curva PV caso (a) en la barra 7.

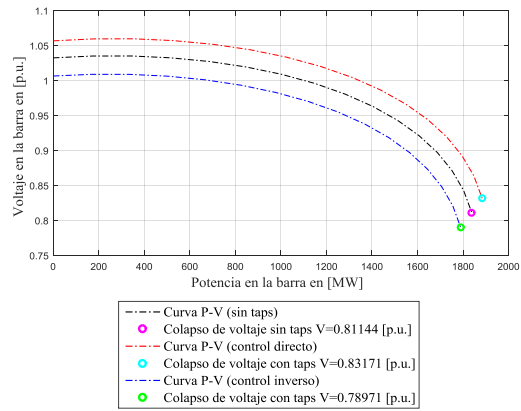


Figura 11. Curva PV caso (a) en la barra 9.

5.1.2 Caso (b)

La Tabla 3, presenta las posiciones para los taps primarios y secundarios, en este caso con valores menores a 1. En el control directo la posición n_j es 1, mientras que en control inverso la posición n_i es 1.

Tabla 3. Taps primario y secundario. Caso (b)

Transformador	Control directo	Control inverso
1	$n_i = 0.984$	$n_j = 0.978$
2	$n_i = 0.968$	$n_j = 0.959$
3	$n_i = 0.992$	$n_j = 0.989$

Luego de realizar la simulación se obtiene los siguientes resultados ilustrados en las siguientes figuras.

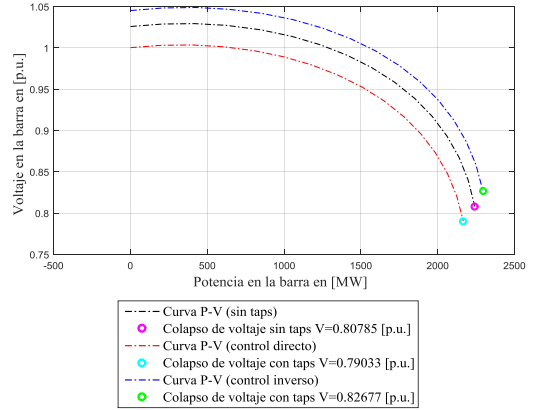


Figura 12. Curva PV caso (b) en la barra 4.

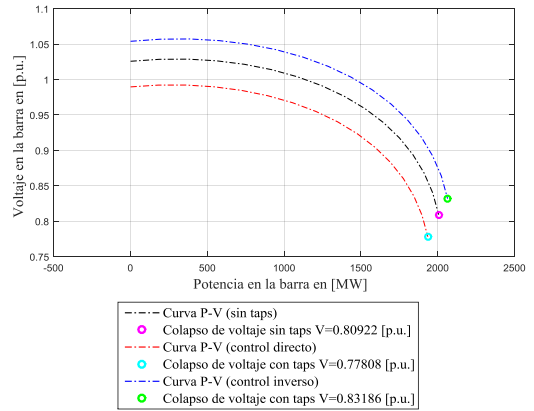


Figura 13. Curva PV caso (b) en la barra 7.

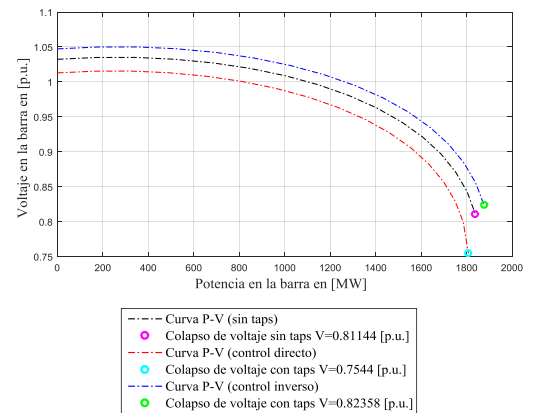


Figura 14. Curva PV caso (b) en la barra 9.

5.1.3 Análisis

En el caso (a), se puede observar que la curva original (sin taps) en el transformador llega a un punto de colapso que se indica en la Tabla 4, y al realizar la inclusión de los transformadores con taps se observa una curva PV de control directo el cual tiene un punto de colapso de voltaje superior al del original. Por otra parte, cuando se efectúa un control inverso el punto crítico del voltaje es menor que de la grafica original. Con control directo se desfavorece a la estabilidad del sistema, ya que colapso ocurre antes del caso original, situación contraria es la que sucede con control inverso.

En el caso (b), con las posiciones de taps en valores menores a 1, se puede apreciar en la Tabla 4 y las figuras respectivas que el punto crítico del voltaje ocurre tempranamente en el caso de un control inverso, siendo el control directo aquel que da un mayor soporte al SEP.

Tabla 4. Puntos de colapso de voltaje.

BARRA	Original [p.u.]	Caso (a) Directo [p.u.]	Caso (b) Directo [p.u.]	Caso (a) Inverso [p.u.]	Caso (b) Inverso [p.u.]
4	0.8079	0.8332	0.7903	0.7871	0.8267
7	0.8092	0.8249	0.7781	0.7903	0.8319
9	0.8114	0.8317	0.7544	0.7897	0.8235

Los efectos de tener presente transformadores con taps en un SEP se puede apreciar en el movimiento del punto de colapso de voltaje, este efecto de manera principal a la variación de la potencia reactiva, esto es que, la magnitud del voltaje depende de la potencia reactiva y al manipular la posición de los taps de transformadores, en sí se está afectando a la potencia reactiva, en casos descongestionando a las líneas de transmisión y dando así mayor espacio a la transmisión de potencia activa.

De las simulaciones realizadas y a partir de los resultados obtenidos, el caso (b) con control inverso es aquel que mejora la estabilidad de voltaje de tiempo largo del SEP, dado en el punto crítico del voltaje sucede en valores menores de voltaje comparado con los otros casos y controles.

6 Conclusiones

Los resultados de este trabajo permiten formular las siguientes conclusiones.

El modelo implementado en este documento al realizar la inclusión de transformadores con taps permite estudiar el efecto de los mismos en un SEP bajo condiciones estacionarias.

El constante cambio de demanda genera una inestabilidad en el sistema desde el ámbito del voltaje, siendo necesario estudiar la estabilidad de voltaje con herramientas como las curvas PV que son construidas con el método CPF, del cual se puede obtener información para los operadores de los SEP sobre la cercanía o lejanía del punto de trabajo con el punto crítico del voltaje.

La presencia de transformadores con taps mueve de manera favorable o desfavorable en el punto crítico del voltaje de un SEP, lo que se ha encontrado en los resultados de manera esperada; por lo que el modelo desarrollado puede ser implementado para analizar las posibles combinaciones de taps en sistemas reales, encontrando el punto de funcionamiento y tipo de control de los transformadores que mejore la estabilidad por voltaje de la red.

6.1 Trabajos Futuros

El producto del presente trabajo puede ser empleado a dar lugar de partida para tópicos relacionados a:

Estabilidad de voltaje por medio de análisis de sensibilidad dada la influencia directa de los transformadores con taps en

el redireccionamiento de la potencia reactiva del SEP.

Seteo cuasi-óptimo de la posición del tap del transformador para propósitos de reducción de mermas de potencia activa en sistemas de potencia.

7 Referencias

- [1] E. a. P. Kundur, J. Paserba *et al.*, “Definition and classification of power system stability,” *IEEE Trans. Power Syst.*, vol. 19, no. 3, pp. 1387–1401, 2004.
- [2] R. Rincón, A. Pavas, and E. Mojica-Nava, “Long-term voltage stability analysis and network topology in power systems,” *IEEE PES Innov. Smart Grid Technol. Conf. Eur.*, 2017.
- [3] A. Singhal and V. Ajjarapu, “Long-term voltage stability assessment of an integrated transmission distribution system,” *2017 North Am. Power Symp. NAPS 2017*, 2017.
- [4] T. Han, Y. Chen, and J. Ma, “Multi-objective robust dynamic VAR planning in power transmission grids for improving short-term voltage stability under uncertainties,” *IET Gener. Transm. Distrib.*, vol. 12, no. 8, pp. 1929–1940, 2018.
- [5] E. Munkhchuluun and L. Meegahapola, “Impact of the solar photovoltaic (PV) generation on long-term voltage stability of a power network,” *2017 IEEE Innov. Smart Grid Technol. - Asia Smart Grid Smart Community, ISGT-Asia 2017*, pp. 1–6, 2018.
- [6] A. R. R. Matavalam and V. Ajjarapu, “Long term voltage stability thevenin index using voltage locus method,” *IEEE Power Energy Soc. Gen. Meet.*, vol. 2014–October, no. October, pp. 1–5, 2014.
- [7] F. L. Quilumba, G. E. Constante, J. A. Játiva, and W. J. Lee, “Distributed energy resources placement in distribution networks considering proximity to voltage collapse,” *IEEE Ind. Appl. Soc. - 51st Annu. Meet. IAS 2015, Conf. Rec.*, pp. 1–6, 2015.
- [8] T. X. Zhu, S. K. Tso, and K. L. Lo, “An investigation into the OLTC effects on voltage collapse,” *IEEE Trans. Power Syst.*, vol. 15, no. 2, pp. 515–521, 2000.
- [9] A. Dyantyi, N. Mbuli, and J. H. C. Pretorius, “Effect of the tap changer position of Zeus 765/400kV transformer on the steady state and voltage stability performance of the Cape system,” *2012 11th Int. Conf. Environ. Electr. Eng. IEEEIC 2012 - Conf. Proc.*, pp. 563–567, 2012.
- [10] M. Davies, “The impact of transformer tap-changer operation on voltage collapse,” *2013 Australas. Univ. Power Eng. Conf.*, no. October, pp. 1–4, 2014.
- [11] T. A. V. Ram and K. M. Haneesh, “Voltage stability analysis using L-index under various transformer tap changer settings,” *Proc. IEEE Int. Conf. Circuit, Power Comput. Technol. ICCPCT 2016*, 2016.
- [12] P. M. Anderson and A. A. Fouad, *Power System Control and Stability*, vol. 15, no. 3. 2008.
- [13] D. E. R. Rendón, Y. S. Restrepo, and A. M. Cabrera, “Transformador monofásico de distribución y de potencia, modelamiento con taps,” *Sci. Tech.*, vol. 3, no. 29, pp. 13–18, 2005.
- [14] A. B. Neto and D. A. Alves, “Singularities Analysis of the

- Jacobian Matrix Modified in the Continuation Power Flow: Mathematical Modeling,” *IEEE Lat. Am. Trans.*, vol. 14, no. 12, pp. 4750–4756, 2016.
- [15] D. Sánchez and C. Barrera, “Estabilidad de voltaje en sistemas eléctricos de potencia incluyendo curvas de capacidad para líneas de transmisión basado en el método cpf.” p. 30, 2018.
- [16] B. Wang, C. Liu, and K. Sun, “Multi-stage holomorphic embedding method for calculating the power-voltage curve,” *IEEE Trans. Power Syst.*, vol. 33, no. 1, pp. 1127–1129, 2018.
- [17] A. Bonini Neto and D. Amancio Alves, “Singularities Analysis of the Jacobian Matrix Modified in the Continuation Power Flow: Performance Evaluation,” *IEEE Lat. Am. Trans.*, vol. 15, no. 11, pp. 2137–2143, 2016.
- [18] S. Kabir, M. Nadarajah, and R. Bansal, “Impact of large scale photovoltaic system on static voltage stability in sub-transmission network,” *2013 IEEE ECCE Asia Downunder - 5th IEEE Annu. Int. Energy Convers. Congr. Exhib. IEEE ECCE Asia 2013*, no. October 2013, pp. 468–473, 2013.
- [19] 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.
- [20] A. Oleas and C. Barrera, “Control de Voltaje en Sistemas Eléctricos de Potencia.” p. 86, 2012.
- [21] T. Ngo, Q. Nguyen, and S. Santoso, “Voltage stability of low frequency AC transmission systems,” *Proc. IEEE Power Eng. Soc. Transm. Distrib. Conf.*, vol. 2016–July, pp. 1–5, 2016.
- [22] K. Kawabe and K. Tanaka, “Stability boundary on PV plane for analysis of short-term voltage stability,” *Proc. - 2014 Power Syst. Comput. Conf. PSCC 2014*, pp. 1–8, 2014.
- [23] R. R. Londero, C. D. M. Affonso, and J. P. A. Vieira, “Long-term voltage stability analysis of variable speed wind generators,” *IEEE Trans. Power Syst.*, vol. 30, no. 1, pp. 439–447, 2015.
- [24] Y. Dong, X. Xie, B. Zhou, and W. Yao, “Voltage-sag-severity-index based size planning of shunt capacitor banks to improve short-term voltage stability,” *IEEE Power Energy Soc. Gen. Meet.*, vol. 2015–Septe, no. 51322701, pp. 1–5, 2015.
- [25] K. Kawabe, Y. Ota, A. Yokoyama, and K. Tanaka, “Novel Dynamic Voltage Support Capability of Photovoltaic Systems for Improvement of Short-Term Voltage Stability in Power Systems,” *IEEE Trans. Power Syst.*, vol. 32, no. 3, pp. 1796–1804, 2017.
- [26] A. R. R. Matavalam and V. Ajarapu, “Calculating the long term voltage stability margin using a linear index,” *IEEE Power Energy Soc. Gen. Meet.*, vol. 2015–Septe, no. 2, pp. 1–5, 2015.
- [27] M. Bahadornejad and N. K. C. Nair, “Intelligent control of on-load tap changing transformer,” *IEEE Trans. Smart Grid*, vol. 5, no. 5, pp. 2255–2263, 2014.
- [28] A. R. Plummer, A. J. Hillis, and C. Perez-Collazo, *Power systems*. 2017.
- [29] H. Feng, K. Viereck, S. Breker, and J. Rudolph, “Approach for on-load

- tap-changer control based on intelligent voltage stability margin estimation by using local measurements,” *CIREC - Open Access Proc. J.*, vol. 2017, no. 1, pp. 952–955, 2017.
- [30] J. Henrique Canossa, A. Bonini Neto, D. Amancio Alves, F. Ferrari Putti, and L. R. Almeida Gabriel Filho, “Development of an Interactive Program to Study of the Continuation Power Flow,” *IEEE Lat. Am. Trans.*, vol. 16, no. 4, pp. 1227–1235, 2018.
- [31] D. Mehta, H. Nguyen, and K. Turitsyn, “Numerical Polynomial Homotopy Continuation Method to Locate All The Power Flow Solutions,” vol. 10, pp. 2972–2980, 2014.
- [32] B. S. Adusumilli and B. Kalyan Kumar, “Modified affine arithmetic based continuation power flow analysis for voltage stability assessment under uncertainty,” *IET Gener. Transm. Distrib.*, vol. 12, no. 18, pp. 4225–4232, 2018.

7.1 Matriz de Estado del Arte

Tabla 5. Matriz del estado del arte

ESTABILIDAD DE VOLTAJE EN SISTEMAS DE TRANSMISION CONSIDERANDO LA OPERACIÓN DE TRANSFORMADORES CON TAPS																						
ITEM	AÑO	TÍTULO DEL ARTICULO	CITAS	TEMÁTICA					FORMULACION DEL PROBLEMA				RESTRICCIONES DEL PROBLEMA			ALGORITMOS				SOLUCIÓN PROPUESTA		
				Estabilidad de Voltaje	Transformadores con taps	Modelo pi del transformador con taps	Flujos de potencia	Flujos de Potencia Continuada	Variacion de Potencia en generacion y carga	Control del transformador con taps	Estudio de estabilidad de voltaje con las curvas PV	Modelacion de CPF	Inestabilidad de voltaje en las barras	Perturbacion en el sistema	Cargabilidad en el sistema	Modelo pi de transformador	Flujo de potencia, Newton Raphson	Flujos de potencia continuados	Modelos de iteracion	Punto maximo de colapso d voltaje	Modelacion de la inclusion de transformadores con taps al sistema	Modelacion de flujos de potencia mediante el metodo de CPF
1	2004	Definition and classification of power system stability	2628	☒	☐	☐	☐	☐	☒	☐	☐	☐	☒	☒	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☒
2	2016	Long-term voltage stability analysis and network topology in power systems	2	☒	☐	☐	☒	☒	☐	☐	☒	☒	☐	☒	☐	☐	☐	☒	☒	☐	☒	☒
3	2018	Multi-objective robust dynamic VAR planning in power transmission girds for improving short-term voltage stability under uncertainties	3	☒	☐	☐	☐	☐	☒	☐	☐	☐	☒	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☒	☐	☒
4	2017	Long-term voltage stability assessment of an integrated transmission distribution system	9	☒	☐	☐	☒	☒	☐	☐	☒	☒	☐	☐	☒	☐	☐	☐	☐	☒	☐	☒
5	2017	Impact of the solar photovoltaic (PV) generation on long-term voltage stability of a power network	0	☒	☒	☐	☒	☐	☐	☐	☐	☐	☒	☒	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☒	☒
6	2015	Long-term voltage stability analysis of variable speed wind generators	59	☒	☐	☐	☒	☐	☐	☐	☒	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☒	☐	☒
7	2014	Stability boundary on PV plane for analysis of short-term voltage stability	2	☒	☐	☐	☒	☒	☐	☐	☐	☒	☒	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☒	☐	☒
8	2017	Novel Dynamic Voltage Support Capability of Photovoltaic Systems for Improvement of Short-Term Voltage Stability in Power Systems	17	☒	☐	☐	☒	☐	☐	☐	☒	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☒	☐	☒
9	2017	Voltage stability of low frequency AC transmission systems	0	☒	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☒
10	2014	Intelligent control of on-load tap changing transformer	13	☐	☒	☐	☐	☐	☒	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐

7.2 Resumen de Indicadores

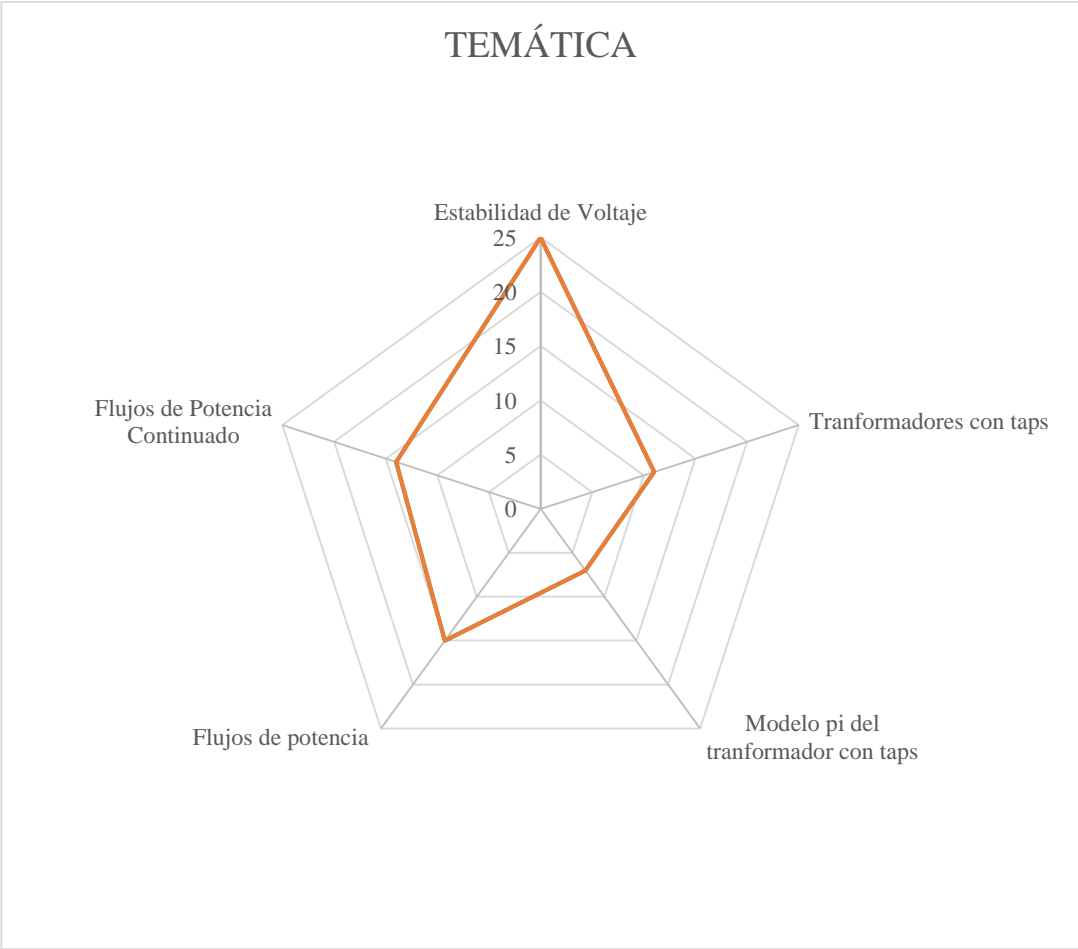


Figura 15. Resumen e indicador de la temática - estado del arte

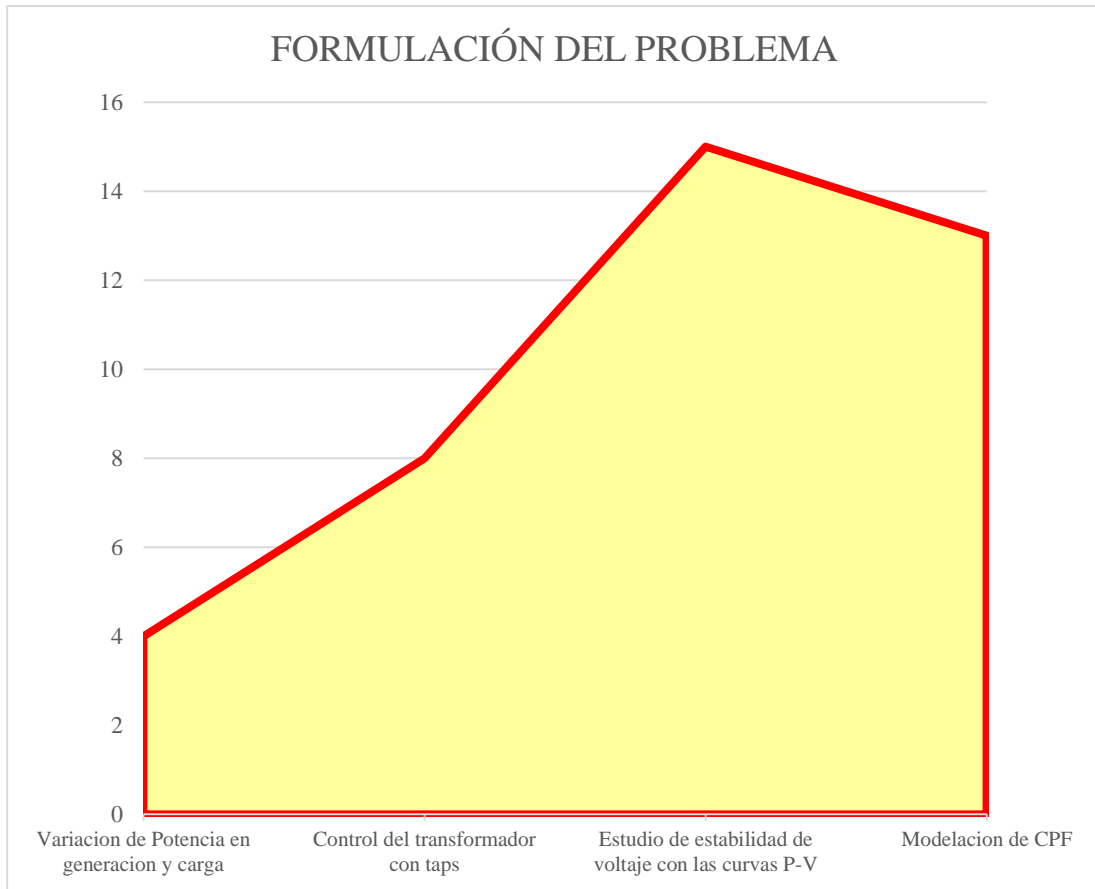


Figura 16. Indicador de formulación del problema - estado del arte.

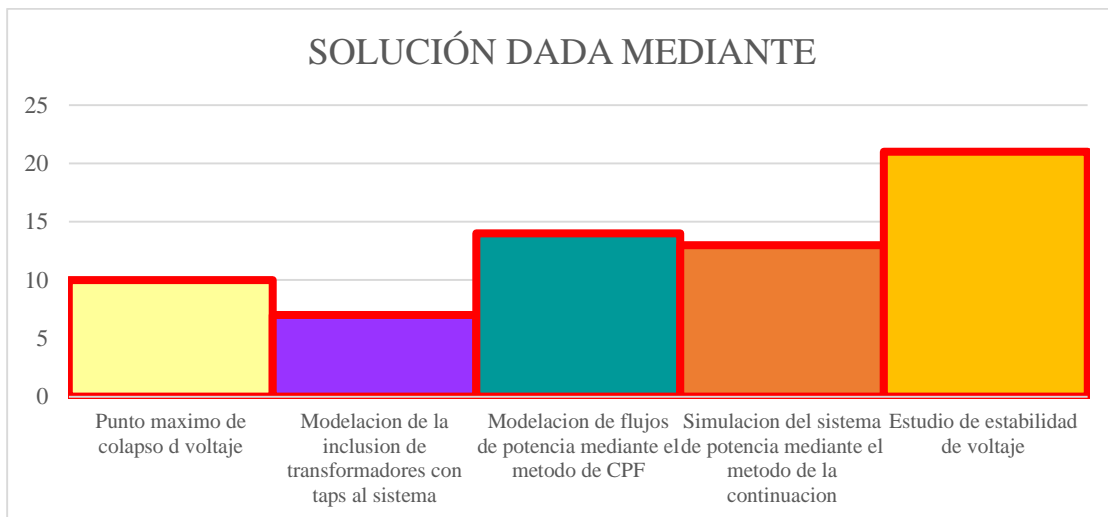


Figura 17. Indicador de solución - estado del arte

8 Anexos

Tabla 6. Datos del sistema de la IEEE 9 barras en [p.u.]

Datos del Sistema de Potencia								
Tipo de Barras: 1 - Barra de Referencia (Slack) 2 - Barra de Voltaje (PV) 3 - Barra de Carga (P-Q)								
Barra N°	Voltaje	Angulo	Pg	Qg	Pc	Qc	Tipo	Ycomp
1	1.04	0	0	0	0	0	1	0
2	1.025	0	1.63	0	0	0	2	0
3	1.025	0	0.85	0	0	0	2	0
4	1	0	0	0	0	0	3	0
5	1	0	0	0	1.25	0.5	3	0
6	1	0	0	0	0.9	0.3	3	0
7	1	0	0	0	0	0	3	0
8	1	0	0	0	1	0.35	3	0
9	1	0	0	0	0	0	3	0

Tabla 7. Datos de las líneas del sistema IEEE 9 barras en [p.u.]

Datos de Línea del Sistema				
Barra i	Barra j	R	X	Y
7	8	0.0085	0.072	0.149
8	9	0.0119	0.1008	0.209
7	5	0.032	0.161	0.306
5	4	0.01	0.085	0.176
9	6	0.039	0.17	0.358
6	4	0.017	0.092	0.158

Tabla 8. Datos de transformadores del sistema IEEE 9 barras en [p.u.]

Datos de los Transformadores del Sistema					
Barra i	Barra j	ni	nj	xi	xj
1	4	1	1	0,0576	0
2	7	1	1	0,0625	0
3	9	1	1	0,0586	0