

**CONTROL DE VOLTAJE MEDIANTE TRANSFORMADORES CON TAPS
USANDO UNA REPRESENTACIÓN DE VARIABLE DISCRETA**

**UNIVERSIDAD POLITÉCNICA SALESIANA
SEDE QUITO**

**CARRERA:
INGENIERÍA ELÉCTRICA**

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

**TEMA:
CONTROL DE VOLTAJE MEDIANTE TRANSFORMADORES CON TAPS
USANDO UNA REPRESENTACIÓN DE VARIABLE DISCRETA**

**AUTOR:
JAIR JOSUÉ SALAZAR LOPEZ**

**TUTOR:
CARLOS ANDRÉS BARRERA SINGAÑA**

Quito, agosto 2020

Jair Josué Salazar Lopez

**CONTROL DE VOLTAJE MEDIANTE TRANSFORMADORES CON TAPS
USANDO UNA REPRESENTACIÓN DE VARIABLE DISCRETA**

Universidad Politécnica Salesiana, Quito – Ecuador 2020

Ingeniería Eléctrica

Breve reseña histórica e información de contacto.



Jair Josué Salazar Lopez (Y'1995). Realizó sus estudios de nivel secundario en el Colegio Fiscomisional “San José” de la ciudad del Tena. Egresado de Ingeniería Eléctrica de la Universidad Politécnica Salesiana. Su trabajo se basa en el estudio de control de voltaje mediante transformadores con taps en sistemas eléctricos de potencia. jsalazar13@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 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

©2020 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 “*CONTROL DE VOLTAJE MEDIANTE TRANSFORMADORES CON TAPS USANDO UNA REPRESENTACIÓN DE VARIABLE DISCRETA*” realizado por Jair Josué Salazar Lopez, 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 2020



.....
Carlos Andrés Barrera Singaña

C.C.: 0503503336

CESIÓN DE DERECHOS DE AUTOR

Yo, Jair Josué Salazar Lopez, con documento de identificación N° 1500791734, 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: “*CONTROL DE VOLTAJE MEDIANTE TRANSFORMADORES CON TAPS USANDO UNA REPRESENTACIÓN DE VARIABLE DISCRETA*”, 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 digital a la Biblioteca de la Universidad Politécnica Salesiana.

Quito, D.M., agosto de 2020



.....
Jair Josué Salazar Lopez

C.C.: 1500791734

1. ÍNDICE GENERAL

1	Introducción	2
2	Marco teórico	3
2.1	Control de voltaje en el (SEP).....	3
2.1.1	Transformadores con taps	3
2.1.2	Regulador de voltaje en transformadores	4
2.1.3	Bancos de capacitores e inductores	5
2.1.4	FACTS	6
2.1.5	Líneas de transmisión en vacío	7
2.2	Modelo estacionario del transformador con taps	8
2.3	Modelo de control del transformador con taps.....	8
3	Implementación de los modelos	9
3.1	Flujo de potencia	9
3.2	Sistema de control	10
3.2.1	Control directo.....	10
3.2.2	Control inverso	10
4	Sistemas de prueba	11
4.1	Sistema de prueba 1	11
4.2	Sistema de prueba 2.....	11
5	Análisis de resultados	12
5.1	Estado estacionario.....	13
5.2	Estado Dinámico	14
6	Conclusiones	16
6.1	Trabajos futuros.....	16
7	Referencias	16
7.1	Matriz de Estado del Arte.....	19
7.2	Resumen de Indicadores.....	22
8	Anexos.....	24

2. ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1. Principal operación de un cambiador de tap.....	4
Figura 2. Curva de regulación de voltaje (RV) vs el ángulo para transformador en carga nominal real.....	4
Figura 3. Conexión de banco de capacitores.....	5
Figura 4. Línea conectada a un sistema débil.	5
Figura 5. Inductores conectados a la barra y línea.	5
Figura 6. Inductores conectados a la línea y transformador.....	6
Figura 7. Clasificación de los dispositivos FACTS.	6
Figura 8. TCR: Inductor controlado por Tiristores.	6
Figura 9. TCSC: Capacitores serie controlados por Tiristores.	6
Figura 10. Modelo equivalente π de una línea de transmisión.....	7
Figura 11. Transformador conectado entre la barra i y j para el modelo estacionario con taps.	8
Figura 12. Modelo para tap del transformador en el lado i y j.....	8
Figura 13. Diagrama del modelo discreto en estado dinámico	9
Figura 14. Matriz Jacobiana para taps de transformadores.....	10
Figura 15. Control directo	10
Figura 16. Control inverso	11
Figura 17. Sistema de barras IEEE de 14.....	11
Figura 18. Sistema de barras IEEE de 39.....	11
Figura 19. Metodología aplicada en la condición estacionaria	12
Figura 20. Metodología aplicada en la condición dinámica	12
Figura 21. Voltajes iniciales vs Control de voltaje en la barra 6	13
Figura 22. Voltajes iniciales vs Control de voltaje en la barra 34 y 35	14
Figura 23. Variación de la magnitud de voltaje en la barra 5	15
Figura 24. Variación de la posición del tap del transformador conectado entre las barras 5-6	15
Figura 25. Magnitud de voltaje en la barra 20 y 34	15
Figura 26. Variación de la posición del tap del transformador conectado entre las barras 20-34	15

Figura 27. Magnitud de voltaje en la barra 22 y 35	15
Figura 28. Variación de la posición del tap del transformador conectado entre las barras 22-35	16
Figura 29. Resumen e indicador de la temática - Estado del arte	22
Figura 30. Indicador de formulación del problema - Estado del arte.....	23
Figura 31. Indicador de solución - Estado del arte	23

3. ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1. Magnitud de voltaje del Sistema IEEE de 14 barras en condiciones iniciales. .	13
Tabla 2. Datos del tap del transformador entre las barras 5-6	13
Tabla 3. Magnitud de voltaje del Sistema IEEE de 39 barras en condiciones iniciales. .	14
Tabla 4. Datos del tap del transformador entre las barras 20-34 y 22-35	14
Tabla 5. Matriz de estado del arte	19
Tabla 6. Datos del Sistema IEEE de 14 barras.....	24
Tabla 7. Datos de líneas del sistema IEEE de 14 barras	24
Tabla 8. Datos del Sistema IEEE de 39 barras.....	25
Tabla 9. Datos de líneas del sistema IEEE de 39 barras	26

CONTROL DE VOLTAJE MEDIANTE TRANSFORMADORES CON TAPS USANDO UNA REPRESENTACIÓN DE VARIABLE DISCRETA

Resumen

El presente artículo propone un modelo para adecuar la variable eléctrica voltaje en subestaciones de cualquier sistema eléctrico de potencia en el instante de ingresar la colocación del tap del transformador como una variable discreta al momento de representar estacionariamente la operación del transformador con taps en flujos de potencia; y en estado dinámico un control de voltaje ante diversos eventos de voltaje que requieren de un control a partir de una modificación del voltaje en una barra sea local o global para lograr consignas del mismo dentro de los límites de operación requeridos. El modelo se prueba en el sistema de barras IEEE de 14 y 39, donde se obtiene resultados favorables desde el punto de vista operativo, resaltando las limitaciones existentes en el control del voltaje.

Palabras Clave: Variable discreta, Flujos de Potencia, Tap del transformador, Simulación estacionaria, Simulación dinámica.

Abstract

This article proposes a model to adapt the voltage electrical variable in substations of any electrical power system at the moment of entering the placement transformer tap as a discrete variable when stationary to represent the operation of the transformer with taps in power flows; and in a dynamic state, a voltage control in the event of various voltage events that require control from a change in the voltage on a bus whether local or global to achieve set points within the required operating limits. The model is tested on the IEEE 14 and 39 busbar system, where favorable results are obtained from the operational point of view, highlighting the existing limitations in voltage control.

Keywords: Discrete Variable, Power Flow, Tap Transformer, Stationary simulation, Dynamic simulation.

1 Introducción

En el estudio del sistema eléctrico de potencia (SEP), la sección de control de voltaje juega un papel importante a fin de proporcionar energía a las cargas de forma constante y con los estándares que engloban a la calidad de energía, como lo son: producto técnico, servicio técnico y servicio comercial [1]. Tradicionalmente han existido en los SEP diversos elementos que aportan al control de voltaje, los cuales deben ser operados diariamente y a toda hora; esto último con el fin de mantener al voltaje dentro de un rango operativo establecido por la institución reguladora del sistema eléctrico de un determinado país [2].

La presencia y control de transformadores con relación de transformación cambiante y su estudio dentro de flujos de potencia permite establecer nuevas variables de manera que determinan criterios y condiciones de aplicación del mencionado control, pero los criterios de control solo pueden ser estrictamente especificado a un solo valor donde se puede saber que la variable controlada ha excedido sus límites [3].

En [4] estudia el comportamiento oscilatorio alrededor del voltaje de referencia cuando se incluye el cambio del tap el cual a menudo afectan a las operaciones del mismo, por anticipado a la llegada a un cierto equilibrio.

Los nuevos modelos de transformadores se desarrollan a partir de los primeros principios y se incorporan a un programa informático, siendo el más utilizado en soluciones iterativas altamente robustas el de Newton Raphson [5]. En [6] se propone un control discreto y continuo en el cambio del tap cuando se encuentra con carga (OLTC) con el fin de preservar el comportamiento discreto de la relación de derivación mientras permite

resolver el problema de estabilidad para señales pequeñas.

El modelado de transformadores con cambio de tomas es fundamental en el análisis de control de voltaje, tanto en términos de la información que se proporciona al operador y por los efectos de las acciones de control de voltaje [7]–[9]. El OLTC es uno de los componentes indispensables para la regulación del transformador de potencia [10]–[12].

El transformador está construido con un componente dependiente del tiempo que para el modelado de redes de transmisión y distribución el respectivo OLTC se lo realiza por medio de una simulación en dominio del tiempo usando un modelado simultáneo para poder evaluar el comportamiento del transformador, el cual ofrece una solución rentable y altamente confiable para el control independiente del flujo de energía [2][13].

Varios tipos de interacciones adversas son identificadas en las simulaciones, las operaciones de OLTC innecesarias pueden provocar que las transferencias de potencia reactiva se vean aumentadas innecesariamente y provocar operaciones consecutivas de cambiador de taps debido a lo cual se puede producir un accionamiento en forma de cascada [14].

Desde otra perspectiva de estabilidad de voltaje, estos estudios pueden realizarse analizando la producción de energía reactiva, la transmisión de energía y el consumo parte de los estudios de flujo de carga donde se elige un voltaje optimizado mejorando los perfiles de voltaje en la barra y en tiempo real, pero los parámetros de control se pueden ejecutar solo en pasos dependiendo de los taps disponibles en el transformador [15][16]. El estado de estabilidad de voltaje que se presenta en los sistemas eléctricos de potencia se logra estimar valores contables en tiempo real, así de

esta manera se deduce una operación óptima del OLTC y equipos de compensación [17][18].

El presente artículo propone un modelo para adecuar la variable eléctrica voltaje en las subestaciones de cualquier sistema eléctrico de potencia en el instante de ingresar la colocación del tap del transformador siendo variables discretas aquellas que serán empleadas al momento de representar en flujos de potencia la característica del control de voltaje con transformadores. Desde el punto de vista dinámico el control ante diversos eventos de voltaje requiere de un control a partir de una modificación del voltaje en una barra sea local o global; este hecho será también modelado para controlar el voltaje en un sistema eléctrico donde hay eventos que afecten al voltaje.

La parte estática de este trabajo será puesta en marcha en Matlab, mientras la parte dinámica del control será en el software DIGSILENT PowerFactory. Los ensayos serán en los sistemas de barras IEEE de 14 y 39.

2 Marco teórico

2.1 Control de voltaje en el (SEP)

La función que cumple un sistema eléctrico de potencia es convertir la energía de una de las formas naturalmente disponibles a la forma eléctrica por ende los voltajes que corren en cada una de las barras son uno de los factores críticos que afectan en el rendimiento de las redes, que a menudo tiene que cumplir un cierto mantenimiento dependiendo de los rangos establecidos [19].

El control del mismo se lo puede hacer en la red de transporte por un sistema jerárquico, que está constituido por tres niveles distintos: ajuste primario secundario y terciario de manera que el control funciona de forma autónoma en respuesta al evento y a su alrededor donde

decide sobre el contexto apropiado, y con un enfoque centralizado la potestad de la acción decisiva mediante un controlador central, que decreta el control de decisiones [10] [19].

De modo que una de las formas para que se produzca un desequilibrio de voltaje es el sobrecalentamiento de los transformadores o alguna falla en las líneas de transmisión. La configuración del sistema es variable y es necesario encontrar las barras críticas que distinguen los sobrevoltajes / subvoltajes en escenarios dispares y la aceleración en el envejecimiento térmico, son los efectos contraproducentes del desequilibrio de voltaje pero la representación de control se desarrolla en función del escenario en donde se localiza el punto de máxima incidencia de potencia [19].

2.1.1 Transformadores con taps

Los transformadores son una de las máquinas eléctricas más empleadas en el control de voltaje, siendo un estudio operativo de estos muy importante en estado estacionario y dinámico, un OLTC cambia la relación de un transformador por añadir alternativas o restar alternativas del devanado primario o secundario indistintamente, por lo tanto, el transformador contiene un devanado llamado regulación o derivación que está conectado al OLTC [10].

En los transformadores de potencia, para la implementación de un OLTC contiene:

- Interruptor desviador
- Selector del tap
- Cambio inverso
- Varios accesorios

El interruptor desviador debe estar preparado para soportar sobrevoltajes que se presentan por la interrupción de corriente de carga ya que se encuentra

dentro de una base de aceite separado, ahora el selector de tap se encarga del cambio de posición de tap del transformador con un apropiado soporte entre sus terminales ya que las conexiones en el devanado llegan hacia el selector donde se debe tener mucho cuidado [11].

En el tap para poder realizar el cambio se lo puede hacer de 1 a 9 como se indica en la Figura 1, por medio de un tiempo de ejecución y magnitud de corriente ya que en comparación con el modelo tradicional aquel varía continuamente dependiendo del valor de tap en carga por lo que la forma de onda se ve afectada por su interrupción de descarga perturbando en su resistencia e inductancia.

Por cada paso que se presenta significa el cambio de tap donde no son correctos los valores constantes de impedancia presentados en modelos tradicionales, si bien los cambios en los valores de tap de 1 al 9 puede producir un desgaste y reducir la vida útil de los transformadores y del respectivo tap así como los cambios de capacitor reducen el tiempo de vida por lo tanto se debe realizar un correcto modelamiento [12] [20].

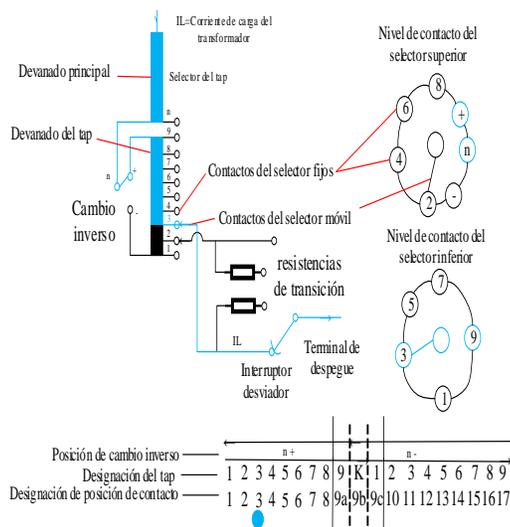


Figura 1. Principal operación de un cambiador de tap.

2.1.2 Regulador de voltaje en transformadores

La característica principal de la expresión propuesta es que comprende de un voltaje primario asumiendo que es constante y voltaje secundario que es variable o se puede dar de forma viceversa donde aparece un factor de potencia que puede ser resistivo, inductivo o capacitivo, en el cual el objetivo es proporcionar voltaje casi constante para diferentes situaciones de carga [1] [21].

La regulación de voltaje es cero en condiciones ideales ya que el voltaje del transformador cargado es igual al voltaje sin carga, pero en este contexto es diferente, el porcentaje de regulación se va a ver afectado dependiendo de su cargabilidad, en la Figura 2 se presenta la curva de regulación de voltaje vs el ángulo para transformador en carga nominal real.

Cuando la carga es inductiva en condiciones reales la regulación de voltaje tiene un valor máximo o también se lo conoce como factor de potencia en retraso, cuando la carga es capacitiva en condiciones reales la regulación de voltaje tiene un valor mínimo con signo negativo o también se lo conoce como factor de potencia en adelanto, a pesar de ello los ángulos no tienen nada que ver en esta expresión y es probable que no sea óptimo lograr ciertos objetivos operativos del sistema [21] [22].

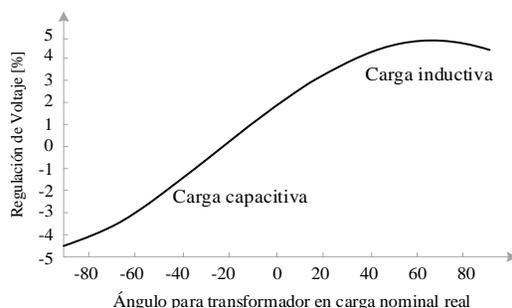


Figura 2. Curva de regulación de voltaje (RV) vs el ángulo para transformador en carga nominal real

2.1.3 Bancos de capacitores e inductores

Para compensar las pérdidas reactivas en los sistemas de transmisión se utilizan los bancos de capacitores para garantizar niveles de voltaje satisfactorios durante condiciones de carga altamente elevados.

Los bancos de capacitores de dimensiones aceptables están conectados directamente a la barra de alto voltaje o al devanado terciario del transformador principal como se señala en la Figura 3, en donde se puede accionar de dos formas por medio de un relé de voltaje o de forma manual [23]. La conmutación de los bancos de capacitores proporciona uno de los mejores medios para controlar los voltajes del sistema de transmisión. Normalmente se distribuyen por todo el sistema de transmisión para minimizar pérdidas y caídas de tensión.

Se realizan estudios detallados del flujo de energía con el fin de encontrar la dimensión y el sitio de los bancos de capacitores para cumplir con los criterios de diseño del sistema que especifican la caída de voltaje máxima permitida después de contingencias específicas [23].

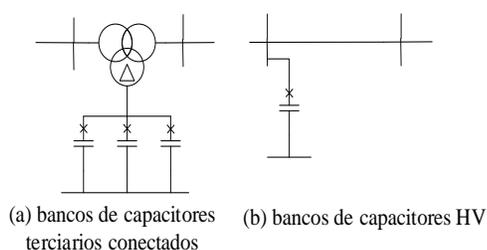


Figura 3. Conexión de banco de capacitores.

Un banco de inductores se utiliza para remediar los efectos de la capacidad en paralelo del sistema, particularmente para limitar el aumento de voltaje en circuito abierto o carga ligera. Por lo general, se requieren para líneas aéreas de más de 200 km o voltajes muy altos como 500 kV.

Una línea aérea de dimensión corta puede utilizar banco de inductores si la línea que se encuentra alimentada es desde un sistema débil (baja capacidad de cortocircuito) como se muestra en la Figura 4.

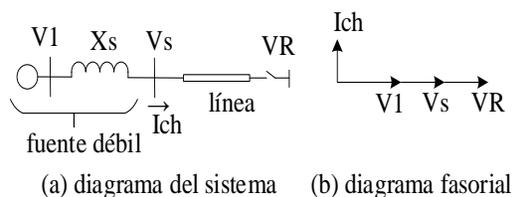


Figura 4. Línea conectada a un sistema débil.

Un banco de inductores de tamaño suficiente debe estar conectado permanentemente a la línea para limitar las sobretensiones temporales de frecuencia fundamental a aproximadamente 1.5 [p.u.] por una duración de menos de 1 segundo [23].

Dichos inductores conectados a la línea también sirven para limitar los sobrevoltajes de activación (transitorios de conmutación). Se pueden conectar bancos de inductores adicionales necesarios para mantener el voltaje normal en condiciones de carga ligera al bus como se muestra en la Figura 5, o a los devanados terciarios de transformadores adyacentes como se muestra en la Figura 6 [23].

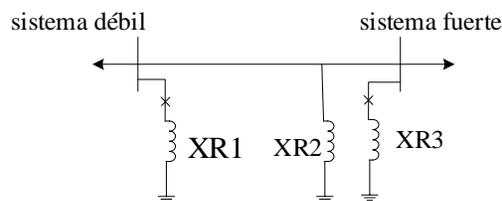


Figura 5. Inductores conectados a la barra y línea.

Donde:
XR2: Inductor conectado a la línea de forma permanente

XR1, XR3: Inductor conmutable conectado a la barra.

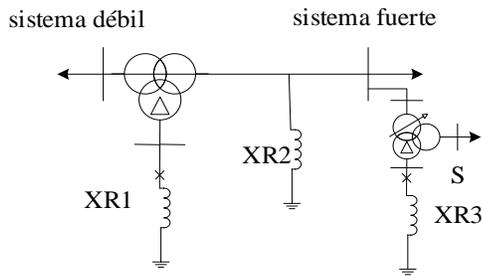


Figura 6. Inductores conectados a la línea y transformador.

Donde:

XR2: Inductor conectado a la línea de forma permanente

XR1, XR3: Inductores conmutables conectados a devanados terciarios de transformadores.

2.1.4 FACTS

El desarrollo de los equipos FACTS ha seguido dos enfoques técnicos claramente diferentes, ambos resultando en un grupo integral de elementos capaces de abordar problemas de transmisión específicos. El primer grupo emplea impedancias reactivas o un transformador de cambio de tomas con interruptores de tiristores como elementos controlados. El segundo grupo utiliza convertidores estáticos auto conmutado como fuentes de voltaje controlado [24].

La primera generación de FACTS emplean tiristores convencionales (es decir, aquellos que no tienen capacidad de desconexión intrínseca) en disposiciones de circuito que son similares al interruptor, condensadores, reactores conmutados y transformadores convencionales (mecánicos) de cambio de tomas las cuales son operados por controles sofisticados y su capacidad de respuesta es mucho más rápida [24].

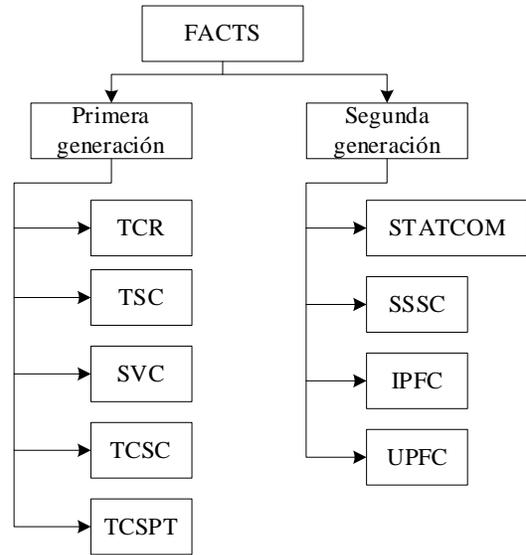


Figura 7. Clasificación de los dispositivos FACTS.

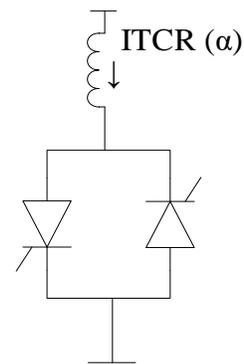


Figura 8. TCR: Inductor controlado por Tiristores.

Cada uno de estos controladores puede actuar sobre uno de los tres parámetros que determinan la transmisión de potencia, voltaje (SVC), impedancia de transmisión (TCSC) y ángulo de transmisión (cambio de fase), como se ilustra [24].

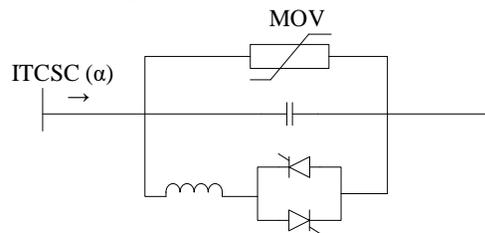


Figura 9. TCSC: Capacitores serie controlados por Tiristores.

Cada uno de estos compensadores puede controlar solo uno de los tres parámetros de control de flujos de potencia: magnitud del voltaje, su ángulo de fase y reactancia de línea. A pesar de que el flujo de potencia activa en la línea está regulado, el flujo de potencia reactiva no deseado también afecta simultáneamente pero la optimización del flujo de energía que genera más los ingresos se pueden lograr a través del control independiente de la potencia activa y reactiva que fluye en la línea de transmisión [25].

2.1.5 Líneas de transmisión en vacío

La línea de transmisión viene dada por un modelo equivalente π , representado en la Figura 10, está definido por tres parámetros [26], r_{ij} resistencia serie, x_{ij} reactancia serie y b_{ij}^{sb} susceptancia paralelo.

La impedancia de elemento serie viene descrita en la ecuación (1).

$$Z_{ij} = r_{ij} + jx_{ij} \quad (1)$$

Ahora su admitancia serie es de la siguiente manera:

$$Y_{ij} = g_{ij} + jb_{ij} = Z_{ij}^{-1} = \frac{r_{ij}}{r_{ij}^2 + x_{ij}^2} - j \frac{x_{ij}}{r_{ij}^2 + x_{ij}^2} \quad (2)$$

La siguiente ecuación (3) comprende de una conductancia serie g_{ij} y una susceptancia serie b_{ij} .

$$g_{ij} = \frac{r_{ij}}{r_{ij}^2 + x_{ij}^2}; b_{ij} = \frac{-x_{ij}}{r_{ij}^2 + x_{ij}^2} \quad (3)$$

Cuando en el modelo π de una línea de transmisión si tiene r_{ij} y x_{ij} positivos, lo que implica g_{ij} positivo y b_{ij} negativo es tipo inductivo. Si la denominación b_{ij}^{sb} es positivo la denominación es capacitiva. La corriente I_{ij} de la Figura 10 está formada de una componente en serie y

una componente shunt, y se logra resolver a partir de una sustracción de voltajes terminales E_i y E_j de los parámetros del modelo equivalente π [26].

$$I_{ij} = Y_{ij}(E_i - E_j) + jb_{ij}^{sb} E_j \quad (4)$$

De modo que:

$$E_i = V_i e^{j\theta_i}; E_j = V_j e^{j\theta_j} \quad (5)$$

Donde la fórmula de la corriente I_{ji} es dada por

$$I_{ji} = Y_{ij}(E_j - E_i) + jb_{ij}^{sb} E_j \quad (6)$$

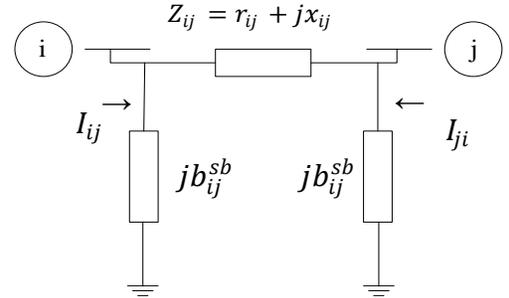


Figura 10. Modelo equivalente π de una línea de transmisión.

La denominación $|E_j - E_i|$ representa la magnitud de voltaje sobre la impedancia del modelo equivalente π , (en líneas reales $b_{ij} < 0$ y $b_{ij}^{sb} > 0$), por lo tanto el voltaje puede o no disminuir su valor progresivamente va a depender de cierta condición, con una característica de admitancia constante la condición del sistema se estabiliza a un nivel de voltaje inferior al establecido. El resultado del flujo de potencia no puede sobrepasarse de un margen de valor ya que puede producirse un desequilibrio, el trabajo cerca del límite de estabilidad no es práctico y una condición de operación satisfactoria garantiza y permite suficiente margen de potencia [23][26].

2.2 Modelo estacionario del transformador con taps

El modelamiento estacionario del transformador con taps viene descrito en la mayoría de fuentes de control en el cual parte de la conexión del transformador a una barra i y j , obteniendo un modelo equivalente π que parte desde los conceptos básicos de las igualdades planteadas de corriente y voltaje que se da en un cuadripolo que se representa en un transformador y es por eso que las variables eléctricas viene dado tanto en el lado i y lado j . Primeramente el modelo debe cumplir que se pueda operar el tap en el lado i y j sin tomar en cuenta la relación de transformación $n_i:n_j$ ni su magnetización como se señala en la Figura 11 [27][28].

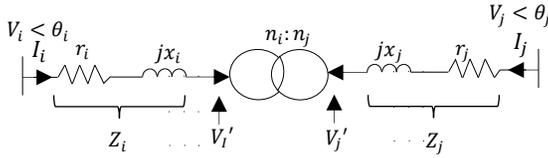


Figura 11. Transformador conectado entre la barra i y j para el modelo estacionario con taps.

Se inicia con el concepto básico de relación de transformación que viene dado:

$$\frac{V_i - I_i Z_i}{n_i} = \frac{V_j - I_j Z_j}{n_j} \quad (7)$$

Y para corrientes:

$$\frac{I_i}{n_j} = \frac{I_j}{n_i} \quad (8)$$

Si se combina la ecuación (8) en (7) se obtiene:

$$I_i = \frac{n_j[n_i(V_i - V_j) + V_i(n_j - n_i)]}{n_i^2 Z_j + n_j^2 Z_i} \quad (9)$$

Resolviendo la ecuación (9) con la condición de que $X_{cc} \gg R_{cc}$ la admitancia viene descrita como:

$$Y = \frac{1}{n_i^2 X_j + n_j^2 X_i} \quad (10)$$

Al denominador de la ecuación (10) se le cambia con el nombre de X_e por lo que se tiene:

$$Y = \frac{1}{X_e} \quad (11)$$

Reemplazando la ecuación (11) en (9) se obtiene:

$$I_i = n_i n_j (V_i - V_j) Y + n_j (n_j - n_i) V_i Y \quad (12)$$

$$I_j = n_i n_j (V_j - V_i) Y + n_i (n_i - n_j) V_j Y \quad (13)$$

Donde:

V_i, V_j : Voltajes en cada barra en [p.u].

I_i, I_j : Corriente por la línea en el nodo i y j en [p.u].

n_i, n_j : Valor el tap a cada lado del transformador en [p.u].

X_i, X_j : Reactancias del transformador en [p.u].

Y : Admitancia del transformador en [p.u].

Las ecuaciones descritas son el inicio para el estudio del tap en el transformador y se las puede utilizar en la simulación como se señala en la Figura 12.

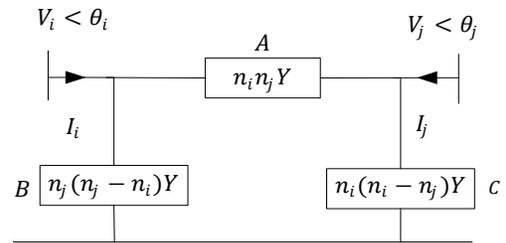


Figura 12. Modelo para tap del transformador en el lado i y j

2.3 Modelo de control del transformador con taps

El modelo discreto consiste en representar la relación de derivación como una variable discreta, que puede variar entre

un mínimo m^{min} y valores máximos m^{max} respectivamente, por un paso fijo [6][29].

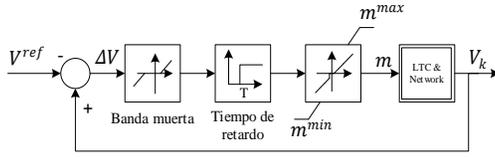


Figura 13. Diagrama del modelo discreto en estado dinámico

Para el análisis de flujo de potencia, no es relevante para rastrear la trayectoria seguida por el radio del tap por la posición final. Por lo tanto, el operador puede descuidar el efecto de los retrasos de tiempo y centrarse solo en la banda muerta y el cambio de tap. La lógica de control consiste en moverse hacia arriba o hacia abajo por un escalón Δm del radio del tap si el voltaje en el devanado secundario con respecto a la referencia V^{ref} excede una banda muerta dada db_v . En una iteración genérica del análisis de flujo de potencia, las ecuaciones lógicas son las siguientes:

$$\alpha^{(i)} = \alpha(\Delta V^{(i)}, m^{(i-1)}, db_v, m^{max}, m^{min})$$

$$\alpha^{(i)} = \begin{cases} 1, & \text{si } \Delta V^{(i)} > db_v \text{ y } m^{(i-1)} < m^{max} \\ -1, & \text{si } \Delta V^{(i)} < -db_v \text{ y } m^{(i-1)} > m^{min} \\ 0 & \end{cases} \quad (14)$$

Donde $\Delta V^{(i)} = V_k^i - V^{ref}$. Finalmente, el tap se actualiza usando el valor de $\alpha^{(i)}$.

Para las simulaciones de dominio de tiempo, el retraso de tiempo no puede ser descuidado ya que juega un papel importante, cuanto mayor es el error de voltaje ΔV , más rápido cambia el radio del tap.

$$T(t)T_o \frac{db_v}{|\Delta V|} \quad (15)$$

En el caso que $|\Delta V| < db_v$ el control no modificará el radio del tap, por lo

tanto, el valor de retraso del tiempo en realidad no es relevante en tal caso.

Un modelo de control discreto alternativo regula la relación de derivación para mantener el voltaje dentro de cierto rango [29].

$$V^{min} \leq V_k \leq V^{max} \quad (16)$$

3 Implementación de los modelos

Para realizar el respectivo control de la variable eléctrica voltaje en las barras del SEP el flujo de potencia requiere de un ajuste inicial de las derivaciones del transformador, junto con el lado regulado por transformador por lo tanto la acción de control consiste en ir cambiando la relación de derivación del transformador y también cambiando la posición. La posición del tap se mueve en un número finito de pasos [30].

3.1 Flujo de potencia

De cualquier modo, el tap en el método iterativo Newton-Raphson se parte del modelo π descrito anteriormente resultando la siguiente matriz:

$$\begin{bmatrix} I_i \\ I_j \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} n_j^2 y_{ii} & -n_i n_j y_{ij} \\ -n_i n_j y_{ji} & n_i^2 y_{jj} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} V_i \\ V_j \end{bmatrix} \quad (17)$$

En esta sección el punto central para la resolución consiste en determinar el vector de errores de potencia ΔS como se expresa en la ecuación (18).

$$\Delta S^k \approx [-J^k] [\Delta X]^k \quad (18)$$

Donde:

J : Matriz Jacobiano

k : Cada iteración

ΔS : Vector de errores de potencias

Matriz Jacobiano viene descrita de la siguiente forma:

$$J(\underline{x}^k) = \begin{array}{c} \left(\begin{array}{cc} \frac{\partial(\Delta P)}{\partial \theta} & \frac{\partial(\Delta P)}{\partial V} \\ \frac{\partial(\Delta Q)}{\partial \theta} & \frac{\partial(\Delta Q)}{\partial V} \end{array} \right)^{(k)} \\ \left. \begin{array}{l} \text{---} \\ \text{---} \end{array} \right\} \begin{array}{l} NPQ + NPV \\ NPQ \end{array} \\ \left. \begin{array}{l} \text{---} \\ \text{---} \end{array} \right\} \begin{array}{l} NPQ + NPV \\ NPQ \end{array} \end{array} \quad (19)$$

Los componentes de la submatrices jacobianos H, N, M e L son dadas por.

$$H_{ij} = V_i V_j (G_{ij} \sin \theta_{ij} - B_{ij} \cos \theta_{ij}) \quad (20)$$

$$H_{ii} = -Q_i - V_i^2 B_{ii}$$

$$N_{ij} = V_i (G_{ij} \cos \theta_{ij} + B_{ij} \sin \theta_{ij}) \quad (21)$$

$$N_{ii} = V_i^{-1} (P_i + V_i^2 G_{ii})$$

$$M_{ij} = -V_i V_j (G_{ij} \cos \theta_{ij} + B_{ij} \sin \theta_{ij}) \quad (22)$$

$$M_{ii} = P_i - V_i^2 G_{ii}$$

$$L_{ij} = V_j (G_{ij} \sin \theta_{ij} - B_{ij} \cos \theta_{ij}) \quad (23)$$

$$L_{ii} = V_i^{-1} (Q_i - V_i^2 B_{ii})$$

Para simplificar las ecuaciones se realiza una suposición de que todas las barras PQV tienen sus voltajes regulados por transformadores NT=NPQV.

$$\begin{array}{c} \begin{array}{c} NPQ \\ + \\ NPV \\ + \\ NPQV \\ + \\ NPQ \\ + \\ NPQV \end{array} \left\{ \begin{array}{c} \Delta P_j \\ \Delta Q_j \end{array} \right\} = \begin{array}{c} \begin{array}{ccc} \frac{\partial P}{\partial \theta} & \frac{\partial P}{\partial V} & \frac{\partial P}{\partial n} \\ \frac{\partial Q}{\partial \theta} & \frac{\partial Q}{\partial V} & \frac{\partial Q}{\partial n} \end{array} \\ \left. \begin{array}{l} \text{---} \\ \text{---} \end{array} \right\} \begin{array}{c} \Delta \theta_j \\ \Delta V_j \\ \Delta n_j \end{array} \end{array} \left. \begin{array}{l} \text{---} \\ \text{---} \\ \text{---} \\ \text{---} \end{array} \right\} \begin{array}{c} NPQ \\ + \\ NPV \\ + \\ NPQV \\ + \\ NPQ \\ + \\ NT = NPQV \end{array} \end{array}$$

Figura 14. Matriz Jacobiano para taps de transformadores

Donde:

NPQ: número de barras PQ

NPV: número de barras PV

NT: número de transformadores con control de tap

NPQV: número de barras PQV

En cada iteración cada valor de tap n_i o n_j depende del devanado del

transformador, se actualiza dependiendo del valor de voltaje.

$$[n_i]^k = [n_i]^{k-1} + \left[\frac{\Delta n_i}{n_i} \right]^k [n_i]^{k-1} \quad (24)$$

$$[n_j]^k = [n_j]^{k-1} + \left[\frac{\Delta n_j}{n_j} \right]^k [n_j]^{k-1} \quad (25)$$

3.2 Sistema de control

3.2.1 Control directo

El control directo se da en la barra secundaria (V_j), una vez que se haya producido la variación en el tap del transformador por la parte secundaria como se señala en la Figura 15 indicando la realización de variación de voltaje [28].

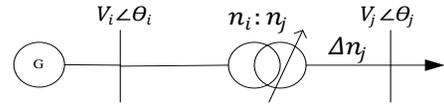


Figura 15. Control directo

$$\frac{V_i}{n_i} = \frac{V_j}{n_j} \quad (26)$$

$$V_j = \frac{n_j}{n_i} V_i \quad (27)$$

$$V_j = \frac{n_j + \Delta n_j}{n_i} V_i \quad (28)$$

En la ecuación (28) si Δn_j : es positivo el V_j aumenta su magnitud y si Δn_j : es negativo el V_j disminuye su magnitud.

Donde:

V_i : Voltaje en la barra i

θ_i : Ángulo en la barra i

V_j : Voltaje en la barra j

θ_j : Voltaje en la barra j

$n_i : n_j$: Relación de transformación

Δn_j : Cambio de tap en el lado j

3.2.2 Control inverso

Se representa el control inverso como una desviación de voltaje (V_j) en el lado j , una

vez que se haya producido la variación en el tap del transformador en el lado contrario como se señala en la Figura 16 la cual indica la realización de variación de voltaje [28].

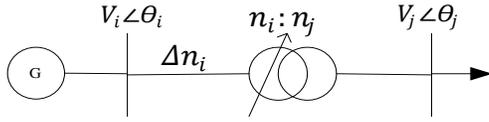


Figura 16. Control inverso

En la ecuación (27) ejerciendo control inverso se tiene:

$$V_j = \frac{n_j}{n_i + \Delta n_i} V_i \quad (29)$$

En la ecuación (29) si Δn_i es positivo el V_j disminuye su magnitud y si Δn_i es negativo el V_j aumenta su magnitud.

Donde:

- V_i : Voltaje en la barra i
- θ_i : Ángulo en la barra i
- V_j : Voltaje en la barra j
- θ_j : Ángulo en la barra j
- $n_i : n_j$: Relación de transformación
- Δn_i : Cambio de tap en el lado i

4 Sistemas de prueba

Para poner en marcha los modelos descritos anteriormente se los realizará dependiendo de la condición, para la parte estática será puesta en Matlab, mientras la parte dinámica del control será en el software DlgSILENT PowerFactory en los SEP descritos a continuación.

4.1 Sistema de prueba 1

Para realizar los ensayos de control de voltaje a partir de la asignación de una variable discreta en los taps se emplea en el sistema de barras IEEE de 14 como se expone en la Figura 17.

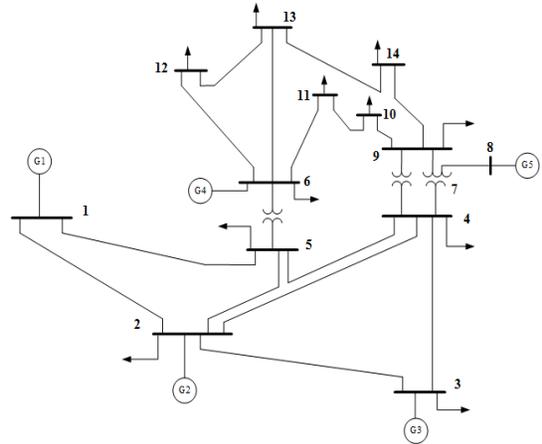


Figura 17. Sistema de barras IEEE de 14.

4.2 Sistema de prueba 2

El modelo matemático descrito anteriormente también se lo puede aplicar para el sistema de barras IEEE de 39 como se expone en la Figura 18.

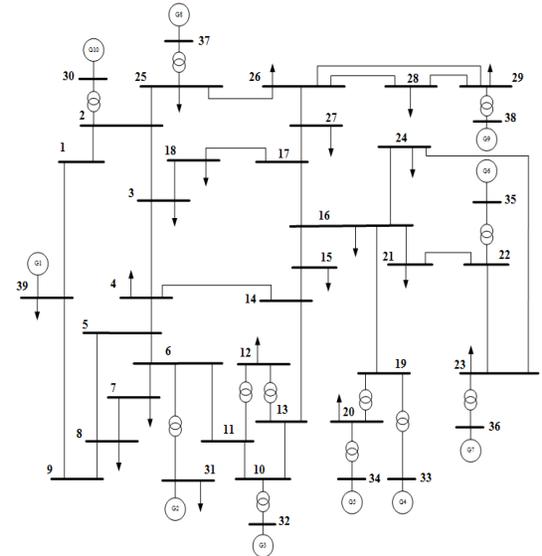


Figura 18. Sistema de barras IEEE de 39.

Seguidamente, se describen los diagramas de flujo para realizar la evaluación de la operación del transformador con taps en estado estacionario y dinámico para control de voltaje.

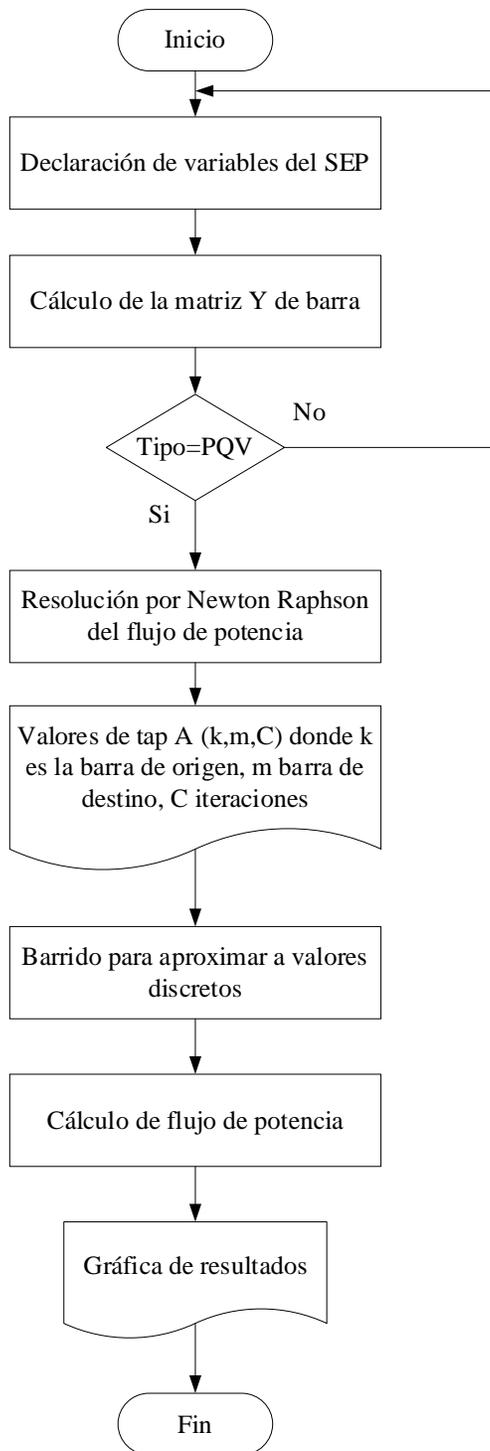


Figura 19. Metodología aplicada en la condición estacionaria

5 Análisis de resultados

La metodología de estudio permite determinar el valor del tap del

transformador el cual lleva el resultado a una variable de forma discreta para realizar el control, donde se obtiene resultados favorables desde el punto de vista operativo, ostentando una contribución al conocimiento ya que toma en cuenta las limitaciones existentes en el control las cuales se presentan en las siguientes gráficas.

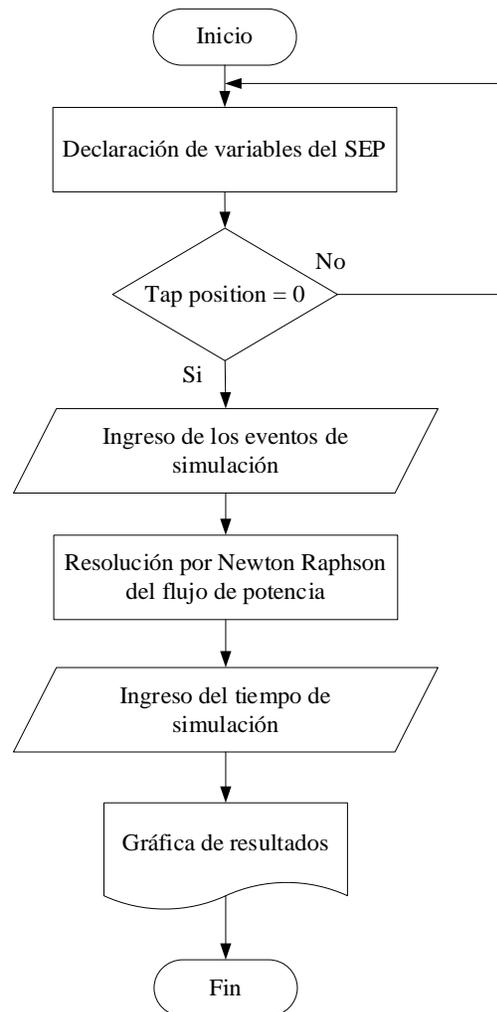


Figura 20. Metodología aplicada en la condición dinámica

Se analizan en dos estados: estacionario y dinámico, en el estado dinámico se analizan para diferentes eventos según sea el caso, para el sistema de prueba 1 de la Figura 17 se toma el transformador de los nodos 5 – 6 para el

ajuste del valor del tap donde se fija el valor ya sea del lado i o del lado j para realizar el control en su opuesto, en el sistema de prueba 2 de la Figura 18 se toma el transformador de los nodos 20 – 34 y el transformador de los nodos 22 – 35.

La ejecución del modelo matemático tiene como resultados las siguientes gráficas, primero se muestra en estado estacionario los valores en condiciones iniciales con el tap en posición neutral y respectivamente desactivado, para luego ser comparados con los que se habilita ejerciendo control en las respectivas barras. Las del punto 5.2 son graficas en estado dinámico cuando ocurren diferentes eventos según sea el caso en el sistema de potencia.

5.1 Estado estacionario

Las deducciones del flujo óptimo de potencia para el sistema de barras IEEE de 14 como se señala en la Figura 17 en condiciones iniciales se exponen en la Tabla 1 con todos los tap de los transformadores deshabilitados y en posición neutral.

Tabla 1. Magnitud de voltaje del Sistema de barras IEEE de 14 antes del control.

Barra	Voltaje [pu]	Control	tap
1	1.0600	F	
2	1.0450	F	
3	1.0100	F	
4	1.0265	F	
5	1.0332	F	
6	1.0700	F	1
7	1.0451	F	1
8	1.0900	F	
9	1.0280	F	1
10	1.0279	F	
11	1.0451	F	
12	1.0530	F	
13	1.0463	F	
14	1.0177	F	

Al realizar el flujo de potencia da como resultados los de la Tabla 2 y arroja el siguiente mensaje:

El transformador de 5 - 6 no puede fijar este tap: 1.146

El valor a tomar del transformador 5 - 6 es: 1.05.

Presentando un incremento de 0.146 a comparación de su valor inicial y fija al valor más cercano del tap, también fija el valor de voltaje del nodo 6 y la barra en el nodo 5 pasa a PQV como se expone en la Figura 21.

Tabla 2. Datos del tap del transformador entre las barras 5-6

Tap transformador			
de/hasta	tap	devanado 2.5%	tap discreto
5-6	1.146	1.05	1.05
		1.025	
		1	
		0.975	
		0.95	

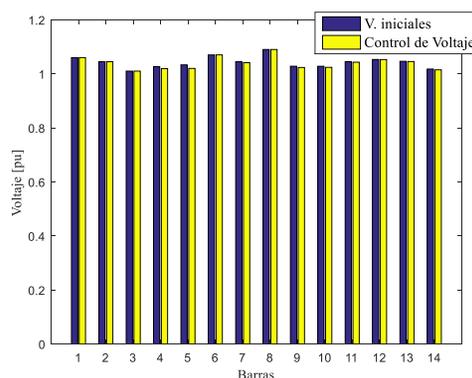


Figura 21. Voltajes iniciales vs Estudio del modelo en nodo 6

Los resultados del flujo de energía para el sistema de barras de 39 de la Figura 18 en condiciones iniciales se exponen en la Tabla 3 con todos los tap de los transformadores deshabilitados y en posición neutral.

Al realizar el flujo de potencia da como resultados los de la Tabla 4 en este caso al realizar en dos transformadores se denota los siguientes mensajes:

El transformador de 20 - 34 no puede fijar este tap: 1.058

El valor a tomar del transformador 20 - 34 es: 1.05

El transformador de 22 - 35 no puede fijar este tap: 1.06

El valor a tomar del transformador 22 - 35 es: 1.05

Tabla 3. Magnitud de voltaje del Sistema de barras IEEE de 39 antes del control.

Barra	Voltaje [pu]	Control	tap
1	1.0361	F	
2	1.0402	F	
3	1.0163	F	
4	0.9702	F	
5	0.9640	F	
6	0.9642	F	
7	0.9570	F	
8	0.9581	F	
9	1.0220	F	
10	0.9708	F	
11	0.9673	F	1
12	0.9487	F	
13	0.9706	F	1
14	0.9751	F	
15	0.9897	F	
16	1.0112	F	
17	1.0313	F	
18	1.0242	F	
19	0.9976	F	
20	0.9912	F	1
21	1.0113	F	
22	1.0300	F	
23	1.0291	F	
24	1.0174	F	
25	1.0598	F	
26	1.1322	F	
27	1.0805	F	
28	1.1199	F	
29	1.1152	F	
30	1.0499	F	1
31	0.9820	F	1
32	0.9841	F	1
33	0.9972	F	1
34	1.0123	F	1
35	1.0494	F	1
36	1.0636	F	1
37	1.0275	F	1
38	1.0265	F	1
39	1.0300	F	

En este caso se presenta en el transformador entre 20-34 se denota un incremento de 0.058 referente a su valor inicial lo cual el tap que toma aumenta dos posiciones. Y del transformador 22-35 también presenta un incremento de 0.06 a comparación de su valor inicial aumentando el tap en dos posiciones.

Tabla 4. Datos del tap del transformador entre las barras 20-34 y 22-35

Tap transformador			
de/hasta	tap	devanado 2.5%	tap discreto
20-34	1.058	1.05 +	1.05
		1.025	
22-35	1.06	1.0 -	1.05
		0.975	
		0.95	

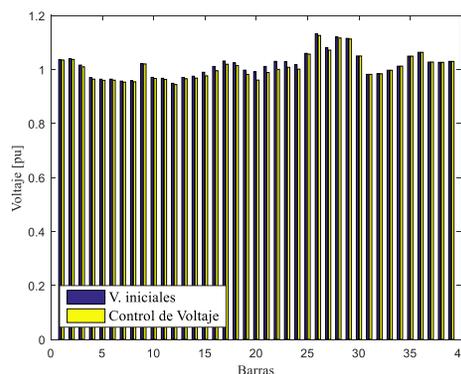


Figura 22. Voltajes iniciales vs Estudio del modelo en el nodo 34 y 35

La magnitud de voltaje de la barra 34 y 35 se fija para realizar el control y las barras 20 y 22 se presentan como PQV como se indica en la Figura 22 cumpliendo con el control.

5.2 Estado Dinámico

El tap del transformador entre las barras 5 y 6 del sistema de prueba 1 presenta un incremento de dos posiciones en el tap por lo cual la variación de magnitud de voltaje

se denota en la Figura 23 cuando se ejerce el respectivo sistema de control el cual tiende a estabilizarse en un valor aproximado

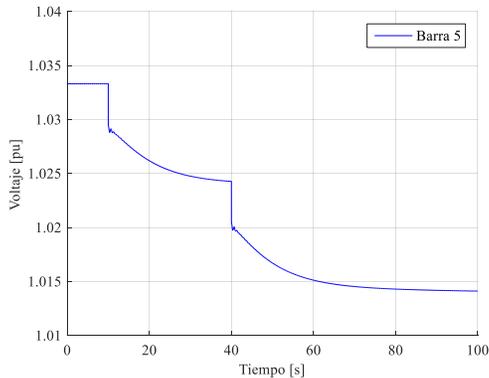


Figura 23. Variación de la magnitud de voltaje en el nodo 5

Se producen dos eventos, el primero al incrementar una posición que inicia en $t=10s$ y el siguiente evento inicia en $t=40s$ para llegar a la segunda posición como se denota en la Figura 24.

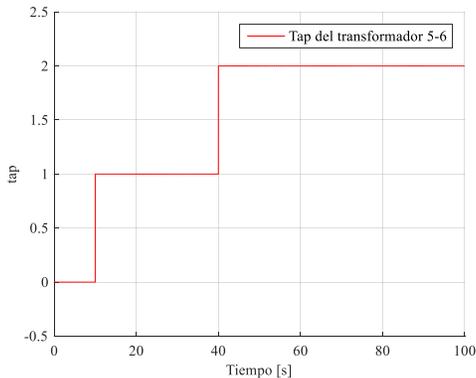


Figura 24. Variación de la posición del tap del transformador conectado entre las barras 5-6

El tap del transformador entre las barras 20 y 34 del sistema de prueba 2 presenta un aumento de dos posiciones en el tap por lo cual la variación de magnitud de voltaje se denota en la Figura 25, que para este caso el voltaje de la barra 20 se reduce cuando se ejerce el respectivo sistema de control.

El tap del transformador entre 20-34 varía la posición del tap mediante el aumento de dos posiciones, la primera posición inicia con un evento en $t=10s$ y

la siguiente en un evento en $t=40s$ como se denota en la Figura 26.

El tap del transformador entre las barras 22 y 35 del sistema de prueba 2 presenta un aumento de dos posiciones en el tap por lo cual la variación de magnitud se ve descrita en la Figura 27 cuando se ejerce el respectivo sistema de control.

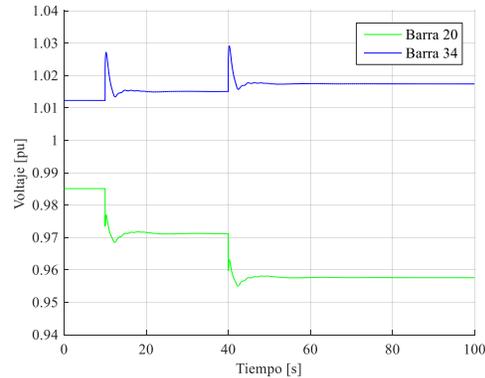


Figura 25. Magnitud de voltaje en la barra 20 y 34

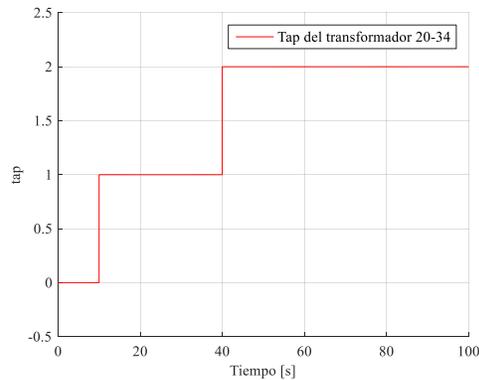


Figura 26. Variación de la posición del tap del transformador conectado entre las barras 20-34

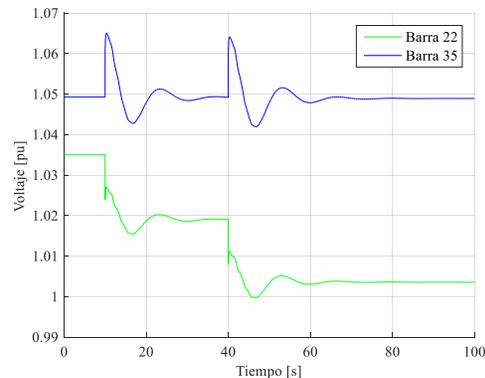


Figura 27. Magnitud de voltaje en el nodo 22 y 35

Se produce 2 eventos, el primer evento cuando aumenta una posición del tap del transformador en $t=10s$ y el siguiente evento en $t=40s$ para llegar a la segunda posición como se denota en la Figura 28.

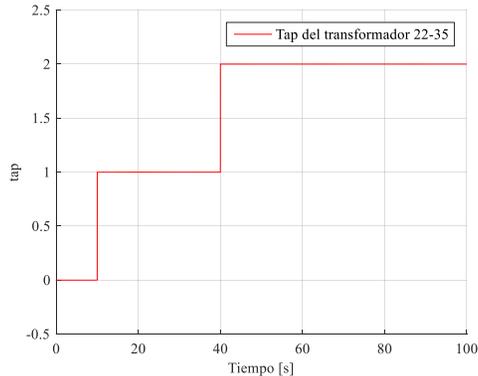


Figura 28. Variación de la posición del tap del transformador conectado entre las barras 22-35

6 Conclusiones

Los resultados obtenidos por los dos casos cada uno estudiado individualmente permite una mejor comprensión del control garantizando un correcto funcionamiento en lo que se refiere al voltaje donde se debe mantener la magnitud del mismo, siendo así un medio rentable como lo es el control mediante los taps de los transformadores impulsados por una señal de control.

El modelo matemático implementado es un gran aporte para el estudio de flujos de potencia y estabilidad de voltaje porque permite incluir los taps de los transformadores en un SEP tanto en condiciones estacionarias como dinámicas logrando consignas de voltaje dentro de los límites de operación requeridos.

La resolución del SEP ejerciendo control por medio de los OLTC permite operar al mismo ante diversos cambios en la demanda siendo capaz de ejercer modificaciones automáticas de voltaje según sean las necesidades de la red, teniendo así un SEP seguro y confiable.

6.1 Trabajos futuros

Los resultados expuestos en este trabajo pueden ser tomados para:

- Estudios de transitorios electromagnéticos para evaluar cambios de voltaje y corriente en el transformador.
- Inclusión de un tap de fase al transformador con tap, sobre el cual se pueda ejercer control.
- Optimización de la posición del tap del transformador para efectos de reducción de pérdidas.

7 Referencias

- [1] M. Todorovski, “Transformer voltage regulation - Compact expression dependent on tap position and primary/secondary voltage,” *IEEE Trans. Power Deliv.*, vol. 29, no. 3, pp. 1516–1517, 2014.
- [2] S. M. Abbasi, F. Karbalaei, and A. Badri, “The effect of suitable network modeling in voltage stability assessment,” *IEEE Trans. Power Syst.*, vol. 34, no. 2, pp. 1650–1652, 2019.
- [3] G. Bone, M. Pantos, and R. Mihalic, “Applying Transformer Limits in Power Flow Studies Using Unconstrained Optimizations,” *IEEE Trans. Power Syst.*, vol. 33, no. 5, pp. 5805–5807, 2018.
- [4] N. Yorino, M. Danyoshi, and M. Kitagawa, “Interaction among multiple controls in Tap Change Under Load transformers,” *IEEE Power Eng. Rev.*, vol. 17, no. 2, pp. 70–71, 1997.
- [5] E. Acha, H. Ambriz-Perez, and C. R. Fuertc-Esquivel, “Advanced transformer control modeling in an optimal power flow using Newton’s method,” *IEEE Trans.*

- Power Syst.*, vol. 15, no. 1, pp. 290–298, 2000.
- [6] F. Milano, “Hybrid control model of under load tap changers,” *IEEE Trans. Power Deliv.*, vol. 26, no. 4, pp. 2837–2844, 2011.
- [7] C. A. Ferreira and R. B. Prada, “Improved model for tap-changing transformer,” *IET Gener. Transm. Distrib.*, vol. 7, no. 11, pp. 1289–1295, 2013.
- [8] J. M. Cano, M. R. R. Mojumdar, and G. A. Orcajo, “Reconciling Tap-Changing Transformer Models,” *IEEE Trans. Power Deliv.*, vol. 34, no. 6, pp. 2266–2268, 2019.
- [9] 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.
- [10] L. Choukri, H. Chekenbah, R. Lasri, M. Bouhorma, and Y. Maataoui, “On-Load Tap-Changer Control by a Fuzzy Logic Controller,” *2019 4th World Conf. Complex Syst.*, vol. 4, pp. 1–6, 2019.
- [11] P. A. P. De Lima and S. H. L. Cabral, “Computer simulation as an aid in the rating of a transformer on-load tap changer,” *IEEE Electr. Insul. Mag.*, vol. 30, no. 4, pp. 34–38, 2014.
- [12] A. Ahmad, W. Fang, J. Liu, and X. Hao, “Power transformer transient modeling considering the effects of on-load tap changer,” *ICEPE-ST 2017 - 4th Int. Conf. Electr. Power Equipment- Switch. Technol.*, vol. 2017–Decem, pp. 766–770, 2017.
- [13] D. Patel and A. Chowdury, “Dynamic control and performance of a sen transformer for stabilizing an AC transmission system and improved voltage profile,” *Proc. Int. Conf. Power, Energy, Control Transm. Syst. ICPECTS 2018*, pp. 85–90, 2018.
- [14] A. Kulmala, S. Repo, and B. Bletterie, “Avoiding adverse interactions between transformer tap changer control and local reactive power control of distributed generators,” *IEEE PES Innov. Smart Grid Technol. Conf. Eur.*, 2016.
- [15] 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.
- [16] P. Szczesniak and J. Kaniewski, “Hybrid Transformer with Matrix Converter,” *IEEE Trans. Power Deliv.*, vol. 31, no. 3, pp. 1388–1396, 2016.
- [17] 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,” *CIGRE - Open Access Proc. J.*, vol. 2017, no. 1, pp. 952–955, 2017.
- [18] R. A. Jabr, I. Dzafic, and S. Karaki, “Tracking Transformer Tap Position in Real-Time Distribution Network Power Flow Applications,” *IEEE Trans. Smart Grid*, vol. 9, no. 4, pp. 2442–2452, 2018.
- [19] K. P. Swain and M. De, “A novel electrical proximity index for voltage control in smart distribution system,” *Electr. Power Syst. Res.*, vol. 172, no. June 2018, pp. 50–62, 2019.
- [20] A. Pouladi, A. K. Zadeh, and A. Nouri, “Control of Parallel ULTC Transformers in Active Distribution Systems,” *IEEE Syst.*

- J.*, vol. 14, no. 1, pp. 960–970, 2020.
- [21] M. E. El-Hawary, “Power engineering letters,” *IEEE Power Eng. Rev.*, vol. 22, no. 10, p. 43, 2002.
- [22] B. A. Robbins, H. Zhu, and A. D. Dominguez-Garcia, “Optimal tap setting of voltage regulation transformers in unbalanced distribution systems,” *IEEE Trans. Power Syst.*, vol. 31, no. 1, pp. 256–267, 2016.
- [23] P. S. Kundur, “Power System Stability and Control Volume I,” *McGraw-Hill, Inc.* pp. 1–600, 2004.
- [24] Y. Hua and A. T. Johns, *256570538-Flexible-AC-Transmission-Systems-FACTS.pdf*, vol. 30, 1999.
- [25] K. K. Sen and M. L. Sen, “Applications of FACTS Controllers,” *Introd. to Facts Control.*, pp. 1–12, 2009.
- [26] A. Monticelli, “Flujo de Carga em Rede de Energia Elétrica.” p. 164, 1983.
- [27] A. E. Oleas and C. A. Barrera, “Control De Voltaje En Sistemas Eléctricos De Potencia Usando Transformadores Con Taps,” 2019.
- [28] B. G. Quinchimbla and C. A. Barrera, “Estabilidad de voltaje en sistemas de transmisión considerando la operación de transformadores con taps,” 2019.
- [29] X. Zhang, R. Kang, M. McCulloch, and A. Papachristodoulou, “Real-time active and reactive power regulation in power systems with tap-changing transformers and controllable loads,” *Sustain. Energy, Grids Networks*, vol. 5, pp. 27–38, 2016.
- [30] C. Roman and W. Rosehart, “Complementarity model for load tap changing transformers in stability based OPF problem,” *Electr. Power Syst. Res.*, vol. 76, no. 6–7, pp. 592–599, 2006.

7.1 Matriz de Estado del Arte

Tabla 5. Matriz de estado del arte

CONTROL DE VOLTAJE MEDIANTE TRANSFORMADORES CON TAPS USANDO UNA REPRESENTACIÓN DE VARIABLE DISCRETA																						
ITEM	AÑO	TÍTULO DEL ARTÍCULO	CITAS	TEMÁTICA					FORMULACION DEL PROBLEMA				RESTRICCIONES DEL PROBLEMA			ALGORITMO DE OPTIMIZACIÓN			SOLUCIÓN PROPUESTA			
				Control de voltaje	Transformador con taps	Tap del transformador como variable discreta	Flejos de potencia	Método de Newton Raphson	Control del transformador con taps	Control de voltaje en estado estacionario	Control de voltaje en estado dinámico	Límites de posición del tap	Aproximación del tap a variable discreta	Transformadores habilitados para el control	Cargabilidad del sistema	Modelo pi de transformador	Flujo de potencia por Newton Raphson	Método Iterativo	Modelo de inclusión del tap del transformador al flujo de potencia	Modelo de control del transformador con taps	Análisis del perfil de voltaje	Estudio de estabilidad de voltaje
1	2014	Transformer Voltage Regulation—Compact Expression Dependent on Tap Position and Primary/Secondary Voltage	15	☒	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☒	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐	
2	2019	The Effect of Suitable Network Modelling in Voltage Stability Assessment	4	☒	☐	☐	☒	☐	☐	☐	☒	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☒	☐	
3	2018	Applying Transformer Limits in Power Flow Studies Using Unconstrained Optimizations	0	☐	☐	☐	☒	☐	☐	☐	☐	☒	☐	☒	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐	
4	1997	INTERACTION AMONG MULTIPLE CONTROLS IN TAP CHANGE UNDER LOAD TRANSFORMERS	67	☐	☒	☒	☐	☐	☐	☐	☒	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☒	☐	
5	2000	Advanced Transformer Control Modeling in an Optimal Power Flow Using Newton's Method	42	☐	☒	☐	☒	☒	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☒	☒	☒	
6	2011	Hybrid Control Model of Under Load Tap Changers	17	☐	☒	☒	☐	☐	☐	☐	☒	☒	☒	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☒	☐	
7	2013	Improved model for tap-changing transformer	6	☒	☒	☒	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☒	
8	2019	Reconciling Tap-Changing Transformer Models	0	☐	☒	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☒	☐	
9	2014	Intelligent Control of On-Load Tap Changing Transformer	18	☒	☒	☒	☒	☐	☒	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☒	
10	2019	On-Load Tap-Changer Control by a Fuzzy Logic Controller	0	☐	☒	☒	☐	☐	☐	☒	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☒	

CONTROL DE VOLTAJE MEDIANTE TRANSFORMADORES CON TAPS USANDO UNA REPRESENTACIÓN DE VARIABLE DISCRETA

CONTROL DE VOLTAJE MEDIANTE TRANSFORMADORES CON TAPS USANDO UNA REPRESENTACIÓN DE VARIABLE DISCRETA																						
ITEM	AÑO	DATOS			TEMÁTICA				FORMULACION DEL PROBLEMA				RESTRICCIONES DEL PROBLEMA			ALGORITMO DE OPTIMIZACIÓN			SOLUCIÓN PROPUESTA			
		TÍTULO DEL ARTÍCULO	CITAS		Control de voltaje	Transformador con taps	Tap del transformador como variable discreta	Flujos de potencia	Método de Newton Raphson	Control del transformador con taps	Control de voltaje en estado estacionario	Control de voltaje en estado dinámico	Límites de posición del tap	Aproximación del tap a variable discreta	Transformadores habilitados para el control	Cargabilidad del sistema	Modelo pi de transformador	Flujo de potencia por Newton Raphson	Método Iterativo	Modelo de inclusión del tap del transformador al flujo de potencia	Modelo de control del transformador con taps	Análisis del perfil de voltaje
11	2014	Computer Simulation as an Aid in the Rating of a Transformer On-load Tap Changer	5	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
12	2017	Power Transformer Transient Modeling Considering the Effects of On-Load Tap Changer	0	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
13	2018	Dynamic Control and Performance of a Sen Transformer for Stabilizing an AC Transmission System and Improved Voltage Profile	3	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>
14	2016	Avoiding Adverse Interactions between Transformer Tap Changer Control and Local Reactive Power Control of Distributed Generators	7	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
15	2016	Voltage Stability Analysis Using L-index Under Various Transformer Tap Changer Settings	13	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>
16	2015	Hybrid Transformer with Matrix Converter	22	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
17	2017	Approach for on-load tap-changer control based on intelligent voltage stability margin estimation by using local measurements	2	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>
18	2016	Tracking Transformer Tap Position in Real-Time Distribution Network Power Flow Applications	12	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
19	2019	A novel electrical proximity index for voltage control in smart distribution system	2	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
20	2019	Control of Parallel ULTC Transformers in Active Distribution Systems	2	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
21	2011	Transformer Voltage Regulation—An Alternative Expression	2	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>

CONTROL DE VOLTAJE MEDIANTE TRANSFORMADORES CON TAPS USANDO UNA REPRESENTACIÓN DE VARIABLE DISCRETA

ITEM	AÑO	TÍTULO DEL ARTÍCULO	CITAS	TEMÁTICA						FORMULACION DEL PROBLEMA				RESTRICCIONES DEL PROBLEMA			ALGORITMO DE OPTIMIZACIÓN			SOLUCIÓN PROPUESTA			
				Control de voltaje	Transformador con taps	Tap del transformador como variable discreta	Flujos de potencia	Método de Newton Raphson	Control del transformador con taps	Control de voltaje en estado estacionario	Control de voltaje en estado dinámico	Límites de posición del tap	Aproximación del tap a variable discreta	Transformadores habilitados para el control	Cargabilidad del sistema	Modelo pi de transformador	Flujo de potencia por Newton Raphson	Método Iterativo	Modelo de inclusión del tap del transformador al flujo de potencia	Modelo de control del transformador con taps	Análisis del perfil de voltaje	Estudio de estabilidad de voltaje	
22	2015	Optimal Tap Setting of Voltage Regulation Transformers in Unbalanced Distribution Systems	89	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>		
23	1994	Power System Stability and Control	24799	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	
24	1999	Flexible AC Transmission Systems (FACTS)	1393	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>		
25	2009	APPLICATIONS OF FACTS CONTROLLERS	1	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>		
26	1983	Fluxo De Carga em Redes de Energia Eléctrica	644	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>		
27	2019	CONTROL DE VOLTAJE EN SISTEMAS ELÉCTRICOS DE POTENCIA USANDO TRANSFORMADORES CON TAPS	0	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>		
28	2019	ESTABILIDAD DE VOLTAJE EN SISTEMAS DE TRANSMISIÓN CONSIDERANDO LA OPERACIÓN DE TRANSFORMADORES CON TAPS	0	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>		
29	2016	Real-time Active and Reactive Power Regulation in Power Systems with Tap-changing Transformers and Controllable Loads	17	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>		
30	2006	Complementarity model for load tap changing transformers in stability based OPF problem	20	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>		
			CANTIDAD:	16	14	10	11	6	8	5	10	6	3	7	6	3	12	8	7	10	15	11	

7.2 Resumen de Indicadores

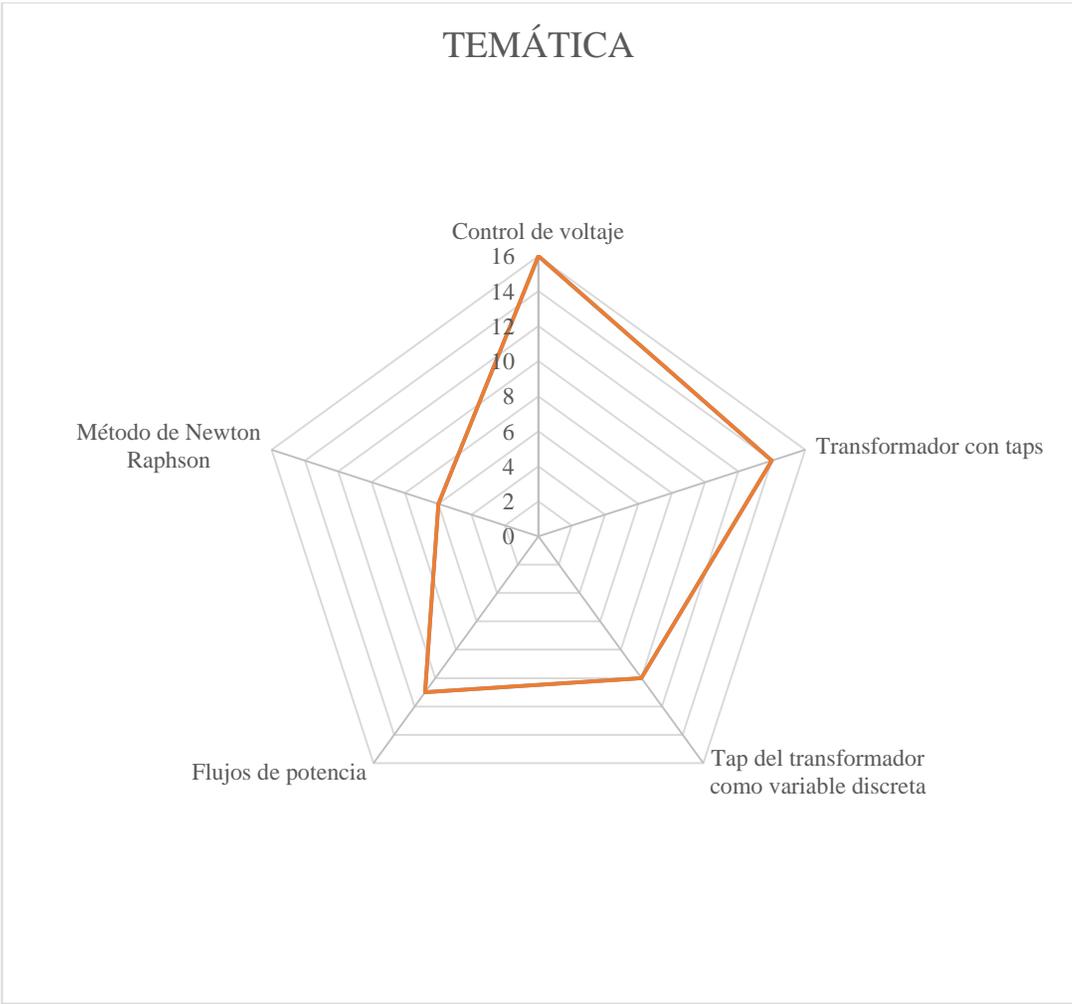


Figura 29. Resumen e indicador de la temática - Estado del arte

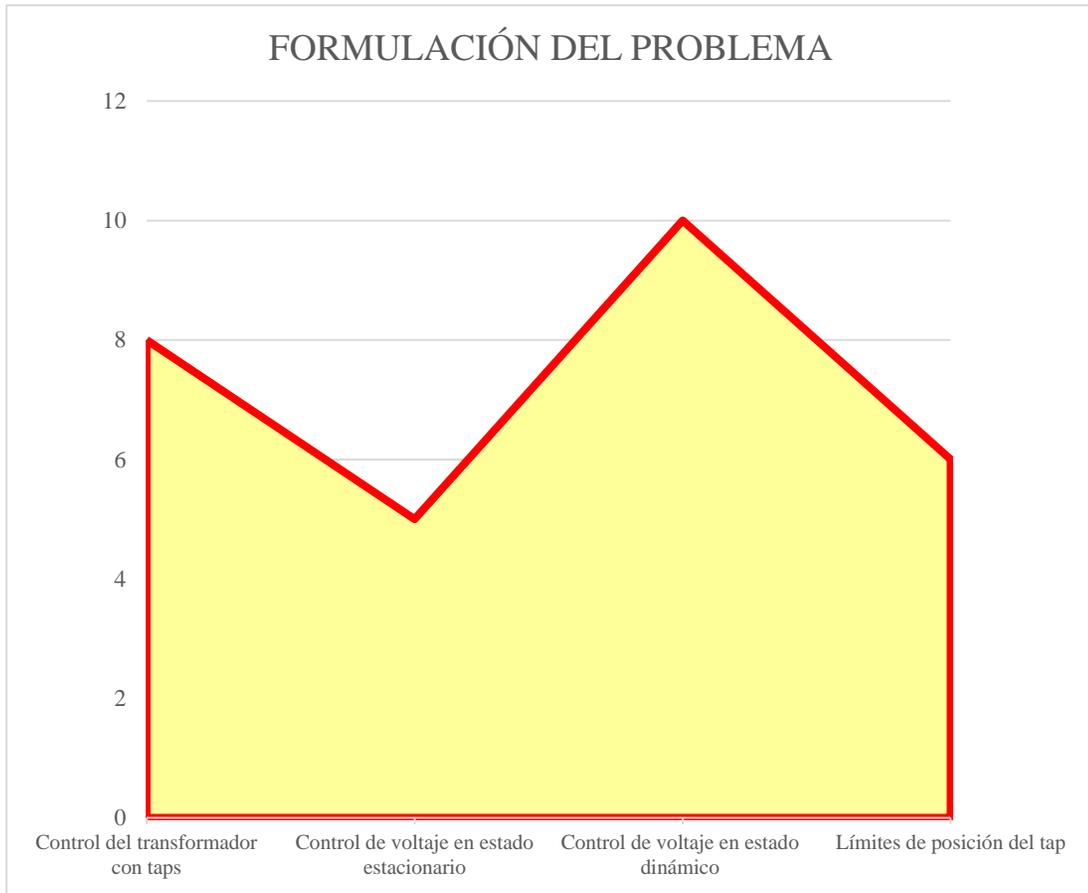


Figura 30. Indicador de formulación del problema - Estado del arte

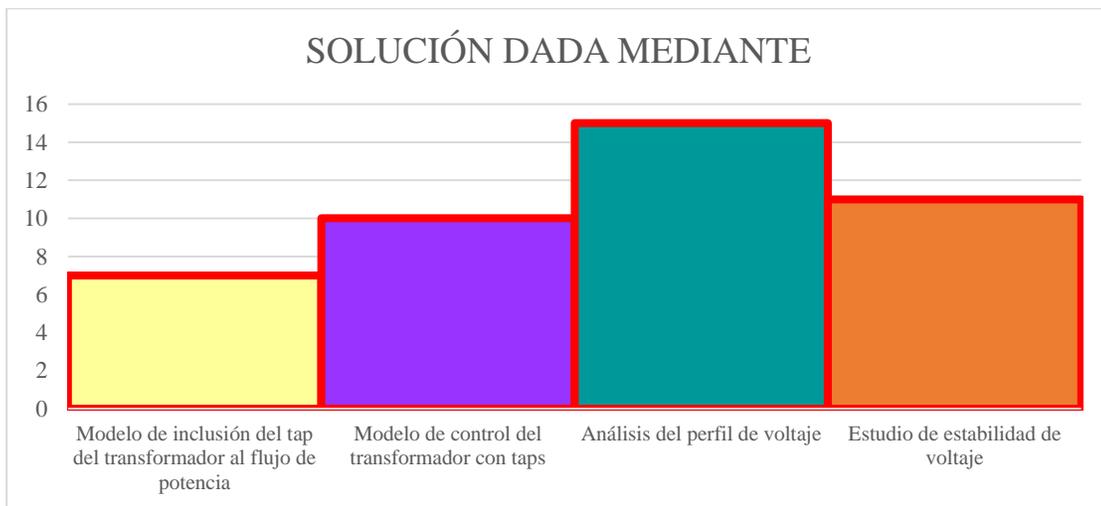


Figura 31. Indicador de solución - Estado del arte

8 Anexos

Tabla 6. Datos del Sistema IEEE de 14 barras

Datos del Sistema de Potencia								
Tipo de Barras: 1=Slack 2= Barra de Voltaje (PV) 3= Barra de Carga (PQ) 4.- Barra para control de voltaje (PQV)								
Barra N°	Tipo	Pg (pu)	Qg (pu)	Pc (pu)	Qc (pu)	Voltaje (pu)	Ycomp	Ángulo
1	1	0	0	0	0	1.06	0	0
2	2	0	0	21.7	12.7	1.045	0	0
3	2	40	0	94.2	19.1	1.01	0	0
4	3	0	0	47.8	-3.9	1.019	0	0
5	4	0	0	7.6	1.6	1.02	0	0
6	2	0	0	11.2	7.5	1.07	0	0
7	3	0	0	0	0	1.062	0	0
8	2	0	0	0	0	1.09	0	0
9	3	0	0	29.5	16.6	1.056	0	0
10	3	0	0	9	5.8	1.051	0	0
11	3	0	0	3.5	1.8	1.057	0	0
12	3	0	0	6.1	1.6	1.055	0	0
13	3	0	0	13.5	5.8	1.05	0	0
14	3	0	0	14.9	5	1.036	0	0

Tabla 7. Datos de líneas del sistema IEEE de 14 barras

Datos de las Líneas de transmisión				
Barra i	Barra j	R (pu)	X (pu)	Y (pu)
1	2	0.01938	0.05917	0.0528
1	5	0.05403	0.22304	0.0492
2	3	0.04699	0.19797	0.0438
2	4	0.05811	0.17632	0.034
2	5	0.05695	0.17388	0.0346
3	4	0.06701	0.17103	0.0128
4	5	0.01335	0.04211	0
6	11	0.09498	0.1989	0
6	12	0.12291	0.25581	0
6	13	0.06615	0.13027	0
7	8	0	0.17615	0
7	9	0	0.11001	0
9	10	0.03181	0.0845	0

Datos de las Líneas de transmisión				
Barra i	Barra j	R (pu)	X (pu)	Y (pu)
9	14	0.12711	0.27038	0
10	11	0.08205	0.19207	0
12	13	0.22092	0.19988	0
13	14	0.17093	0.34802	0

Tabla 8. Datos del Sistema IEEE de 39 barras

Datos del Sistema de Potencia								
Tipo de Barras: 1=Slack 2= Barra de Voltaje (PV) 3= Barra de Carga (PQ) 4.- Barra para control de voltaje (PQV)								
Barra N°	Tipo	Pg (pu)	Qg (pu)	Pc (pu)	Qc (pu)	Voltaje (pu)	Ycomp	Ángulo
1	3	0	0	97.6	44.2	1.0394	0	0
2	3	0	0	0	0	1.0485	0	0
3	3	0	0	322	2.4	1.0307	0	0
4	3	0	0	500	184	1.0045	0	0
5	3	0	0	0	0	1.006	0	0
6	3	0	0	0	0	1.0082	0	0
7	3	0	0	233.8	84	0.9984	0	0
8	3	0	0	522	176	0.9979	0	0
9	3	0	0	6.5	-66.6	1.0383	0	0
10	3	0	0	0	0	1.0178	0	0
11	3	0	0	0	0	1.0134	0	0
12	3	0	0	8.53	88	1.0008	0	0
13	3	0	0	0	0	1.0149	0	0
14	3	0	0	0	0	1.0123	0	0
15	3	0	0	320	153	1.0162	0	0
16	3	0	0	329	32.3	1.0325	0	0
17	3	0	0	0	0	1.0342	0	0
18	3	0	0	158	30	1.0316	0	0
19	3	0	0	0	0	1.0501	0	0
20	4	0	0	680	103	0.991	0	0
21	3	0	0	274	115	1.0323	0	0
22	4	0	0	0	0	1.0501	0	0
23	3	0	0	247.5	84.6	1.0451	0	0
24	3	0	0	308.6	-92.2	1.038	0	0
25	3	0	0	224	47.2	1.0577	0	0

Datos del Sistema de Potencia								
Tipo de Barras: 1=Slack 2= Barra de Voltaje (PV) 3= Barra de Carga (PQ) 4.- Barra para control de voltaje (PQV)								
Barra N°	Tipo	Pg (pu)	Qg (pu)	Pc (pu)	Qc (pu)	Voltaje (pu)	Ycomp	Ángulo
26	3	0	0	139	17	1.0526	0	0
27	3	0	0	281	75.5	1.0383	0	0
28	3	0	0	206	27.6	1.0504	0	0
29	3	0	0	283.5	26.9	1.0501	0	0
30	2	250	0	0	0	1.0499	0	0
31	1	0	0	9.2	4.6	0.982	0	0
32	2	650	0	0	0	0.9841	0	0
33	2	632	0	0	0	0.9972	0	0
34	2	508	0	0	0	1.0123	0	0
35	2	650	0	0	0	1.0494	0	0
36	2	560	0	0	0	1.0636	0	0
37	2	540	0	0	0	1.0275	0	0
38	2	830	0	0	0	1.0265	0	0
39	2	1000	0	1104	250	1.03	0	0

Tabla 9. Datos de líneas del sistema IEEE de 39 barras

Datos de las Líneas de transmisión				
Barra i	Barra j	R (pu)	X (pu)	Y (pu)
1	2	0.0035	0.0411	0.6987
1	39	0.001	0.025	0.75
2	3	0.0013	0.0151	0.2572
2	25	0.007	0.0086	0.146
3	4	0.0013	0.0213	0.2214
3	18	0.0011	0.0133	0.2138
4	5	0.0008	0.0128	0.1342
4	14	0.0008	0.0129	0.1382
5	6	0.0002	0.0026	0.0434
5	8	0.0008	0.0112	0.1476
6	7	0.0006	0.0092	0.113
6	11	0.0007	0.0082	0.1389
7	8	0.0004	0.0046	0.078
8	9	0.0023	0.0363	0.3804
9	39	0.001	0.025	1.2

Datos de las Líneas de transmisión				
Barra i	Barra j	R (pu)	X (pu)	Y (pu)
10	11	0.0004	0.0043	0.0729
10	13	0.0004	0.0043	0.0729
13	14	0.0009	0.0101	0.1723
14	15	0.0018	0.0217	0.366
15	16	0.0009	0.0094	0.171
16	17	0.0007	0.0089	0.1342
16	19	0.0016	0.0195	0.304
16	21	0.0008	0.0135	0.2548
16	24	0.0003	0.0059	0.068
17	18	0.0007	0.0082	0.1319
17	27	0.0013	0.0173	0.3216
21	22	0.0008	0.014	0.2565
22	23	0.0006	0.0096	0.1846
23	24	0.0022	0.035	0.361
25	26	0.0032	0.0323	0.513
26	27	0.0014	0.0147	0.2396
26	28	0.0043	0.0474	0.7802
26	29	0.0057	0.0625	10.29
28	29	0.0014	0.0151	0.249