

**MEJORAMIENTO DE LOS PERFILES DE VOLTAJE EN SISTEMAS DE  
DISTRIBUCIÓN MEDIANTE ÓPTIMA UBICACIÓN DE REGULADORES DE  
TENSIÓN CON CAMBIADORES DE DERIVACIÓN USANDO BÚSQUEDA  
EXHAUSTIVA**

**UNIVERSIDAD POLITÉCNICA SALESIANA  
SEDE QUITO**

**CARRERA:  
ELECTRICIDAD**

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

**TEMA:  
MEJORAMIENTO DE LOS PERFILES DE VOLTAJE EN SISTEMAS DE  
DISTRIBUCIÓN MEDIANTE ÓPTIMA UBICACIÓN DE REGULADORES DE  
TENSIÓN CON CAMBIADORES DE DERIVACIÓN USANDO BÚSQUEDA  
EXHAUSTIVA**

**AUTOR:  
AXCELL JOSUÉ HERRERA GUATO**

**TUTOR:  
ALEXANDER ÁGUILA TÉLLEZ**

**Quito, Noviembre del 2021**

Axcell Josué Herrera Guato

**MEJORAMIENTO DE LOS PERFILES DE VOLTAJE EN SISTEMAS DE DISTRIBUCIÓN MEDIANTE ÓPTIMA UBICACIÓN DE REGULADORES DE TENSIÓN CON CAMBIADORES DE DERIVACIÓN USANDO BÚSQUEDA EXHAUSTIVA**

Universidad Politécnica Salesiana, Quito – Ecuador 2021  
Ingeniería Eléctrica

Breve reseña histórica e información de contacto.



**Axcell Josué Herrera Guato** (Y'1996 – M'11.) Realizó sus estudios secundarios en Colegio Instituto Tecnológico Superior Central Técnico en la especialidad de Técnico Industrial Instalaciones, Equipos y Maquinas Eléctricas. Estudiante de la carrera de Ingeniería Eléctrica de la Universidad Politécnica Salesiana. Su trabajo se basa en el Mejoramiento de los perfiles de voltaje en sistemas de distribución mediante óptima ubicación de reguladores de tensión con cambiadores de derivación usando búsqueda exhaustiva. [aherrerag3@est.ups.edu.ec](mailto:aherrerag3@est.ups.edu.ec)

*Dirigido por:*



**Alexander Águila Téllez** (Y'1981 – M'09) recibió el título de Ingeniero Eléctrico y el de Máster en Eficiencia Energética en los años 2005 y 2010 respectivamente. Doctor en Ingeniería en la Universidad Pontificia Bolivariana - Colombia-Medellín año 2021. Director de la carrera de Ingeniería Eléctrica, miembro del Grupo de Investigación GIREI. Sus principales intereses de investigación incluyen la compensación VOLT-VAR en redes de distribución eléctrica, redes inteligentes, minimización de pérdidas de energía, las energías renovables y la eficiencia energética. Es profesor investigador de la Universidad Politécnica Salesiana-Ecuador. [aaguila@ups.edu.ec](mailto:aaguila@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

©2021 Universidad Politécnica Salesiana  
QUITO-ECUADOR

## DECLARATORIA DE COAUTORÍA DEL DOCENTE TUTOR/A

Yo, Alexander Águila Téllez declaro que bajo mi dirección y asesoría fue desarrollado el trabajo de titulación MEJORAMIENTO DE LOS PERFILES DE VOLTAJE EN SISTEMAS DE DISTRIBUCIÓN MEDIANTE ÓPTIMA UBICACIÓN DE REGULADORES DE TENSION CON CAMBIADORES DE DERIVACIÓN USANDO BÚSQUEDA EXHAUSTIVA realizado por AXCELL JOSUÉ HERRERA GUATO, obteniendo un producto que cumple con todos los requisitos estipulados por la Universidad Politécnica Salesiana para ser considerado como trabajo final de titulación.



.....  
Alexander Águila Téllez.

C.C.: 1755983184

Quito, Noviembre del 2021.

## **CESIÓN DE DERECHOS DE AUTOR**

Yo, AXCELL JOSUÉ HERRERA GUATO, con documento de identificación No 1722694757, 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: MEJORAMIENTO DE LOS PERFILES DE VOLTAJE EN SISTEMAS DE DISTRIBUCIÓN MEDIANTE ÓPTIMA UBICACIÓN DE REGULADORES DE TENSIÓN CON CAMBIADORES DE DERIVACIÓN USANDO BÚSQUEDA EXHAUSTIVA, 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.



.....  
Axcell Josué Herrera Guato.

C.C.: 1722694757.

Quito, Noviembre del 2021.

## ***ÍNDICE GENERAL***

1	Introducción.....	2
2	Marco teórico.....	4
2.1	Calidad de energía en el sistema de distribución.....	4
2.1.1	Variaciones de voltaje .....	4
2.1.2	Desviación promedio de voltaje .....	4
2.1.3	Desviación máxima de voltaje.....	5
2.2	Reguladores de tensión.....	5
2.2.1	Transformadores con tap .....	5
2.2.2	Generadores sincrónicos y (AVR).....	6
2.2.3	Compensación reactiva en paralelo .....	6
2.2.4	Compensador estático (D-STATCOM).....	7
2.3	Ubicación óptima de transformador con tap .....	7
2.3.1	Análisis de la optimización por el método de búsqueda exhaustiva .....	8
2.4	Modelo de Flujos de potencia en transformador con taps .....	9
3	Metodología.....	11
3.1	Procedimiento de resolución .....	11
3.2	Casos de estudio .....	12
3.2.1	Caso 1 .....	12
3.2.2	Caso 2 .....	12
4	Análisis de resultados .....	13
4.1	Análisis del perfil de tensión en el sistema de prueba IEEE de 13 barras.....	13
4.1.1	Análisis del flujo de potencia reactiva en el sistema de prueba IEEE de 13 barras .....	14
4.2	Análisis del perfil de tensión modificando la carga a mínima capacidad en el sistema de prueba IEEE de 13 barras .....	14
4.2.1	Análisis de flujo de potencia modificando la carga a mínima capacidad en el sistema de prueba IEEE de 13 barras .....	16
5	Conclusiones.....	16
5.1	Trabajos futuros.....	17
6	Referencias .....	17

## *ÍNDICE DE FIGURAS*

Figura 1. Diagrama Esquemático de la Ubicación Óptima del Regulador de Tensión con derivación.....	3
Figura 2. Fluctuaciones de voltaje en el sistema de distribución.....	4
Figura 3. Diagrama de bloques de un sistema de control de transformador con variación de tap ..	5
Figura 4. Diagrama de bloques de un sistema de regulación de voltaje AVR .....	6
Figura 5. Circuito esquemático de compensación en paralelo .....	7
Figura 6. Diagrama unifilar D-STATCOM .....	7
Figura 7. Diagrama bloques LTC .....	8
Figura 8. Sistema de distribución de 13 barras IEEE.....	9
Figura 9. Mecanismo de cambio tap en transformadores para flujos de potencia .....	9
Figura 10. Ubicación óptima del transformador con taps en el sistema IEEE 13 barras .	12
Figura 11. Ubicación óptima del transformador con taps en el sistema IEEE 13 barras con reducción en la carga.....	13
Figura 12. Mejora de los perfiles de voltaje en el sistema IEEE 13 barras.....	14
Figura 13. Diagrama de barras de la mejora de los perfiles de voltaje en el sistema IEEE 13 barras. ....	14
Figura 14. Flujo de potencia reactiva en el sistema IEEE 13 barras.....	14
Figura 15. Perdidas de potencia en el sistema IEEE 13 barras. ....	14
Figura 16. Mejora de los perfiles de voltaje con mínima carga en el sistema IEEE 13 barras. ....	15
Figura 17. Diagrama de barras de la mejora de los perfiles de voltaje con mínima carga en el sistema IEEE 13 barras.....	16
Figura 18. Flujo de potencia reactiva en el sistema con mínima carga IEEE 13 barras. .	16
Figura 19. Perdidas de potencia con mínima carga en el sistema IEEE 13 barras.....	16

## *ÍNDICE DE TABLAS*

Tabla 1. Efecto de perturbaciones eléctricas en el sistema de distribución. ....	4
Tabla 2. Datos del tap en [p.u.] del transformador.....	13
Tabla 3. Perfil de voltaje en [p.u.] del SEP .....	13
Tabla 4. Datos del tap en [p.u.] del transformador.....	15
Tabla 5. Perfil de voltaje en [p.u.] del SEP con mínima carga .....	15

# MEJORAMIENTO DE LOS PERFILES DE VOLTAJE EN SISTEMAS DE DISTRIBUCIÓN MEDIANTE ÓPTIMA UBICACIÓN DE REGULADORES DE TENSIÓN CON CAMBIADORES DE DERIVACIÓN USANDO BÚSQUEDA EXHAUSTIVA

## Resumen

Este trabajo de investigación presenta una metodología para una ubicación óptima de reguladores de tensión en el sistema de distribución, principalmente por ineficientes perfiles de voltaje, mejorando su robustez, proporcionando una correcta calidad del suministro eléctrico, lo primordial es instalar transformadores con taps en modelos de sistemas de distribución, una de las características principales de este modelo es obtener un control de potencia reactiva al modificar las espiras en devanado. Al implementar el efecto en el modelo matemático Newton-Raphson se puede adquirir mejor control de voltaje. Una vez identificado la variable de control continuamos con la ubicación óptima de los transformadores que definirá mediante el algoritmo de búsqueda exhaustiva permitiendo hacer un análisis de cada posible espacio factible de localización, considerando restricciones de desviación promedio y desviación máxima de voltaje para encontrar la ubicación adecuada del transformador. La metodología propuesta será validada en el software informático Matlab, esta será aplicada en el modelo de prueba IEEE de 13 barras de distribución. Con los valores alcanzados se permitirán evaluar la mejora de los perfiles de voltaje.

**Palabras Clave:** Variadores de tap, Perfil de voltaje, Búsqueda exhaustiva, Flujos de potencia, Ubicación óptima de transformadores.

## Abstract

This research work presents a methodology for an optimal location of voltage regulators in the distribution system, mainly due to inefficient voltage profiles, improving it is robustness, providing a correct quality of power supply, the main thing is to install transformers with taps in distribution system models, one of the main features of this model is to obtain a reactive power control by modifying the turns in winding. By implementing the effect in the Newton-Raphson mathematical model, better voltage control can be acquired. Once the control variable is identified, we continue with the optimal location of the transformers that will be defined by the exhaustive search algorithm allowing to make an analysis of each possible feasible location space, considering average deviation and maximum voltage deviation restrictions to find the appropriate location of the transformer. The proposed methodology will be validated in Matlab computer software, this will be applied in the IEEE test model of 13 bus. The results obtained from the operational point of view will allow to evaluate the improvement of the voltage profiles.

**Keywords:** Tap changers, Voltage profile, Exhaustive search, Power flows, Optimal transformer placement.

# 1 Introducción

El sistema de distribución en ocasiones puede ser radial y desequilibrado, ya que su alimentación es desde un solo lugar presentado un único camino simultáneo al paso de la potencia hacia la carga, si esta falla no garantizará el suministro, debido a que se provocará una caída de tensión desde la barra inicial hasta la barra final en el sistema eléctrico de potencia (SEP). Un sistema de servicio sobrecargado que carece de soporte de energía reactiva generalmente conduce a variaciones de voltaje y no puede proporcionar una distribución de tensión segura para el sistema [1], [2], [3].

En un sistema que el colapso ocurre periódicamente, un soporte inmediato de potencia reactiva puede evitar el desplome repetido de voltaje. La tarea primordial es asegurarse de que se proporcionen servicios rentables y fiables suministrando una calidad de energía y una tensión del servicio dentro del rango predeterminado [4].

Los progresos en el área de la electrónica de potencia y controladores digitales han sido utilizados para controlar el voltaje. Estos dispositivos conocidos como STATCOM (Static Synchronous Compensator), Reguladores síncronos (AVR), Compensación reactiva en paralelo; ha recibido mucha atención por su capacidad de control de la tensión red del sistema de energía inyectando u absorbiendo potencia reactiva hacia o desde el sistema [5], [6], [7].

El flujo de potencia es una herramienta básica, cuando existe la necesidad de analizar el sistema eléctrico desde las siguientes perspectivas de operar o enfocarse en la planificación. Las ecuaciones con modelos

matemáticos que permiten definir parámetros para mantener el sistema funcionando en condiciones normales minimizando las pérdidas en el SEP [8].

La certeza de los valores obtenidos se basan en su mayoría, en la precisión del modelamiento de los dispositivos, como pueden ser los reguladores de tensión, se han utilizado durante mucho tiempo para controlar las fluctuaciones de tensión en las barras, por lo que se han realizado amplios estudios y la incorporación de estos modelos en el flujo de potencia [9], [10].

En [11], conlleva el análisis de incluir el control de tensión implementando el transformador con el ajuste de cambiador de tomas en carga (LTC), donde este control está limitado por la inyección de potencia reactiva, las tomas mínimas y máximas del LTC y el rango de funcionamiento normal de tensión, considera la matriz jacobiana y un conjunto linealizado de las ecuaciones de flujo de carga.

El LTC proporciona un medio de control de potencia reactiva, una función fundamental del transformador en un SEP es convertir un nivel de tensión a otro, se debe modificar la posición del tap en función a los cambios en la demanda. Eso puede dar lugar a varias operaciones consecutivas de cambio de la posición en el interruptor de selección, con el fin de establecer a un valor de tensión adecuado [12].

Para el funcionamiento del LTC, se analiza una conmutación del interruptor de selección, al aumentar o disminuir el número de espiras del devanado, dando como resultado una variación de la impedancia, obteniendo un modelo distinto al clásico usado en estudios de flujo de potencia, manteniendo un voltaje constante e ideal [10], [13].

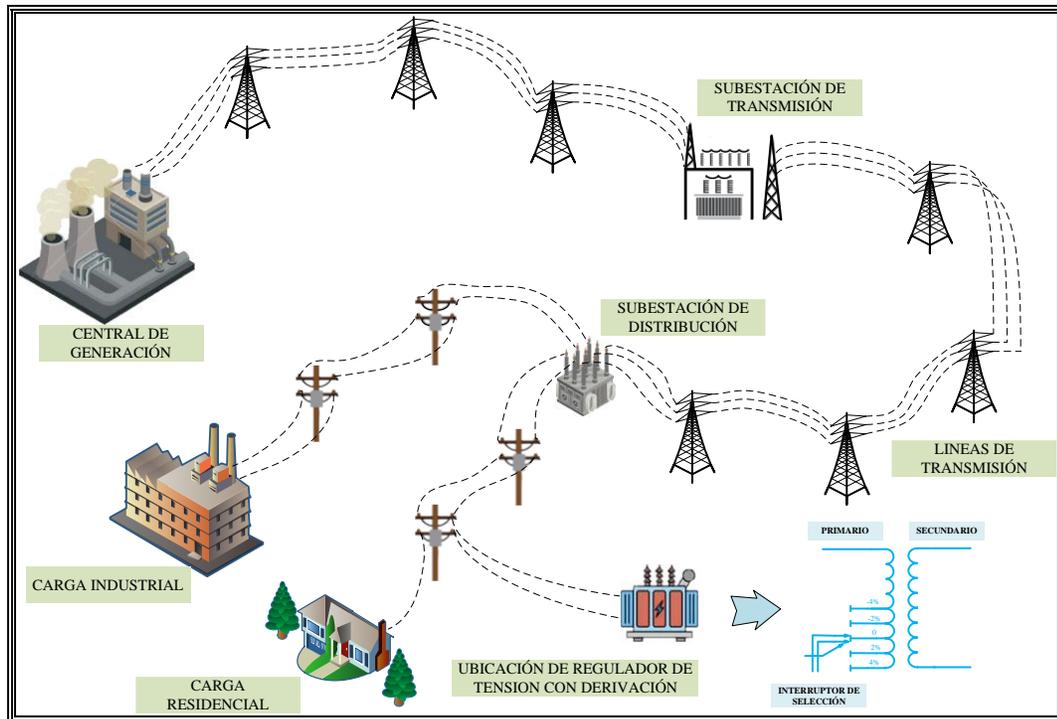


Figura 1. Diagrama Esquemático de la Ubicación Óptima del Regulador de Tensión con derivación.

De esta forma implementar el transformador como variable de control, el cambio de taps en estudios de flujos de potencia es la solución para un funcionamiento óptimo del SEP mejorando de los perfiles de voltaje [14], [15].

Se observa en la Figura 1 un diagrama reducido donde se muestra físicamente la ubicación adecuada del regulador de tensión con interruptor de selección se colocará directamente en el nodo del sistema de distribución más cercano donde la caída de voltaje esta fuera de los límites predeterminado, por consiguiente, proporcionará al sistema eléctrico un aumento en los perfiles de tensión en cada barra.

En el siguiente artículo de investigación se plantea encontrar la ubicación óptima del transformador con derivación al momento de incluir los taps como variable de control mediante método Newton-Raphson de solución de flujos de potencia. En este caso de

estudio se considerará un sistema de prueba bajo condiciones iniciales, donde se obtenga una regulación de voltaje ajustado el valor de tap del transformador. Para complementar el planteamiento de los componentes es conveniente realizar un análisis por el algoritmo de búsqueda exhaustiva, que determina la barra adecuada para instalar reguladores de tensión.

En el capítulo 2 se despliega un estado del arte con definiciones sintetizadas para ímpetu del artículo. En el capítulo 3 se realiza la formulación del método, en donde se tiene el algoritmo de búsqueda exhaustiva para la ubicación óptima y el algoritmo para la solución de flujos de potencia. Continuando con un análisis de resultados en el capítulo 4, en el capítulo 5 exponer las conclusiones y referencias del desarrollo del artículo y por último los trabajos futuros.

## 2 Marco teórico

### 2.1 Calidad de energía en el sistema de distribución

Uno de los inconvenientes frecuentes relativos a la calidad de la energía, es que la mayor parte de los acontecimientos están relacionados a variaciones en la tensión, estos tienen la posibilidad de provocar interrupciones serias de suministro continuo de energía eléctrica.

Todo lo siguiente está asociado al incremento de dispositivos eléctricos industriales acoplados a la red de baja tensión, lo que genera inestabilidad en la carga. La instrumentación industrial juntamente con las cargas de naturaleza no lineal, han ocasionado modificaciones en la calidad de la energía por medio de la introducción de elementos armónicos no deseados, apreciando oscilaciones concurrentes en la tensión del alimentador [16], [17].

Tabla 1. Efecto de perturbaciones eléctricas en el sistema de distribución.

Característica UNE-EN 50160	Efectos sobre el sistema de distribución	
	Gravedad	Probabilidad
Frecuencia	Media	Muy baja
Variaciones de voltaje	Media	Media
Huecos de tensión	Media	Muy alta
Interrupciones breves	Alta	Alta
Interrupciones breves	Muy alta	Media
Desequilibrio de tensión	Baja	Muy baja
Tensiones armónicas	Media	Baja

#### 2.1.1 Variaciones de voltaje

Las variaciones de voltaje son fluctuaciones sistemáticas del perfil de tensión, los cuales generalmente no deben exceder el límite especificado de

$\pm 5\%$  en alto voltaje,  $\pm 6\%$  en medio voltaje y  $\pm 8\%$  en bajo voltaje [18]. Se producen comúnmente por conmutaciones de carga, oscilaciones de amplitud de la tensión de alimentación, alteración fluctuante de capacidad que se absorbe de distintos receptores del sistema [19].

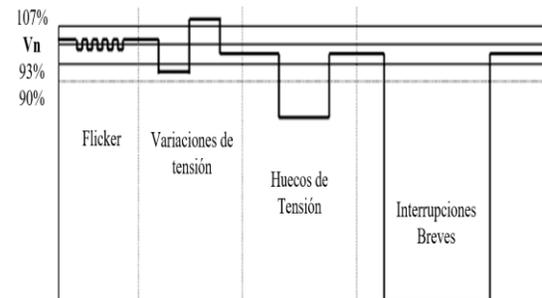


Figura 2. Fluctuaciones de voltaje en el sistema de distribución

Para mantener la tensión adecuada en la carga residencial o industrial, lo viable de su valor eficaz, se necesita disminuir la desviación media del voltaje y la desviación máxima de voltaje, que caracteriza la amplitud de las oscilaciones de tensión cerca de ese valor [20].

La desviación promedio de tensión puede limitarse, modificando de manera eficaz, la relación de transformación mediante el interruptor de selección. Para atenuar el índice de desviación máxima de tensión es adecuado implementar reguladores automáticos de voltaje [21].

#### 2.1.2 Desviación promedio de voltaje

Cuando las magnitudes de voltaje de los nodos en la red de distribución se desvían del voltaje de operación normal a niveles prácticos, entonces se llama desviación de voltaje [3].

La desviación promedio de tensión asegura obtener y contrastar el índice medido de desviación que se obtienen en el SEP, la desviación promedio se utiliza como un factor determinante en la

ubicación adecuada de transformadores con tap. Para obtener la desviación promedio de tensión se utiliza la ecuación [22]:

$$Vp = \frac{\sum_{i=1}^n |Vd_i - V_i|}{n} \quad (1)$$

Donde:

- $Vd_i$  Voltajes deseados en la barra  $i$  en [p.u].
- $V_i$  Voltaje en la barra  $i$  [p.u].
- $n$  Número de barras del sistema.

### 2.1.3 Desviación máxima de voltaje

Al reducir la desviación de voltaje del sistema, mejora la eficiencia. Por lo tanto una nodo con una desviación máxima de voltaje es la que requiere la mayor compensación de potencia reactiva, la posición del cambiador de derivación se determina observando el valor mínimo desviaciones máximas de voltaje la cual se formula de la siguiente forma [22].

$$Vm = \max_{1 < i < n} |Vd_i - V_i| \quad (2)$$

Donde:

- $Vd_i$  Voltajes deseados en la barra  $i$  en [p.u].
- $V_i$  Voltaje en la barra  $i$  [p.u].
- $n$  Número de barras del sistema.

## 2.2 Reguladores de tensión

La regulación de voltaje es una utilidad de operación que posee la misión de guardar los escenarios de tensión internamente en un rango admitido de la nominal, y suministrar un correcto flujo de potencia para el sistema de distribución, de manera que el SEP posea la aptitud de compensar el requerimiento de potencia reactiva y consiga cumplir

con un alto envío de potencia activa [16], [23].

### 2.2.1 Transformadores con tap

Un método que se basa en el control de voltaje puede obtenerse mediante transformadores con cambiadores de derivación. Esta herramienta permite administrar capacidad agregando potencia de carga en lugar de que sobrepase su límite máximo del SEP. Ante el siguiente acontecimiento sostiene los perfiles de tensión en los límites permisibles en base a un impulso de control [24].

Los transformadores con cambiadores de derivación generalmente tienen un interruptor de posición más conocidos como taps en uno o más devanados, así lograr una variación de la relación de transformación en el regulador de tensión la cual puede ser manual o automática y cambiar el nivel de voltaje.

El regulador de tensión calcula la modificación entre la tensión del interruptor de selección de la máquina y una medida de referencia, se proporciona un impulso de control para aumentar o disminuir las espiras del bobinado del transformador, obtener un control en el perfil de tensión [25].

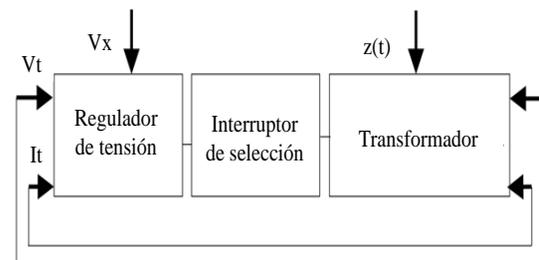


Figura 3. Diagrama de bloques de un sistema de control de transformador con variación de tap [26].

Para mantener un perfil tensión dentro de los límites permisibles es necesario la implementación de un regulador de tensión con taps, en uno de

sus devanados que pueda modificar el voltaje y a su vez estar equipado para que permitan trabajar bajo carga automáticamente para sostener el voltaje permanente en el nodo de la carga o el nivel de perfil de tensión a su nivel más alto o mínimo de tolerancia [26], [1].

En la maniobra del regulador de tensión con cambiadores de derivación se obtiene las siguientes consideraciones, frente a la permutación del interruptor selector se genera una situación decisiva debido a que surge un rango de tensión nominal de funcionamiento y la tensión inestable generada, lo cual crea una acción invertida de control, elevando los perfiles de tensión, por lo cual es sustancial tener en cuenta una posible alteración de la tensión entre el devanado de bajo y alto voltaje [27].

### 2.2.2 Generadores sincrónicos y (AVR)

El sistema de excitación del generador síncrono, su funcionalidad primordial es proveer la corriente directa requerida para excitar el circuito del generador, además puede hacer otras funcionalidades, como: vigilar el voltaje en los plataformas del generador, vigilar el flujo de potencia reactiva y hacer más estable la seguridad del sistema [5].

Regulador automático de voltaje (AVR) brinda el mecanismo para vigilar la intensidad del voltaje del terminal de la máquina. Para vigilar de forma automática el voltaje del terminal, una señal de transductor debe compararse con un voltaje de referencia y amplificarse para producir la regulación del voltaje en el excitador principal [5] [28].

El control de tensión presenta una veloz convergencia, al momento de conseguir una rápida respuesta en las restricciones de temperatura en las

corrientes generadas al interior del campo y armadura de los generadores síncronos [29].

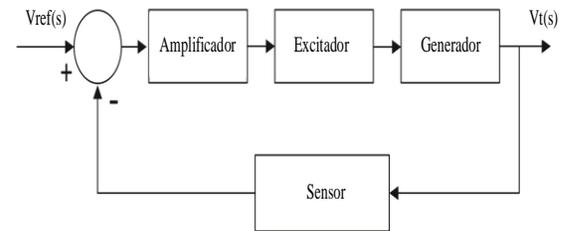


Figura 4. Diagrama de bloques de un sistema de regulación de voltaje AVR [28].

Los generadores síncronos modernos están equipados con control automático de voltaje. El AVR controla el voltaje de estado permanente y brinda pulsos de excitación en ocasiones de emergencia [28]. La característica principal del AVR es controlar el voltaje en la barra del generador a través del sistema de excitación. La señal de entrada AVR es una señal que se desvía del voltaje nominal para cambiar la tensión, el AVR perjudica el voltaje de excitación del excitador y va a afectar el voltaje de excitación del generador luego de un corto transitorio del mismo modo que la corriente de excitación [30].

### 2.2.3 Compensación reactiva en paralelo

Una administración correcta de compensadores que están dispuestos en diferentes tamaños para proveer compensación de capacidad reactiva. La conmutación de condensadores facilita que la capacidad reactiva se mueva sin la necesidad de atravesar el camino de todo el sistema eléctrico. Al minimizar el flujo de corriente reactiva en el sistema, va a aumentar el voltaje del sistema eléctrico, añadir más rectificación de alta capacidad será oportuna para aumentar los perfiles de tensión del sistema eléctrico [6].

El compensador de capacidad reactiva trabaja con la máxima eficacia y controla sus elementos en funcionalidad del valor medido en la barra piloto, tienen la posibilidad de ser bancos de carga inductiva igualando los problemas generados en la aumento de los perfiles de tensión o utiliza bancos de carga capacitiva para corregir reactivos en la demanda, este escenario se conoce como control secundario [31].

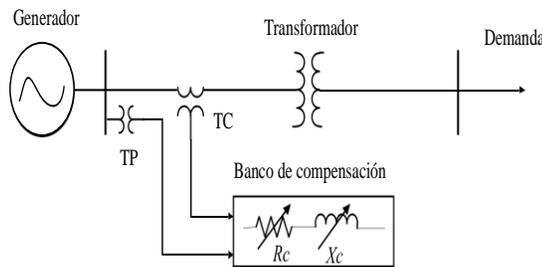


Figura 5. Circuito esquemático de compensación en paralelo [32].

El compensador dispone de una reactancia ajustable  $R_c$  y una reactancia  $X_c$  que simula la impedancia entre los terminales del generador y el punto en el cual se puede realizar un control de voltaje [32].

#### 2.2.4 Compensador estático (D-STATCOM)

El compensador (D-STATCOM) es un equipo estático utilizado en redes de distribución de energía. Se emplea para optimizar la calidad de la energía, es decir, factor de potencia, perfil de voltaje, estabilidad de voltaje. La aptitud de inyectar y absorber reactivos de manera ligera y dinámica provoca que sea muy usado en este campo. D-STATCOM inyecta corriente en el sistema en el punto de acoplamiento habitual, lo que puede ser de manera asistida en la rectificación del aspecto, lo que ayuda en la modificación del factor de potencia [7].

Ofrece la compensación de potencia reactiva según las insuficiencias del sistema, a la vez trabajan como un condensador cuando el sistema necesita capacidad reactiva y trabaja como inductor cuando el sistema tiene más capacidad reactiva [33]. Está conectado en bifurcación al sistema de distribución a través de un transformador de distribución de energía estándar.

El D-STATCOM genera potencia reactiva continuamente variable a un nivel superior a su clasificación máxima de MVA [34]. Estos dispositivos se utilizan con bancos de carga capacitiva, su acción ofrece un perfil de tensión correcto, al introducir compensación reactiva, disminuye al observar una variación en la tensión deteriorando al SEP.

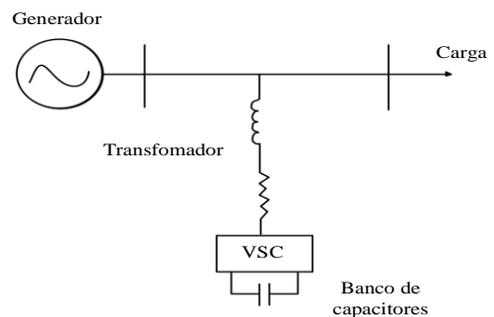


Figura 6. Diagrama unifilar D-STATCOM [7].

#### 2.3 Ubicación óptima de transformador con tap

El procedimiento desarrollado tiene presente la instalación del regulador de voltaje, el inconveniente de la localidad del transformador con variador tap corresponde primordialmente a saber la posición, el número mínimo de reguladores de voltaje en el alimentador y la preferible posición del cambiador de tap para cada etapa en que el conjunto está surtiendo efecto, tal es así que la curva de voltaje esté dentro de los parámetros preestablecidos en el sistema [35].

La localidad de reguladores de tensión establece las barras y la posición del tap para cada etapa y en cada escenario de demanda de los transformadores. Los reguladores se colocan en el sistema con el propósito primordial de reducir las desviaciones de voltaje de un valor nominal [36], precisando solamente sobre parámetros técnicos de operación del circuito, la posición del regulador de voltaje en esta etapa se apoya en determinar la preferible satisfacción para equilibrar la variación de tensión en el circuito [37].

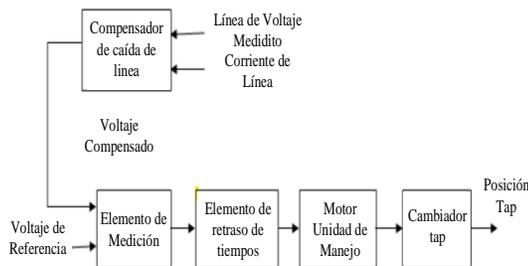


Figura 7. Diagrama bloques LTC [35].

La selección de una barra para la ubicación de un regulador de tensión se ejecuta clasificando antes todos los nodos de tensión principal del sistema según criterios por defecto para la actualización. Una misma barra puede ingresar en la misma o en diferentes clasificaciones en relación de las magnitudes de los voltajes que dicho nodo presente para cada etapa [1].

El algoritmo para la ubicación de los reguladores de tensión ofrece resoluciones confiables y coherentes puesto que una vez establecido el regulador se ejecuta flujo de potencia para analizar la mejora del perfil de voltaje a lo largo de todo el alimentador [38].

Para obtener la mejor distribución de los transformadores con variadores tap en las barras objetivo a lo largo de la red, se toma en cuenta el perfil de voltaje en cada barra y con estos resultados se lleva a cabo la optimización con el algoritmo de búsqueda exhaustiva, realizan todas las combinaciones para encontrar la más eficaz [39].

### 2.3.1 Análisis de la optimización por el método de búsqueda exhaustiva

Los algoritmos que examinan las probables composiciones se nombran algoritmos de búsqueda exhaustiva. Los algoritmos de fuerza bruta extraña vez explora todas las composiciones, pero escoge la conjunción más prometedora usando como relación la funcionalidad propósito a mejorar [40], [41].

Al examinar todas las combinaciones probables de elementos, algunos problemas de optimización tienen la posibilidad de resolverse con exactitud y hallar con satisfacción una solución entre ellos, al escoger la oportunidad de optimizar una determinada función objetivo entre todas las posibilidades mejora con cierta funcionalidad propósito entre todas las opciones [40].

El primordial inconveniente de este algoritmo es que, al investigar todas las resoluciones probables, su consumo de tiempo de máquina es prominente, pero en esta situación funcionara de forma impecable, gracias a que el lugar de búsqueda es subjetivamente reducido [42], por lo que puede ser adecuado para trabajar en las 13 barras del sistema estándar de distribución IEEE [43].

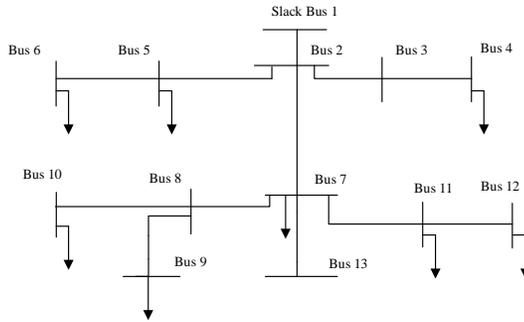


Figura 8. Sistema de distribución de 13 barras IEEE [43].

Como se observa en la figura 7 el espacio de búsqueda contiene 13 elementos que serán las barras candidatas para la ubicación, por tanto, el límite superior que alcanza en iteraciones que ejecutara el algoritmo teniendo en cuenta todas las viables combinaciones sería de 12, implementando la limitación de no ingresar en la búsqueda con la barra Slack [42].

El algoritmo comparará el perfil de tensión en cada barra, devolverá como resultado ubicación óptima, considerando restricciones de desviación promedio y desviación máxima de voltaje [42].

Entonces, este procedimiento radica en crear un registro de cada una de las soluciones del problema de una manera metódica, examina estas resoluciones, y descarta las no adecuadas, almacenando la principal opción de resolución, y al concluir la búsqueda, retorna a la óptima solución [30].

## 2.4 Modelo de Flujos de potencia en transformador con taps

Los cálculos de flujo de potencia se realizan para abordar la operación y el control del sistema. Estos cálculos contienen un conjunto fijo de ecuaciones algebraicas no lineales que representan la red en condiciones de estado inicial [13].

En las primeras estrategias iterativas se utilizaba principalmente la matriz Ybarra de Gauss-Seidel, que se adapta

mejor a una topología pequeña. Pero a medida que la escala de la red se expande, aumentará ampliamente el número de iteraciones y, por lo tanto, ralentizará los procedimientos. En la investigación de flujo de potencia a gran escala, el enfoque de Newton-Raphson ha demostrado ser más exacto, gracias a sus sólidas características de convergencia adaptándose de manera apropiada a sistemas radiales y desbalanceados [8].

El regulador de tensión con interruptor de selección es un dispositivo operado para ejercer dominio en el perfil de tensión en un SEP, por lo que se le utiliza en investigaciones de flujos de potencia, al tener en cuenta el enlace de la máquina entre ambas barras, donde la corriente y la tensión se tienen en cuenta en el devanado primario y secundario del transformador [26].

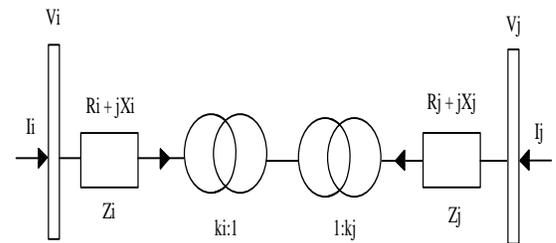


Figura 9. Mecanismo de cambio tap en transformadores [26].

Empezamos con el número de vueltas del devanado primario por el número de vueltas de la bobina secundaria como se observa en las ecuaciones (3), (4) en el lado primario y secundario del transformador.

$$\frac{V_i - IZ_i}{k_i} = \frac{V_j - IZ_j}{k_j} \quad (3)$$

$$\frac{I_i}{k_i} = \frac{I_j}{k_j} \quad (4)$$

Al ejecutar un apropiado remplazo, alejando términos independientes y sin

tomar en consideración la resistencia del bobinado primario y secundario se obtiene las corrientes y la admitancia del regulador de tensión entre cada barra de unión.

$$y^t = \frac{1}{k_i^2 X_j + k_j^2 X_i} \quad (5)$$

$$I_i = k_i k_j (V_i - V_j) y^t + k_j (k_i - k_j) V_i y^t \quad (6)$$

$$I_j = k_i k_j (V_j - V_i) y^t + k_i (k_i - k_j) V_j y^t \quad (7)$$

Donde:

$V_i, V_j$	Tensión entre los nodos [p.u].
$I_i, I_j$	Corriente que circula por la barra i y j en [p.u].
$k_i, k_j$	Valor del interruptor de selección en el bobinado primario y secundario p.u].
$X_i, X_j$	Reactancia del regulador de tensión [p.u].
$y^t$	Admitancia del regulador de tensión [p.u].

En este modelo matemático se indica que el regulador de tensión con cambiadores de derivación puede ser simbolizado mediante un modelo distinto al clásico, equivalente  $\pi$ , tal como sucede en líneas transmisión de longitud media.

Con la necesidad de obtener un modelo en el interruptor de selección del regulador de tensión, agregarlo en el Método de Newton Raphson de flujo de potencia, iniciando de la correlación entre la corriente y tensión(6) y (7) procediendo con los datos del interruptor de selección y la admitancia del regulador de tensión [26].

$$\begin{bmatrix} I_i \\ I_j \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} k_j^2 y^t_{ii} & -k_i k_j y^t_{ij} \\ -k_i k_j y^t_{ji} & k_i^2 y^t_{jj} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} V_i \\ V_j \end{bmatrix} \quad (8)$$

Se consigue las ecuaciones de flujo de potencia en los nodos del regulador de

tensión, donde  $k_i$  y  $k_j$  simbolizan las variables del interruptor de selección.

$$\begin{aligned} P_i &= k_j^2 |V_i|^2 G_{ii} \\ &+ k_i k_j |V_i| |V_j| (G_{ij} \cos(\theta_i - \theta_j) \\ &+ B_{ij} \sin(\theta_i - \theta_j)) \end{aligned} \quad (9)$$

$$\begin{aligned} Q_i &= -k_j^2 |V_i|^2 B_{ii} \\ &+ k_i k_j |V_i| |V_j| (G_{ij} \sin(\theta_i - \theta_j) \\ &- B_{ij} \cos(\theta_i - \theta_j)) \end{aligned} \quad (10)$$

$$\begin{aligned} P_j &= k_i^2 |V_j|^2 G_{ii} \\ &+ k_i k_j |V_i| |V_j| (G_{ij} \cos(\theta_i - \theta_j) \\ &+ B_{ij} \sin(\theta_i - \theta_j)) \end{aligned} \quad (11)$$

$$\begin{aligned} Q_j &= -k_i^2 |V_j|^2 B_{ii} \\ &+ k_i k_j |V_i| |V_j| (G_{ij} \sin(\theta_i - \theta_j) \\ &- B_{ij} \cos(\theta_i - \theta_j)) \end{aligned} \quad (12)$$

Donde:

$P_i, P_j$	Potencia activa en cada barra en [p.u].
$Q_i, Q_j$	Potencia reactiva en cada barra en [p.u].
$G$	Conductancia del transformador en [p.u].
$B$	Susceptancia del transformador en [p.u].

Una vez dada la matriz Ybarra para todo el sistema, el modelo del transformador puede introducirse modificando los elementos de la matriz Ybarra derivados de las líneas de transmisión.

$$Y^{new}_{ij} = Y_{ij} + y^t_{ij} \quad (13)$$

$$Y^{new}_{ji} = Y_{ji} + y^t_{ji} \quad (14)$$

$$Y^{new}_{ii} = Y_{ii} + y^t_{ij} \quad (15)$$

$$Y^{new}_{jj} = Y_{jj} + y^t_{ji} \quad (16)$$

### 3 Metodología

A través del proceso matemático Newton-Rhaphson se desarrollará un modelo de ubicación óptima de transformadores con derivación, mejorando parámetros de perfiles de voltaje tomando en cuenta la implementación del modelo en el sistema de distribución IEEE 13 barras. Al utilizar el modelo de optimización por búsqueda exhaustiva el cual nos permite explorar todas las posibles soluciones al generar varias combinaciones, al final utilizar la solución más factible.

Ya establecido el modelo de optimización se tomarán restricciones de desviación promedio de voltaje y desviación máxima de voltaje, donde nos permitirá encontrar la ubicación adecuada para el transformador.

#### 3.1 Procedimiento de resolución

Con la finalidad de localizar la correcta resolución al problema se usará el software informático MatLab donde se ingresarán datos del sistema eléctrico de potencia, líneas de transmisión, cargas en cada barra, generadores, como se observa en el algoritmo 1. Usando el método Newton-Raphson para resolver el flujo de potencia y llega a la solución objetivo.

---

**Algoritmo 1:** Flujo de Potencia mediante Newton-Raphson

---

**Paso I:**

Ingreso de datos al sistema  
Datos de barras, impedancias, voltajes, cargas.

**Paso II:**

Formación de matriz Y de barra.

**Paso III:**

Establecer la barra Slack.  
Definir las barras PV y PQ

**Paso IV:**

Calcular vector de errores; potencia activa (17) y reactiva (18).

$$\begin{aligned} \Delta P_i &= P_{iG} - P_{iC} \\ &- V_i \sum_{j=1}^n V_j (G_{ij} \cos(\theta_{ij}) \\ &+ B_{ij} \sin(\theta_{ij})) \end{aligned} \quad (17)$$

$$\begin{aligned} \Delta Q_i &= Q_{iG} - Q_{iC} \\ &- V_i \sum_{j=1}^n V_j (G_{ij} \sin(\theta_{ij}) \\ &- B_{ij} \cos(\theta_{ij})) \end{aligned} \quad (18)$$

Donde:  $\theta_{ij} = \theta_i - \theta_j$

**Paso V:**

Calcular la matriz Jacobiana (19).

$$[J] = \begin{bmatrix} \frac{\partial P}{\partial \theta} & V \frac{\partial P}{\partial V} \\ \frac{\partial Q}{\partial \theta} & V \frac{\partial Q}{\partial V} \end{bmatrix} \quad (19)$$

**Paso VI:**

Calcular el vector de correcciones obteniendo  $\Delta Q$  y  $\Delta V$ . (20)

$$\begin{bmatrix} \Delta \theta \\ \Delta V \\ \frac{\Delta V}{V} \end{bmatrix} = [J]^{-1} \begin{bmatrix} \Delta P \\ \Delta Q \end{bmatrix} \quad (20)$$

**Paso VII:**

Encontrar los valores de tensión (21) con sus pertinentes ángulos (22)

$$V^{k+1} = V^k \left( 1 + \frac{\Delta V^k}{V} \right) \quad (21)$$

$$\theta^{k+1} = \theta^k + \Delta \theta^k \quad (22)$$

**Paso VIII:**

Comprobar que los incrementos son menores que el error establecido.

**Paso IX:**

Calcular el flujo de potencia

---

Una de las características de este método es que sus resultados cambiarán si se modifica la  $Y_{\text{barra}}$ , con esta consideración se analiza el algoritmo de ubicación óptima por búsqueda exhaustiva descrita en el algoritmo 2

---

**Algoritmo 2:** Búsqueda exhaustiva**Paso I:**

Ingreso de datos del SEP

**Paso II:**

Ingreso de datos del transformador con taps

**Paso III:**

Ubicar el transformador de la barra  $i$  a la barra  $j$

**Paso IV:**

Formación de matriz  $Y^{new}$  de barra con la inclusión del transformado con taps.

**Paso V:**

Determinación del flujo de potencia con  $Y^{new}$  por el procedimiento Newton-Raphson.

**Paso VI:**

Almacenar datos de magnitud de voltaje, ángulo de voltaje

**Paso VII:**

Calcular desviación promedio de voltaje (1) y desviación máxima de voltaje (2).

**Paso VIII:**

Guardar los valores y regresar al paso III, hasta cumplir con las condiciones de voltaje.

**Paso IV:**

Se efectúa la gráfica de perfil de tensión.

---

El algoritmo 2 permite localizar de manera adecuada la ubicación de los

transformadores con taps en el sistema de distribución usando como principio la búsqueda exhaustiva que es un algoritmo de fuerza bruta, permite ir comparando todos los escenarios posibles, logrando encontrar el más adecuado considerando restricciones de desviación promedio de voltaje y desviación máxima de voltaje.

La ubicación del regulador de tensión se lo realizará en el sistema de IEEE de 13 nodos de distribución donde el modelo de optimización se lo modelará para casos de estudio donde se conseguirá analizar los perfiles de voltaje antes y después de la implementación de la compensación.

**3.2 Casos de estudio****3.2.1 Caso 1**

En el primer ejemplo de estudio se examina incluir la ubicación adecuada de regulador de tensión con cambiadores de derivación en el sistema de distribución IEEE de 13 barras, para lo cual el modelo óptimo planteado es colocando la compensación entre las barras 1 y 2 como se observa a continuación en la figura 10.

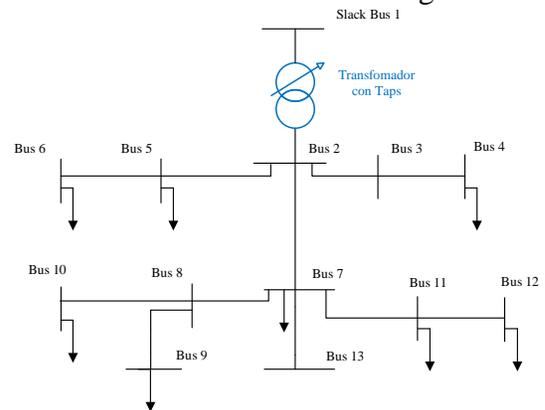


Figura 10. Ubicación óptima del transformador con taps en el sistema IEEE 13 barras

**3.2.2 Caso 2**

Con respecto al segundo caso de estudio se busca incluir la ubicación adecuada de regulador de tensión con cambiadores de derivación en el sistema de distribución IEEE de 13 barras, al

modificar las cargas del sistema, funcionando a su mínima capacidad, para lo cual el modelo óptimo planteado es colocando la compensación entre las barras 2 y 7 como se observa a continuación en la figura 11.

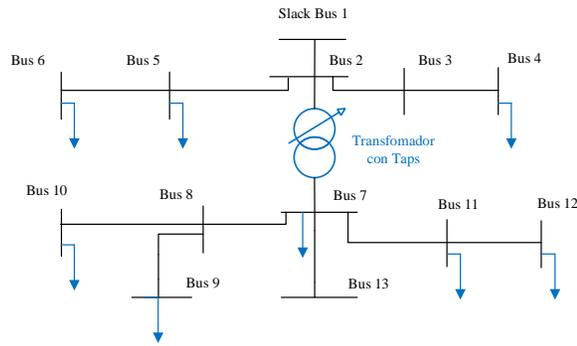


Figura 11. Ubicación óptima del transformador con taps en el sistema IEEE 13 barras con reducción en la carga

## 4 Análisis de resultados

Para cada caso de estudio mencionado anteriormente en los cuales los datos del SEP cambiaran, en el caso 1 manteniendo valores iniciales (máxima carga), en el caso 2 modificando valores iniciales (mínima carga), se realiza un análisis detallado del perfil de tensión al ubicar de manera adecuada el transformador con derivación. Se ejecutarán comparaciones en estado inicial sin modificación del tap y el sistema mejorado con el cambio de tap.

### 4.1 Análisis del perfil de tensión con carga en su máxima capacidad en el sistema de prueba IEEE de 13 barras

Al momento de realizar el análisis del modelo matemático correspondiente, la implementación del transformador con la variación del tap procedente de la solución del flujo de potencia. En la Tabla 3 muestra el incremento en los perfiles de voltaje con respecto al sistema

en estado inicial. La Tabla 2 presenta el valor del tap primario donde 1 es el estado inicial del sistema, el transformador se ubicará de la barra 1 hasta la barra 2.

Tabla 2. Datos del tap en [p.u.] del transformador

Tap del transformador		
De/hasta	Devanado 2%	Tap
1-2	1,04	1,02
	1.02 +	
	1	
	0,98	
	0,96 -	

Tabla 3. Perfil de voltaje en [p.u.] del SEP

Barra	Voltaje sin cambio tap	Voltaje con cambio tap
1	1,0000	1,0000
2	0,9997	1,0098
3	0,9991	1,0092
4	0,9983	1,0084
5	0,9983	1,0084
6	0,9975	1,0076
7	0,9996	1,0097
8	0,9993	1,0094
9	0,9991	1,0092
10	0,9990	1,0091
11	0,9984	1,0086
12	0,9965	1,0066
13	0,9996	1,0097

Ya planteadas las simulaciones de flujo de potencia para considerar la ubicación adecuada del transformador que se encuentra entre en nodo 1 y nodo 2; es necesario recurrir a la desviación máxima de voltaje con resultado de 0,0034 [p.u.] motivo a la cual, como mejor opción para ubicar el transformador, es adecuada.

En la Figura 12 se indica la mejora de los perfiles de tensión con respecto al sistema inicial para el análisis en el sistema IEEE de 13 barras.

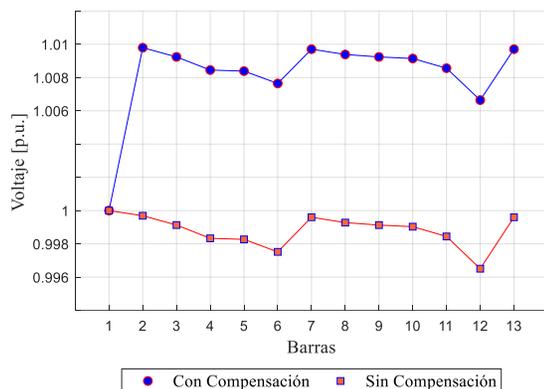


Figura 12. Aumento de los perfiles de tensión con carga en máxima capacidad en el sistema IEEE 13 barras.

En la Figura 13 se observa la comparativa en un diagrama de barras, los perfiles de voltaje mejoran en un 0,9% superando así la tensión objetivo. Después de la resolución del flujo de potencias y la implementación del transformador con taps como variable de control al simular la subida del tap es una gran alternativa para obtener control de voltaje en el sistema IEEE de 13 barras. Alcanzado una mejora del voltaje en todos los nodos.

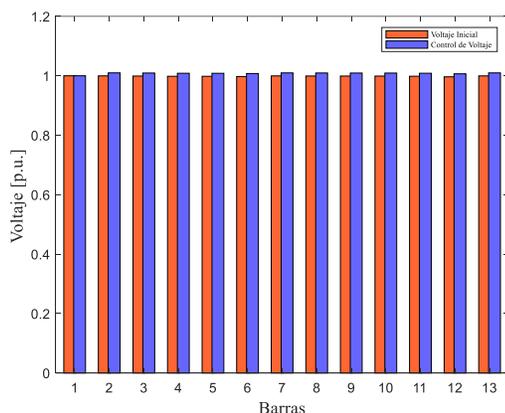


Figura 13. Diagrama de barras del aumento de los perfiles de tensión con carga en su máxima capacidad en el sistema de prueba IEEE 13 barras.

#### 4.1.1 *Análisis del flujo de potencia reactiva en el sistema de prueba IEEE de 13 barras*

Una vez implementado los transformadores con variable de control en los taps, no solo se obtiene una modificación en los perfiles de voltaje, una correcta ubicación, modifica el flujo de potencia reactiva como se indica en la Figura 14. Logrando una reducción en las pérdidas del sistema en un total del 41% vista en la Figura 15.

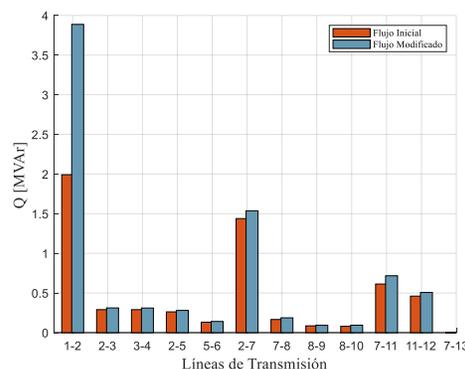


Figura 14. Flujo de potencia reactiva en el sistema IEEE 13 barras.

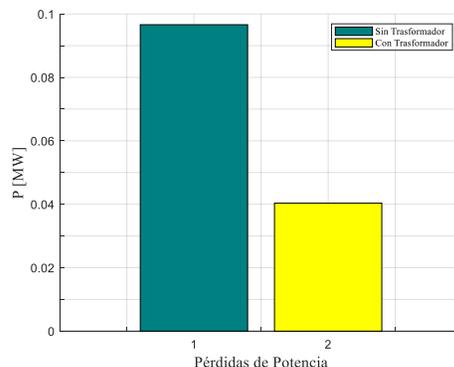


Figura 15. Pérdidas de potencia en el sistema IEEE 13 barras.

## 4.2 **Análisis del perfil de tensión modificando la carga a mínima capacidad en el sistema de prueba IEEE de 13 barras**

Efectuando un análisis minucioso de cómo puede cambiar la demanda en el sistema eléctrico de potencia se pretende continuar con el estudio analizando el comportamiento del nivel de tensión con respecto a un cambio en la carga en su

mínima capacidad (40%). Al momento de cumplir con el análisis del modelo matemático correspondiente, la implementación del transformador con la variación del tap procedente de la solución del flujo de potencia. En la Tabla 5 se muestra el incremento en los perfiles de voltaje con respecto al sistema en estado inicial. La Tabla 4 presenta el valor del tap primario donde 1 es el estado inicial del sistema, el transformador se ubicará de la barra 2 hasta la barra 7.

Tabla 4. Datos del tap en [p.u.] del transformador

Tap del transformador			
De/hasta	Devanado 1.5%		Tap
2-7	1,03	+	1,011
	1,015		
	1		
	0,985		
	0,97		

Tabla 5. Perfil de voltaje en [p.u.] del SEP con mínima carga

Barra	Voltaje sin cambio tap	Voltaje con cambio tap
1	1,0000	1,0000
2	0,9999	0,9999
3	0,9997	0,9997
4	0,9993	0,9993
5	0,9993	0,9993
6	0,9990	0,9990
7	0,9998	1,0008
8	0,9997	1,0007
9	0,9997	1,0007
10	0,9996	1,0006
11	0,9994	1,0004
12	0,9986	0,9996
13	0,9998	1,0008

Como se observa en la Tabla 5 al momento de realizar la simulación de flujo de potencia con un 40% de carga se obtiene como resultado un aumento en la tensión del sistema un 0.07% una vez identificado el nuevo sistema inicial se procede a considerar la ubicación adecuada del transformador que se

encuentra entre en nodo 2 y nodo 7; es necesario recurrir a la desviación máxima de voltaje con resultado de 0,0010 [p.u.] motivo por el cual, la mejor opción para ubicar el transformador es adecuada.

En la Figura 16 se observa la mejora de los perfiles de voltaje con respecto al sistema inicial para el análisis en el sistema IEEE de 13 barras, el aumento de voltaje se aprecia desde la barra 7 a la barra 13 en consecuencia de la simulación del comportamiento del tap en el primario del transformador.

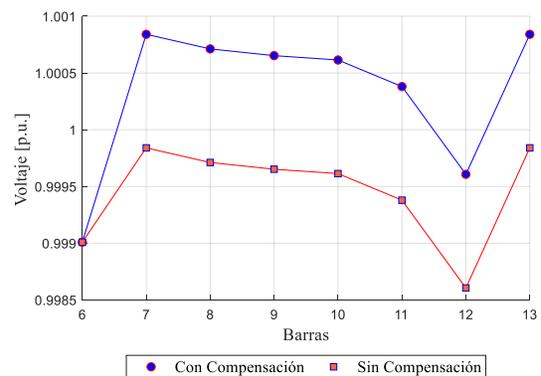


Figura 16. Mejora de los perfiles de voltaje con mínima carga en el sistema IEEE 13 barras.

En la Figura 17 se observa la comparativa en un diagrama de barras, los perfiles de voltaje mejoran en un 0,1% superando así la tensión objetivo. Después de la resolución del flujo de potencias y la implementación del transformador con taps como variable de control al simular la subida del tap es una gran alternativa para obtener control de voltaje en el sistema IEEE de 13 barras. Alcanzado una mejora de la tensión en de la barra 7 a la barra 13.

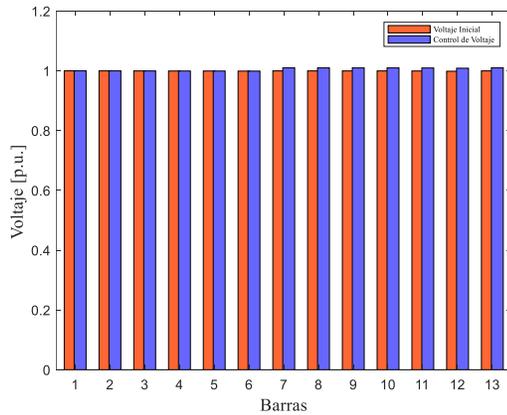


Figura 17. Diagrama de barras de aumento del índice de tensión con mínima carga en el sistema IEEE 13 barras.

#### 4.2.1 *Análisis de flujo de potencia modificando la carga a mínima capacidad en el sistema de prueba IEEE de 13 barras*

Una vez reducido la capacidad de la carga un 40% se procede a implementar los transformadores con variable de control en los taps, una correcta ubicación, modifica el flujo de potencia reactiva como se observa en la Figura 18. Logrando una reducción en las pérdidas del sistema en un total del 25% vista en la Figura 19.

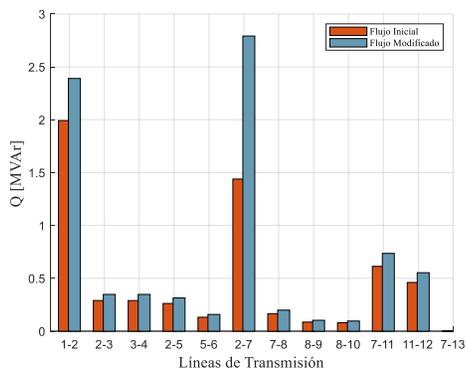


Figura 18. Flujo de potencia reactiva en el sistema con mínima carga IEEE 13 barras.

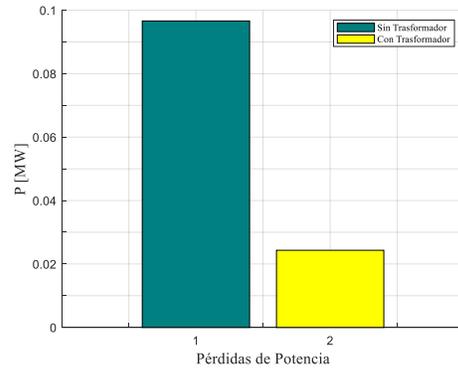


Figura 19. Pérdidas de potencia con mínima carga en el sistema IEEE 13 barras.

## 5 Conclusiones

El modelo matemático implementado permite ejercer un control de tensión en los nodos hasta alcanzar un nivel de tensión que se encuentre en los rangos predeterminados, así logrando a través de la solución de flujo de potencias convertir un medio rentable controlando los taps del transformador mediante el impulso de una señal de intervención de esta manera mejorar la calidad del suministro en el sistema eléctrico.

Con una óptima ubicación de los reguladores de tensión, se pudo mejorar el perfil de voltaje, además reducir pérdidas y usando el algoritmo de búsqueda exhaustiva encontramos una ubicación adecuada de los transformadores, donde se consideró restricciones de desviación máxima de voltaje y desviación promedio.

Cuando el sistema IEEE de distribución funciona a su mínima capacidad, el nivel de voltaje sube por lo que, se busca una nueva localización del transformador con tap, ya que, al mantener la misma ubicación, estaría fuera de los límites de operación requeridos.

Al realizar la implementación del modelo matemático, se pudo modelar el comportamiento del tap, e introducirlo en

la resolución de flujos de potencia, lo que permite determinar un control de voltaje en las barras del sistema de distribución, y por consiguiente lograr un mejoramiento continuo del servicio.

Los transformadores con derivación en el sistema de distribución, tiene beneficios técnicos, como mejora el perfil de voltaje en el sistema, la operación en un modo adecuado de la compensación modifica el flujo de potencia reactiva, de tal modo que se provee una apropiada capacidad, ubicación, y el soporte de voltaje.

### 5.1 Trabajos futuros

Los resultados obtenidos en esta investigación dan lugar a futuros tópicos como:

Modelación de la inclusión del tap en el lado de baja tensión y alta tensión del regulador de tensión con cambiadores de derivación, sobre el cual se pueda ejercer control, ante cambios en la carga del sistema.

Uso de diferentes técnicas de optimización para reducir costos en la implementación regulador de tensión con cambiadores de derivación ejerciendo control de tensión y conseguir que el índice de tensión se localice dentro de los límites adecuados.

Análisis de pérdidas por reactancia de dispersión en el transformador al aplicar el cambio del interruptor de selección como variable de control de voltaje en sistema.

## 6 Referencias

[1] A. S. Safigianni and G. J. Salis, "Optimum voltage regulator placement in a radial power distribution network," *IEEE Trans. Power Syst.*, vol. 15, no. 2, pp. 879–886, 2000.

[2] H. Vu, P. Pruvot, C. Launay, and Y. Haemand, "An improved voltage control on large-scale power system," *IEEE Trans. Power Syst.*, vol. 11, no. 3, pp. 1295–1303, 1996.

[3] Y. H. Bhatt, D. V. Bhatt, and V. H. Pakka, "Voltage stability index and voltage deviation improvements using intelligent algorithms for capacitor sizing and placement," *Asia-Pacific Power Energy Eng. Conf. APPEEC*, vol. 2018-October, pp. 422–427, 2018.

[4] R. Ranjan, B. Venkatesh, and D. Das, "Voltage stability analysis of radial distribution networks," *Electr. Power Components Syst.*, vol. 31, no. 5, pp. 501–511, 2003.

[5] D. V. Armeev, A. V. Chekhonadskikh, and A. A. Voevoda, "Modal optimization of AVR for synchronous generator using the finite gradient," *2015 Int. Sib. Conf. Control Commun. SIBCON 2015 - Proc.*, no. 199, pp. 21–24, 2015.

[6] J. Zhou, Q. Sun, H. Zhang, and Y. Zhao, "Load balancing and reactive power compensation based on capacitor banks shunt compensation in low voltage distribution networks," *Chinese Control Conf. CCC*, no. 20090461187, pp. 6681–6686, 2012.

[7] O. P. Mahela and A. G. Shaik, "A review of distribution static compensator," *Renew. Sustain. Energy Rev.*, vol. 50, pp. 531–546, 2015.

[8] H. Nouri, "LOSSES H.K Okyere (1)," no. 1, pp. 1013–1018, 2007.

[9] Z. Wang, F. Chen, and J. Li, "Implementing transformer nodal admittance matrices into

- backward/forward sweep-based power flow analysis for unbalanced radial distribution systems,” *IEEE Trans. Power Syst.*, vol. 19, no. 4, pp. 1831–1836, 2004.
- [10] P. Issn, “Transformador Monofásico De Distribución Y De Potencia, Modelamiento Con Taps,” *Transform. Monofásico Distrib. Y Potencia, Model. Con Taps*, vol. 3, no. 29, pp. 13–18, 2005.
- [11] R. B. Prada, B. H. T. Seelig, J. O. dos Santos, L. A. S. Pilotto, and A. Bianco, “Modelling on-load tap changer voltage control and liffnits for network loading and voltage control effectiveness assessment,” no. July 2003, pp. 662–667, 2004.
- [12] S. S. Alkaabi, H. H. Zeineldin, and V. Khadkikar, “Simplified power flow modeling approach considering on-load tap changers,” *2017 IEEE Power Energy Soc. Innov. Smart Grid Technol. Conf. ISGT 2017*, 2017.
- [13] I. Kim, “A Method of Modeling Tap-Changing Transformers for Power-Flow and Short-Circuit Analysis Studies,” *IEEE Reg. 10 Annu. Int. Conf. Proceedings/TENCON*, vol. 2018-October, no. October, pp. 772–775, 2019.
- [14] P. M. Anderson and A. A. Fouad, *Power system control and stability*, vol. 67, no. 8. 2008.
- [15] 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.
- [16] E. Engineering, “Voltage Stability Assessment in Radial Distribution System by Line Stability Indicator ( LSI ) and its Improvement using SVC,” pp. 1–5, 2016.
- [17] IEEE Std 1159-2019, *IEEE Recommended Practice for Monitoring Electric Power Quality*, vol. 2019. 2019.
- [18] “RESOLUCIÓN Nro. ARCONEL-053/18,” pp. 1–40, 2018.
- [19] K. K. Mehmood, S. U. Khan, S. J. Lee, Z. M. Haider, M. K. Rafique, and C. H. Kim, “A real-time optimal coordination scheme for the voltage regulation of a distribution network including an OLTC, capacitor banks, and multiple distributed energy resources,” *Int. J. Electr. Power Energy Syst.*, vol. 94, pp. 1–14, 2018.
- [20] Y. Guo, Q. Wu, H. Gao, and F. Shen, “Distributed voltage regulation of smart distribution networks: Consensus-based information synchronization and distributed model predictive control scheme,” *Int. J. Electr. Power Energy Syst.*, vol. 111, no. October 2018, pp. 58–65, 2019.
- [21] A. Arshad and M. Lehtonen, “Instantaneous flicker control strategy with OLTC-fitted distribution transformers in LV networks,” *IEEE PES Innov. Smart Grid Technol. Conf. Eur.*, vol. 2020-October, pp. 544–548, 2020.
- [22] A. Águila Téllez, G. López, I. Isaac, and J. W. González, “Optimal reactive power compensation in electrical distribution systems with distributed resources. Review,” *Heliyon*, vol. 4, no. 8, 2018.
- [23] M. W. Younas and S. A. Qureshi, “Voltage Stability Improvement

- of a Reactive Power Constrained Longitudinal Network Feeding Predominantly Agricultural Loads in Scattered Remote Areas,” pp. 1–6, 2008.
- [24] J. F. Zhang, P. Wei, Y. Qiu, and S. M. Ding, “Impact of Distributed Generation on voltage stability,” *IET Conf. Publ.*, vol. 2012, no. 611 CP, pp. 5–8, 2012.
- [25] A. I. G. Adejumbi and I. A. Adepoju, “Power Flow Analysis Using Load Tap-Changing Transformer (LTCT): A Case Study of Nigerian 330kv Transmission Grid System,” *Int. J. Eng. Adv. Technol.*, no. 3, pp. 2249–8958, 2013.
- [26] U. Datta and M. S. Rahman, “Mathematical modelling of a transformer with taps at both winding in the positive-sequence power flow mathematical,” no. December, 2017.
- [27] G. R. Chandra Mouli, P. Bauer, T. Wijekoon, A. Panosyan, and E. M. Bärthlein, “Design of a power-electronic-assisted OLTC for grid voltage regulation,” *IEEE Trans. Power Deliv.*, vol. 30, no. 3, pp. 1086–1095, 2015.
- [28] A. Sikander and P. Thakur, “A new control design strategy for automatic voltage regulator in power system,” *ISA Trans.*, vol. 100, no. xxxx, pp. 235–243, 2020.
- [29] Y. Tang, M. Cui, C. Hua, L. Li, and Y. Yang, “Optimum design of fractional order PI  $\lambda$ D  $\mu$  controller for AVR system using chaotic ant swarm,” *Expert Syst. Appl.*, vol. 39, no. 8, pp. 6887–6896, 2012.
- [30] J. Mahato, S. K. Das, U. Mondal, and A. Sengupta, “System identification of an AVR and it’s control using finite dimensional repetitive controller,” *Proc. 2018 IEEE Appl. Signal Process. Conf. ASPCON 2018*, pp. 59–63, 2018.
- [31] S. Po-Ngam, “The simplified control of three-phase four-leg shunt active power filter for harmonics mitigation, load balancing and reactive power compensation,” *ECTI Trans. Electr. Eng. Electron. Commun.*, vol. 13, no. 1, pp. 35–41, 2015.
- [32] Jimenez Valdés Javier, “Efectos De Los Compensadores De Reactivos De Sistemas De Excitacion En El Control De Voltaje-Potencia Reactiva De Sistemas Electricos De Potencia,” 2010.
- [33] R. Sirjani and A. Rezaee Jordehi, “Optimal placement and sizing of distribution static compensator (D-STATCOM) in electric distribution networks: A review,” *Renew. Sustain. Energy Rev.*, vol. 77, no. April, pp. 688–694, 2017.
- [34] W. Rohouma, R. S. Balog, A. A. Peerzada, and M. M. Begovic, “D-STATCOM for harmonic mitigation in low voltage distribution network with high penetration of nonlinear loads,” *Renew. Energy*, vol. 145, pp. 1449–1464, 2020.
- [35] S. A. Dolli, “Regulator for a Radial System,” *Int. Conf. Power, Signals, Control. Comput. (EPSCICON), 2012*, pp. 0–5, 2012.
- [36] C. A. N. Pereira and C. A. Castro, “Optimal placement of voltage regulators in distribution systems,” *2009 IEEE Bucharest PowerTech Innov. Ideas Towar. Electr. Grid Futur.*, pp. 1–5, 2009.
- [37] A. Nakadomari, R. Shigenobu, and T. Senjyu, “Optimal control and placement of step voltage regulator for voltage unbalance

- improvement and loss minimization in distribution system,” *IEEE Reg. 10 Annu. Int. Conf. Proceedings/TENCON*, vol. 2020-Novem, no. 1, pp. 1013–1018, 2020.
- [38] P. Uapathi Reddy, M. Lakshmikantha Reddy, S. Sivanagaraju, and P. S. Raju, “Optimal location of voltage regulators in unbalanced radial distribution system for loss minimization using particle swarm optimization,” *2012 Int. Conf. Adv. Power Convers. Energy Technol. APCET 2012*, 2012.
- [39] S. Guo, Y. Yan, J. Jiang, M. Ma, and W. Bao, “Network topology identification algorithm based on adjacency matrix,” *Dianli Xitong Baohu yu Kongzhi/Power Syst. Prot. Control*, vol. 46, no. 12, pp. 50–56, 2018.
- [40] L. R. Araujo, D. R. R. Penido, S. Carneiro, and J. L. R. Pereira, “A methodology for optimization of unbalanced distribution systems,” *IEEE Lat. Am. Trans.*, vol. 11, no. 5, pp. 1182–1189, 2013.
- [41] T. Hakala and T. Lähdeaho, “22 nd International Conference on Electricity Distribution Paper 1151 THE UTILIZATION POTENTIAL OF LVDC DISTRIBUTION 22 nd International Conference on Electricity Distribution,” no. June, pp. 10–13, 2013.
- [42] A. A. Téllez, A. Robayo, G. López, L. Ortiz, I. Isaac, and J. González, “Optimal sizing of distribution transformers using exhaustive search algorithm,” *2019 FISE-IEEE/CIGRE Conf. - Living Energy Transition, FISE/CIGRE 2019*, 2019.
- [43] IEEE, “IEEE 13 Node Test Feeder,” *IEEE Distribution System Analysis Subcommittee, The Institute of Electrical and Electronics Engineers, Inc.* pp. 1–11, 1992.

