

CONTROL DEL PERFIL DE VOLTAJE Y MEJORA DEL FACTOR DE POTENCIA COORDINANDO GENERADORES DISTRIBUIDOS CON UN CAMBIADOR DE TOMAS BAJO CARGA EN UN SISTEMA DE DISTRIBUCIÓN



UNIVERSIDAD POLITÉCNICA SALESIANA

SEDE QUITO

CARRERA DE ELECTRICIDAD

**CONTROL DEL PERFIL DE VOLTAJE Y MEJORA DEL FACTOR DE
POTENCIA COORDINANDO GENERADORES DISTRIBUIDOS CON UN
CAMBIADOR DE TOMAS BAJO CARGA EN UN SISTEMA DE DISTRIBUCIÓN**

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

AUTOR: CÉSAR STEVEN ALMEIDA JIMÉNEZ

TUTOR: ROGELIO ALFREDO ORIZONDO MARTÍNEZ

Quito -Ecuador

2022

César Steven Almeida Jiménez

CONTROL DEL PERFIL DE VOLTAJE Y MEJORA DEL FACTOR DE POTENCIA COORDINANDO GENERADORES DISTRIBUIDOS CON UN CAMBIADOR DE TOMAS BAJO CARGA EN UN SISTEMA DE DISTRIBUCIÓN

Universidad Politécnica Salesiana, Quito – Ecuador 2022

Carrera de Electricidad

Breve reseña histórica e información de contacto.



César Steven Almeida Jiménez (Y'1996 – M'12). Realizó sus estudios secundarios en el “Colegio Técnico Salesiano Don Bosco”, se graduó de bachiller en “Instalaciones, equipos y maquinas eléctricas”. Egresado de la Carrera de Ingeniería Eléctrica de la Universidad Politécnica Salesiana. Su trabajo se basa en el Control del perfil de voltaje y mejora del factor de potencia coordinando generadores distribuidos con un cambiador de tomas bajo carga en un sistema de distribución.
calmeidaj@est.ups.edu.ec

Dirigido por:



Rogelio Alfredo Orizondo Martínez (Y'1972 – M'01). Nació en Caracas, Venezuela. Recibió su título en Ingeniería Eléctrica por la Universidad Simón Bolívar en 1999 y el MSc. en la Universidad Simón Bolívar en 2006. Actualmente es docente en la Universidad Politécnica Salesiana. Sus áreas de investigación incluyen electrónica de potencia, especialmente FACTS, sistemas de puesta a tierra y protección catódica.
rorizondo@ups.edu.ec

Todos los derechos reservados:

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

DERECHOS RESERVADOS

©2022 Universidad Politécnica Salesiana

QUITO - ECUADOR

**CERTIFICADO DE RESPONSABILIDAD Y AUTORÍA DEL TRABAJO
DE TITULACIÓN**

Yo, César Steven Almeida Jiménez con documento de identificación N° 1722502257 manifiesto que:

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

Quito, 18 de octubre del año 2022

Atentamente,



César Steven Almeida Jiménez

1722502257

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

Yo, César Steven Almeida Jiménez con documento de identificación No. 1722502257, expreso mi voluntad y por medio del presente documento cedo a la Universidad Politécnica Salesiana la titularidad sobre los derechos patrimoniales en virtud de que soy autor del Artículo Académico: “Control del perfil de voltaje y mejora del factor de potencia coordinando generadores distribuidos con un cambiador de tomas bajo carga en un sistema de distribución”, el cual ha sido desarrollado para optar por el título de: Ingeniero Eléctrico, en la Universidad Politécnica Salesiana, quedando la Universidad facultada para ejercer plenamente los derechos cedidos anteriormente.

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

Quito, 18 de octubre del año 2022

Atentamente,



César Steven Almeida Jiménez

1722502257

CERTIFICADO DE DIRECCIÓN DEL TRABAJO DE TITULACIÓN

Yo, Rogelio Alfredo Orizondo Martínez con documento de identificación N° 1757424195, docente de la Universidad Politécnica Salesiana, declaro que bajo mi tutoría fue desarrollado el trabajo de titulación: CONTROL DEL PERFIL DE VOLTAJE Y MEJORA DEL FACTOR DE POTENCIA COORDINANDO GENERADORES DISTRIBUIDOS CON UN CAMBIADOR DE TOMAS BAJO CARGA EN UN SISTEMA DE DISTRIBUCIÓN, realizado por César Steven Almeida Jiménez con documento de identificación N° 1722502257, obteniendo como resultado final el trabajo de titulación bajo la opción Artículo Académico que cumple con todos los requisitos determinados por la Universidad Politécnica Salesiana.

Quito, 18 de octubre del año 2022

Atentamente,



Ing. Rogelio Alfredo Orizondo Martínez, MSc
1757424195

1. ÍNDICE GENERAL

1. Introducción	2
2. Marco Teórico.....	3
2.1 Generación Distribuida (GD).....	4
2.1.1 Tipos de Generación Distribuida.....	4
2.1.2 Fuentes de Energía	4
2.1.3 Ventajas en el Uso de Generación Distribuida (GD).....	5
2.2 Cambiador de Tomas Bajo Carga (OLTC)	6
2.3 Afectación a la Calidad del Sistema de Distribución.....	6
2.4 Regulación de Voltaje.....	7
2.5 Generalidades Sobre el Factor de Potencia (FP)	7
2.5.1 Armónicos y su Influencia en el Factor de Potencia	7
2.5.2 Relación entre el Factor de Potencia y el Despacho de Potencia Reactiva	8
2.6 Coordinación de Generadores.....	8
3. Descripción del Problema.....	9
3.1 Modelo del Sistema Eléctrico.....	10
3.2 Algoritmo de Control	11
3.3 Casos de Estudio.....	12
3.3.1 Escenario 1: Conexión de un GEO de 1MW a un sistema de distribución	13
3.3.2 Escenario 2: Conexión de dos GEO de 1 y 2MW a un sistema de distribución.....	13
4. Análisis de Resultados	14
4.1 Resultados del Escenario 1	14
4.2 Resultados del Escenario 2	17
5. Conclusiones	20
6. Trabajos Futuros	21
7. Referencias	21
7.1 Matriz de Estado de Arte	25
7.2 Resumen de Indicadores.....	30

2. ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1. Ejemplo de Generación Distribuida [Autor]	3
Figura 2. Estructura de Conexión de la Generación Distribuida [Autor]	4
Figura 3. Operación rutinaria del OLTC, en ausencia de GD [Autor]	6
Figura 4. Cargas características del sistema de distribución [Autor]	7
Figura 5. Representación Gráfica del Triángulo de Potencias [Autor]	8
Figura 6. Diagrama unifilar del sistema de alimentación de 13 nodos IEEE [Autor] .	10
Figura 7. Algoritmo del Sistema de Control Propuesto (OLTC y GD) [Autor]	11
Figura 8. Curva Característica del Aerogenerador [Autor]	12
Figura 9. Conexión de un GEO con baja generación de potencia activa [Autor].....	13
Figura 10. Conexión de dos GEO con alta generación de potencia activa [Autor].....	13
Figura 11. Voltaje Promedio, de Aberración y en la salida del Trafo [Autor]	16
Figura 12. Cambio de TAP en el Transformador [Autor]	16
Figura 13. Potencia reactiva en el GD1 y el factor de potencia asociado [Autor]	16
Figura 14. Magnitudes de voltaje de los nodos del sistema de distribución [Autor]....	17
Figura 15. Comparación del sistema base y el sistema aplicado el control [Autor].....	17
Figura 16. Voltaje Promedio, de Aberración y en la salida del Trafo [Autor]	19
Figura 17. Cambio de TAP en el Transformador [Autor]	19
Figura 18. Potencia reactiva total y el factor de potencia del trafo [Autor]	19
Figura 19. Potencia Reactiva Entregada por GD1 Y GD2 [Autor]	20
Figura 20. Magnitudes de voltaje de los nodos del sistema de distribución [Autor]....	20
Figura 21. Comparación del sistema base y el sistema aplicado el control [Autor].....	20
Figura 22. Resumen e Indicador de la Temática - Estado del Arte	30
Figura 23. Indicador de formulación del problema - Estado del Arte	30
Figura 24. Indicador de solución - Estado del Arte.	30

3. ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1. Tabla de Símbolos	3
Tabla 2. Clasificación de la GD en Función de la Capacidad de Generación	4
Tabla 3. Tipos de Fuentes de Generación.....	5
Tabla 4. Métodos y algoritmos para la coordinación de generadores	9
Tabla 5. Datos de las líneas del sistema	10
Tabla 6. Datos de las Cargas del Sistema.....	10
Tabla 7. Valores base del sistema de alimentación de 13 Nodos	11
Tabla 8. Primera acción de regulación de voltaje que realiza el OLTC	14
Tabla 9. Valores cuando el GD1 aporta potencia activa, antes de una regulación.	15
Tabla 10. Valores de la red cuando se activa sistema de control del GD1 y el OLTC .	15
Tabla 11. Valores cuando el OLTC realiza la primera acción de regulación.....	17
Tabla 12. Valores de la red cuando el GD1 y GD2 aportan su potencia activa total	18
Tabla 13. Valores cuando finaliza la regulación de los GDS coordinado con OLTC...	18
Tabla 14. Matriz de Estado del Arte.....	25

CONTROL DEL PERFIL DE VOLTAJE Y MEJORA DEL FACTOR DE POTENCIA COORDINANDO GENERADORES DISTRIBUIDOS CON UN CAMBIADOR DE TOMAS BAJO CARGA EN UN SISTEMA DE DISTRIBUCIÓN

Resumen

En los sistemas de distribución el cambiador de tomas bajo carga (OLTC) es esencial para la regulación de altos o bajos perfiles de voltaje, pero su filosofía de regulación convencional se ve afectado por la presencia de generación distribuida (GD), produciendo fluctuaciones constantes en las magnitudes de voltaje. Por lo tanto, en este trabajo se propone cambiar la operación convencional del OLTC basado en una magnitud fija en la barra colectora de la subestación por un sistema multivariable que controla el nivel de voltaje en función del voltaje promedio de toda la red de distribución. Además, el OLTC se coordina con las capacidades de importación/exportación de potencia reactiva de los generadores distribuidos (GDS) para la regulación de voltaje en los puntos de conexión (POC) y mejora del factor de potencia del sistema. Dicho modelado se ha desarrollado en el software Matlab Simulink, en un sistema IEEE de 13 barras. Los resultados obtenidos demuestran que el sistema propuesto puede controlar con éxito el voltaje y simultáneamente mejorar el factor de potencia.

Palabras Clave: Generación Distribuida, Generadores Distribuidos, Factor de Potencia, Sistema de Distribución, Perfiles de Voltaje, Regulación de Voltaje.

Abstract

In distribution systems the On-Load Tap Changer (OLTC) is essential for the regulation of high or low voltage profiles, but its conventional regulation philosophy is affected by the presence of distributed generation (DG), producing constant fluctuations in voltage magnitudes. Therefore, in this article we propose to change the conventional operation of the OLTC based on a fixed magnitude at the substation busbar to a multivariable system that controls the voltage level as a function of the average voltage of the entire distribution network. In addition, the OLTC is coordinated with the reactive power import/export capabilities of the distributed generators (GDS) for point-of-connection (POC) voltage regulation and system power factor improvement. Such modeling was developed in Matlab Simulink software, on a 13-bus IEEE system. The results obtained show that the proposed system can successfully control the voltage and simultaneously improve the power factor.

Keywords: Distributed Generation, Distributed Generators, Power Factor, Distribution System, Voltage Profiles, Voltage Regulation.

1. Introducción

En los sistemas de distribución las subestaciones cuentan con un papel importante en la regulación de voltaje, donde el transformador puede cambiar la magnitud de voltaje entre el lado primario y secundario. La regulación del voltaje se define como la capacidad de proporcionar un nivel de voltaje óptimo de manera continua, frente a una amplia gama de condiciones de carga [1].

El OLTC se encuentra presente dentro del ámbito de la regulación de voltaje en los sistemas de distribución, estos pueden ser considerados de dos maneras: en estado desenergizado o bajo carga [2]. En la actualidad generalmente se ocupa el cambiador de tomas bajo carga, debido a los cambios que se presenta en las cargas debido al incremento poblacional que presentan las ciudades por ende las nuevas subestaciones se dimensionan en base a la estimación de futuras demandas [3].

La filosofía convencional del OLTC mantiene una magnitud fija en las barras de la subestación de acuerdo con un valor determinado como referencia del OLTC. Este tipo de regulación es eficaz en sistemas de distribución que no presentan GD, donde la magnitud de voltaje más elevado se encuentra en la subestación. Sin embargo, esta estrategia de control se ve afectada cuando se introduce GD en los sistemas de distribución. En el momento que se conectan GDS a la red se presentaran variaciones, fluctuaciones en las magnitudes de voltaje como se indica en [4], afectando la calidad del sistema eléctrico tanto al distribuidor como al usuario [5], [6].

El flujo de potencia bidireccional se considera como la causa principal de las magnitudes de alto voltaje, cuando la GD empieza a exceder la carga en el punto de conexión (POC) y la magnitud del voltaje comienza a aumentar desmedidamente [7].

Además, otra causa de las variaciones de voltaje se relaciona con el comportamiento intermitente de la naturaleza, dependiendo del tipo de generación y recurso empleado inciden en la importación y exportación de potencia reactiva de los GDS, en el intento de mantener el perfil de voltaje a un nivel óptimo como se muestra en [8]. En la Figura 1 se observa la aplicación de GD en sistemas de distribución utilizando un OLTC en la subestación para controlar el nivel de tensión de la red.

La variación y las altas magnitudes de voltaje afectan en la confiabilidad del sistema, ya que todos los equipos, dispositivos conectados al sistema eléctrico pueden sufrir afectaciones, deterioro de su vida útil, en casos extremos que no exista un sistema de control se puede producir la falla total del equipo. Ya que la filosofía convencional del OLTC no puede responder frente a las fluctuaciones causadas por los GDS, es esencial que se introduzca una estrategia de regulación efectiva y descentralizada como se realiza en [9], de modo que el sistema no se vea afectado por integración de varios GDS a la red.

De manera que, la estrategia que se propone en este trabajo cambia la filosofía de regulación convencional del OLTC que se enfoca en mantener un nivel de voltaje fijo en la barra de la subestación por utilizar el voltaje promedio general de la red como referencia para el punto de ajuste del OLTC.

La estrategia de control que realiza el OLTC en [10] cambia la posición del tap de forma controlada para mantener el voltaje dentro de límites los definidos. En conjunto con la coordinación de GD, donde los GDS aportaran a la red con la regulación de voltaje en su punto de conexión, ya sea exportan o importando potencia reactiva, a su vez la potencia reactiva disponible se utiliza para mejorar el factor de potencia. Para que este sistema de control funcione es importante que el OLTC y los GDS no actúen en el mismo intervalo de tiempo.

El presente documento se encuentra estructurado de la siguiente manera: i) en la Sección 2 se muestra el Marco Teórico donde se encuentra toda la información relacionada al OLTC, generación distribuida, regulación de voltaje y coordinación de generadores, ii) Sección 3 en este apartado se puntualiza la Descripción del Problema, en el cual se detalla el tipo de sistema aplicado en la modelación, además del algoritmo de

control propuesto y sus respectivos escenarios para su modelación, iii) en la Sección 4 se muestra el Análisis de Resultados de cada uno de los escenarios, detallando los valores y graficas resultantes de la simulación, posteriormente se presentan las conclusiones obtenidas del modelamiento planteado en este trabajo, así como los futuros trabajos que se pueden realizar en base a esta investigación y finalmente el estado del arte.



Figura 1. Ejemplo de Generación Distribuida [Autor]

2. Marco Teórico

Tabla 1. Tabla de Símbolos

Símbolo	Significado	Unidad
FP	Factor de Potencia	p.u
P	Potencia Activa	W
Q	Potencia Reactiva	VAr
S	Potencia Aparente	VA
V	Voltaje	V
I	Intensidad de Corriente	A

Z	Impedancia del Circuito	Ω
R	Resistencia del Circuito	Ω
X	Reactancia del Circuito	Ω
N	Número de Nodos Medidos	
D	Potencia Reactiva Distorsionante	
V_n	Voltaje Nominal	p.u
V_a	Voltaje Medido en el Nodo	p.u

2.1 Generación Distribuida (GD).

Se considera GD a diferentes modelos de generación de electricidad a menor escala, los cuales se ubican cerca de la carga. Esto crea una generación local, la misma que puede ser aplicada tanto para el autoconsumo como la provisión de energía eléctrica, permitiendo inyectar el excedente de energía a la red de distribución [11], [12].

Este tipo de implementaciones hace que el sistema se dinamice, donde el usuario adquiere un papel más importante al pasar de consumidor a productor-consumidor, de tal manera que el usuario ya no dependa en su totalidad de red eléctrica. A continuación se puede observar en la Figura 2 un ejemplo de la estructura de la GD [13].

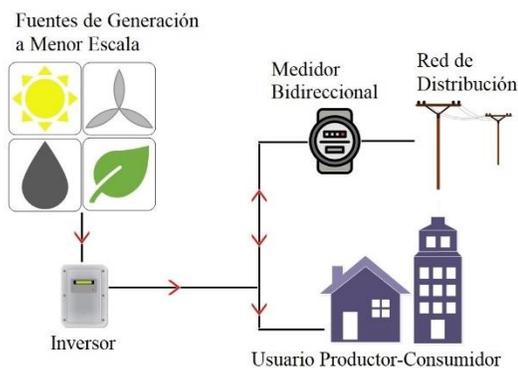


Figura 2. Estructura de Conexión de la Generación Distribuida [Autor]

En la Tabla 2 se observa como la Agencia Internacional de Energía (IEA) en función de capacidad de generación se puede clasificar la GD [14]:

Tabla 2. Clasificación de la GD en Función de la Capacidad de Generación

Tipo de GD	Potencia de Generación
Micro	1 W – 5 kW
Pequeña	5 kW – 5 MW

Mediana	5 MW – 50 MW
Grande	50 MW – 300MW

Para el Ecuador la Agencia de Regulación y Control de Energía y Recursos Naturales No Renovables (ARCERNNR) considera GD para autoabastecimiento a las instalaciones con potencias menores a 1MW, de igual manera para personas jurídicas que puedan contar con GD con una capacidad de hasta 10 MW [15].

2.1.1 Tipos de Generación Distribuida

La GD interconectada debe acoplarse en sincronismo con la red de distribución, la energía producida por los GDS se puede utilizar para el autoconsumo y en el caso de existir un excedente se puede entregar a la empresa distribuidora, creando una partición más dinámica entre el usuario y la empresa de distribución [16].

La generación aislada se encuentra en lugares lejanos donde no existe una conexión externa con la red de distribución ya sea por motivos económicos, sociales o ambientales, de tal manera que la GD deberá ser mayor que la carga de consumo, por lo tanto es necesario complementar la generación con un sistema de baterías [16], [17].

2.1.2 Fuentes de Energía

La GD consta de diferentes tipos de recursos energéticos tanto renovable como no renovable. En el caso de la GD renovable se implementan sistemas de generación eólica, fotovoltaica y biomasa, los cuales utilizan recursos proporcionados por la naturaleza casi interminables [11], [18].

Para la GD no renovable se utiliza recursos energéticos que se agotan a la vez que son consumidos, las reservas de estos

recursos son limitadas entre las cuales están el metano o gas natural y el petróleo, desarrollando sistemas como el motor alternativo y turbinas de gas [17].

Se muestra a continuación en la Tabla 3 los tipos de fuentes de generación, presidiendo de una descripción de cada tipo [11], [18]:

Tabla 3. Tipos de Fuentes de Generación

Tipo	Descripción
Eólica	En este caso se aprovecha la energía producida por el viento mediante un aerogenerador, encargado de transformar la energía mecánica provocada por las palas en energía eléctrica.
Fotovoltaica	Su fuente principal es la radiación emitida por el sol, la cual es absorbida por células fotovoltaicas, estos módulos envían un flujo de energía al inversor capaz de transformar la corriente continua (CC) en corriente alterna (AC).
Biomasa	Todo tipo de material orgánico puede ser manejado por diferentes procesos ya sea por métodos bioquímicos o termoquímicos para ser transformado en energía eléctrica.
Mini-Hidráulica	Se mantiene los principios de funcionamiento de una hidroeléctrica, pero a menor escala, se aprovecha la energía potencial del agua para producir energía mecánica la cual es dirigida al generador para transformar la energía mecánica en energía eléctrica
Motor Alternativo	Este tipo de máquinas cuentan con una combustión interna, interviene la presión generada por el calentamiento de un fluido, permitiendo que los gases empujen el pistón del motor.
Turbina de Gas	Básicamente es un equipo térmico, su tarea principal es expandir un gas para ser combinado con un carburante seguido de un proceso de combustión provocando que las turbinas de gas operen de tal manera que produzca electricidad

2.1.3 Ventajas en el Uso de Generación Distribuida (GD)

En los últimos años existe un incremento de usuarios finales, los cuales se ven atraídos

por la generación local, el autoconsumo y la provisión de energía eléctrica, además de los aspectos que conlleva implementar estos sistemas.

La generación de energía se desarrolla cerca del consumidor, donde el concepto de una central de generación ubicada en lugares lejanos se va perdiendo y entra un nuevo concepto de GD [11].

El usuario no es el único beneficiado, la red de distribución cuenta con el respaldo de la GD, aumentando la confiabilidad del sistema y reduciendo los tiempos fuera servicio. Además se puede aminorar la carga de la red frente a los horarios picos, reduciendo las pérdidas en el transporte y la distribución de energía eléctrica [19].

Dentro de los aspectos medioambientales el uso de energías renovables va tomando prioridad frente a la contaminación producida por centrales que utilizan combustibles fósiles para la producción de energía [19].

Las ciudades pueden contribuir con la reducción de impactos ambientales, como se menciona en [20] al incorporar GD basado en residuos. Se opta por proyectos que proporcionan un desarrollo sostenible y eficiente.

Al integrar pequeñas fuentes de GD al sistema de distribución, surgen varias mejoras y beneficios para el usuario y la empresa distribuidora como:

- Disminución de pérdidas en transmisión y distribución
- Aumento de calidad y confiabilidad en el servicio
- Mejora en la regulación de voltaje
- Mejor control de la potencia reactiva

- Reducción en el precio de la energía
- Integración de Energías renovables

2.2 Cambiador de Tomas Bajo Carga (OLTC)

En el sistema eléctrico de potencia SEP, existen elementos con mayor influencia dentro de la regulación de voltaje, uno de ellos es el transformador potencia asociado a un cambiador de tomas bajo carga, a este elemento se refiere como OLTC. Es un equipo necesario para preservar la calidad de la energía en el SEP [21].

En la Figura 3 se observa el funcionamiento convencional del OLTC, el cual mantiene constante el voltaje secundario del transformador a medida que cambia la carga, conservando el voltaje más alto en la barra de la subestación.

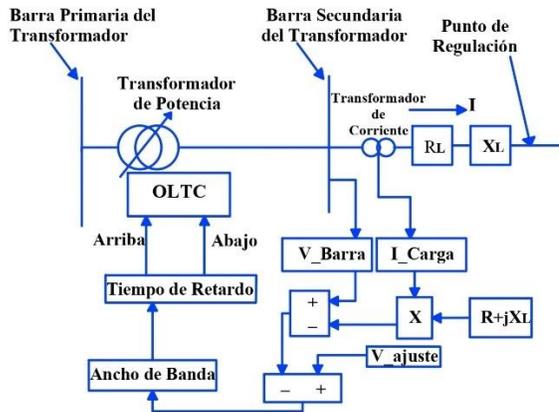


Figura 3. Operación rutinaria del OLTC, en ausencia de GD [Autor]

El OLTC realiza dos funciones sustanciales, por una parte se encarga de regular el voltaje de salida del transformador, mediante la selección de tomas y por otra, trunca la corriente de carga que se produce al realizar el cambio entre tomas, de tal manera que no se interrumpa el servicio [22].

Este tipo de transformadores poseen varias tomas, esto se realiza modificando la cantidad de espiras en el arrollamiento del transformador, de tal manera que se selecciona el toma según la necesidad del nivel de voltaje requerido, compensando la variación del perfil de voltaje que presenta el sistema de distribución [21], [23].

La nueva filosofía de regulación del OLTC se basa en el voltaje promedio de la red, obteniendo los datos de las magnitudes de voltaje de todos los nodos en tiempo real a través del sistema SCADA para obtener el valor de V_m que es el valor de referencia del OLTC como se observa en la Ecuación (1) [24].

$$V_m = \sum_{a=1}^N \frac{V_n - V_a}{N} + V_n \quad (1)$$

2.3 Afectación a la Calidad del Sistema de Distribución

Con el pasar del tiempo es más común la existencia de GD, en su mayor parte al acoplarse con la red de distribución aporta significativamente al sistema. Sin embargo con la presencia de una alta penetración de GD no controlada en la red, afecta de forma negativa a la red de distribución en la cual pueden existir múltiples variaciones [25].

Principalmente las afectaciones se reflejan en la barra de distribución de la subestación, dado que deja de ser la barra de referencia con la mayor magnitud de voltaje. Esta variación de voltaje se debe al flujo de potencia inverso con la presencia de la GD, donde el flujo presente en el sistema será bidireccional [24].

Gran cantidad de la GD depende del estado climático de tal manera que la salida es fluctuante y difícil de predecir con exactitud. Al momento que se acopla con la

red de distribución presenta afectaciones en el flujo de energía y el funcionamiento del sistema. Por este motivo se plantean varias metodologías para mejorar dicha acción [26], [27].

2.4 Regulación de Voltaje

En un sistema de distribución clásico, el método para regular el voltaje es mantener los niveles de voltaje en puntos específicos de control en la red de distribución. Ahora se necesita de un método diferente, inteligente con una adaptación constante frente a la GD [28].

Con la aplicación de un sistema inteligente que regule el nivel de voltaje, de tal manera que se adapte a la necesidad de la red de distribución y los cambios climáticos. Mejorando la calidad y confiabilidad del suministro de energía, a la vez mejorando su rendimiento [28].

Inyectar potencia reactiva a la red de distribución de manera controlada es uno de los retos más complicados los últimos años, debido al sistema de comunicación que necesita tanto la subestación más cercana como el usuario que pertenece a ella [29].

Por medio de una comunicación en coordinación, la capacidad de controlar varios equipos pertenecientes a la red como al usuario, tendrán la capacidad de regular la potencia reactiva para mejorar el voltaje en toda la línea de distribución [30].

2.5 Generalidades Sobre el Factor de Potencia (FP)

El factor de potencia (FP) es un valor que muestra la cantidad de energía eléctrica que es aprovechada o transformada en trabajo, matemáticamente se representa como la división de la potencia activa respecto a la

potencia aparente como se observa en la ecuación (2) [31].

$$FP = \frac{P}{S} \quad (2)$$

El FP puede tomar valores comprendidos entre 0 y 1 dependiendo del tipo de carga que se encuentre conectado. Estas cargas pueden ser inductivas, capacitivas y resistivas como se indica en la Figura 4 .

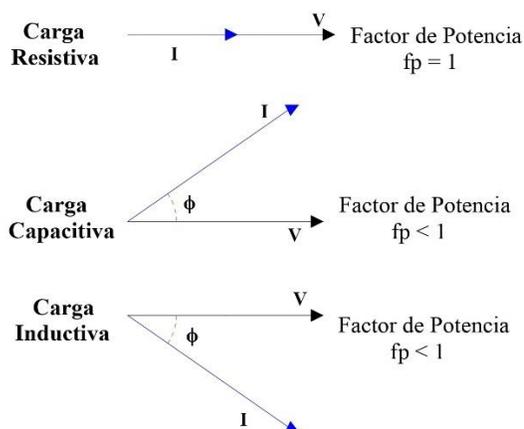


Figura 4. Cargas características del sistema de distribución [Autor]

2.5.1 Armónicos y su Influencia en el Factor de Potencia

Los armónicos de corriente y voltaje que trascienden por las redes eléctricas crean distorsiones en la forma de onda de la señal, donde se refleja la suma de diferentes armónicos. Cuando se evidencian estas deformaciones aparece una nueva demanda de potencia reactiva distorsionante (D) que incurre directamente en la potencia aparente y el factor de potencia se calcula en función de la ecuación (3).

$$FP = \frac{P}{S} = \frac{P}{\sqrt{P^2 + Q^2 + D^2}} \quad (3)$$

Pero cuando no existe una presencia de armónicos o no concurre una presencia relevante de armónicos eléctricos en la red,

el factor de potencia se calcula en función de la ecuación (4).

$$FP = \frac{P}{S} = \frac{P}{\sqrt{P^2 + Q^2}} \quad (4)$$

Por lo tanto, el triángulo de potencias indica las relaciones que existe entre las potencias activa (P), reactiva (Q) y aparente (S). Como se observa en la Figura 5 [31].

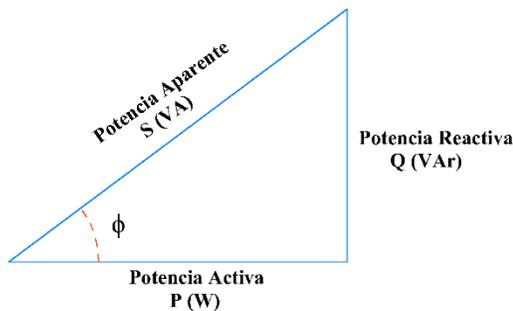


Figura 5. Representación Gráfica del Triángulo de Potencias [Autor]

La potencia activa o potencia real es la potencia consumida o transformada en trabajo. Se representa con la letra (P) y su unidad de medida es el vatio (W). La potencia activa se puede determinar en la ecuación (5) [31].

$$\begin{aligned} P &= I * V * \cos\phi \\ &= I * I * Z * \cos\phi \\ &= I^2 * Z * \cos\phi = I^2 * R \end{aligned} \quad (5)$$

La potencia reactiva es necesaria para la creación del campo magnético, requiere que existan bobinas o condensadores en el circuito. Se representa con la letra (Q) y su unidad de medida es el voltio amperio reactivo (VAr). La potencia reactiva se puede determinar en la ecuación (6) [32].

$$\begin{aligned} Q &= I * V * \sin\phi \\ &= I * I * Z * \sin\phi \\ &= I^2 * Z * \sin\phi = I^2 * X \end{aligned} \quad (6)$$

La potencia aparente es esencial para traspasar la energía de un cuerpo a otro,

implica la capacidad que tiene un elemento para realizar un trabajo, se representa con la letra (S) y su unidad de medida es el voltio amperio (VA). La potencia aparente se puede determinar en la ecuación (7) [33].

$$S = V * I \quad (7)$$

2.5.2 Relación entre el Factor de Potencia y el Despacho de Potencia Reactiva

Debido a la gran cantidad de plantas eólicas y fotovoltaicas conectadas a la red causan fluctuaciones de voltaje y la disminución del FP. Para solucionar estos problemas se estudia el control de la potencia reactiva que importa/exporta los GDS cuando intentan regular el nivel de voltaje en POC [34], [35].

El banco de capacitores que se encuentra asociado a la GD se encarga de inyectar/absorber potencia reactiva cuando el perfil de tensión presenta una sobretensión o subtensión en el punto común de acoplamiento [36].

Por otro lado, cuando la red requiere un ajuste para factor de potencia el sistema de control determina la cantidad de potencia reactiva que puede aportar el GD de manera que el perfil de voltaje en el POC se mantenga dentro de un rango aceptable donde se evite una sobretensión [34].

2.6 Coordinación de Generadores

Para coordinar las capacidades de regulación de voltaje tanto de los GDS como el OLTC se implementan distintos algoritmos necesarios para transmitir información de todo el sistema y esta pueda tomar acciones en respuesta a los valores analizados por un proceso matemático o algoritmo [37].

En la Tabla 4 se detalla distintos artículos que utilizan varias estrategias, métodos y algoritmos para la coordinación de generadores y otros elementos, como la mejora del perfil de voltaje y el FP.

Tabla 4. Métodos y algoritmos para la coordinación de generadores

Métodos	Descripción
Combinación de las magnitudes de voltaje y potencia activa	En [38], se propone un método que utiliza las magnitudes de voltaje de los alimentadores y la potencia activa generada por una planta solar para calcular la posición de la toma OLTC requerida en cada hora.
Respuesta rápida de los DG	En [39], se propone un control de respuesta rápida de los GDS para evitar las variaciones de voltaje excesivas, por lo tanto se reduce el uso excesivo del OLTC
Algoritmo de clasificación	En [40], se propone un esquema de control que utiliza un algoritmo de clasificación para manejar la potencia reactiva de los GDS, el control de las cargas y el OLTC para aliviar los escenarios que presentan subtensión y sobretensión cuando se conectan en la red.
Controlador de lógica difusa y estimación de estado	En [41], cuando las magnitudes de voltaje mínimo y máximo tienen valores distantes, el OLTC detiene su funcionamiento y la planta fotovoltaica utiliza potencia reactiva para controlar el voltaje.
Algoritmo Genético y Microgenético	En [42], se determina la posición del OLTC con un algoritmo microgenético, posteriormente se calcula los puntos de ajuste de todas las unidades de potencia reactiva, coordinando GD, OLTC y capacitores utilizando un sistema SCADA

3. Descripción del Problema

Con el tiempo se ha incrementado la inyección de GD al sistema eléctrico, provocando múltiples desafíos a la red, que incluyen variaciones significativas en las magnitudes de voltaje y la presencia de flujos de energía bidireccional.

Por otra parte, la regulación de voltaje OLTC convencional utiliza una magnitud fija, diseñada para un sistema con un flujo

de potencia unidireccional. Por lo tanto, con la presencia de GD, esta filosofía de regulación resulta ineficaz frente a la integración de fuentes de energía renovables.

Además, el FP se ve afectado por la acción que realiza la GD, ya que estos equipos se encargan de inyectar y absorber potencia reactiva para mantener el perfil de voltaje dentro de los parámetros establecidos por las empresas distribuidoras.

Por lo tanto, se propone un nuevo esquema de regulación de voltaje cuando la GD entra en operación y se conecta a la red de distribución de media tensión desde cualquier punto.

La estrategia de control planteada estimará el voltaje de referencia para el OLTC, calculando el valor medio de voltaje de la red, utilizando las magnitudes de voltaje medidas en cada uno de los nodos del sistema eléctrico. Reemplazando de esta manera el valor fijo que se utiliza usualmente en un OLTC convencional.

El valor de voltaje de referencia del OLTC irá variando a medida que las magnitudes de voltaje del sistema presenten un cambio frente a la influencia de la conexión de GD. Se busca que el OLTC minimice las desviaciones de voltaje, mientras que el valor del voltaje referencia OLTC se acerque a 1pu.

Adicionalmente el sistema de control maneja la salida de potencia reactiva (tanto inyección como absorción) de los GDS en función de la magnitud de voltaje en cada uno de sus puntos de conexión.

Para evitar un problema en la coordinación entre el OLTC y los GD, se prioriza el control de los GD para la

regulación de voltaje mientras que al OLTC se le añade un tiempo de retardo. Si los GD no alcanzan a regular el voltaje con éxito se otorga el control al OLTC una vez transcurrido el tiempo de retardo.

Además, el sistema de control planteado mejora el FP del sistema, el cual se reduce a medida que los GDS se van conectando a la red de distribución. De esta manera el sistema controla cada uno de los GDS y el OLTC para una regulación óptima del voltaje y una mejora efectiva del FP.

3.1 Modelo del Sistema Eléctrico

Para poner a prueba la eficacia del sistema de control, se utiliza el Alimentador de Prueba de 13 Nodos de la IEEE, el mismo que es utilizado para el análisis en sistemas de distribución.

El presente sistema opera a un nivel de voltaje de 115 kV y a través de una subestación reductora el voltaje desciende a 4,16 kV. Se identifica por ser un sistema pequeño que cuenta con varias líneas de corta longitud como se observa en la Tabla 5.

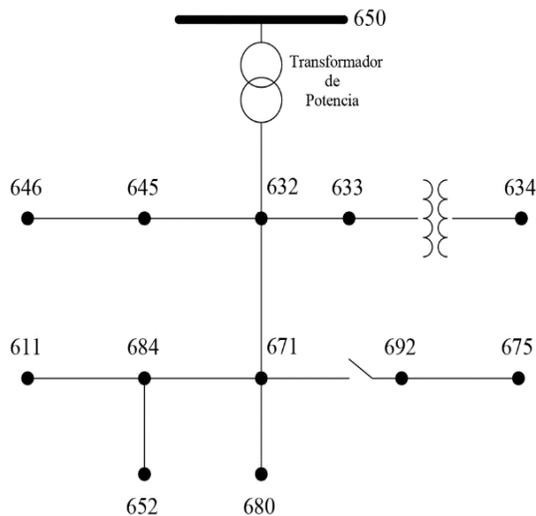


Figura 6. Diagrama unifilar del sistema de alimentación de 13 nodos IEEE [Autor]

Además, en este modelo el transformador de la subestación no posee

un OLTC. En la Figura 6 se muestra el diagrama unifilar del Sistema de Alimentación de 13 nodos IEEE.

Tabla 5. Datos de las líneas del sistema

Nodo A	Nodo B	Longitud (km)
632	645	0,15
632	633	0,15
633	634	0,00
645	646	0,09
650	632	0,61
684	652	0,24
632	671	0,61
671	684	0,09
671	680	0,30
671	692	0,00
684	611	0,09
692	675	0,15

En la Tabla 6 se describe la ubicación, tipo, conexión y la cantidad de consumo de cada una de las cargas existentes en el sistema de distribución.

Tabla 6. Datos de las Cargas del Sistema

Nodo	Carga	FaseA		FaseB		FaseC	
		Modelo	kW	kVAr	kW	kVAr	kW
634	Y-PQ	160	110	120	90	120	90
645	Y-PQ	0	0	170	125	0	0
646	D-Z	0	0	230	132	0	0
652	Y-Z	128	86	0	0	0	0
671	D-PQ	385	220	385	220	385	220
675	Y-PQ	485	190	68	60	290	212
692	D-I	0	0	0	0	170	151
611	Y-I	0	0	0	0	170	80
	TOTAL	1158	606	973	627	1135	753

Donde:

- Y** Conexión en Estrella
- D** Conexión en Delta
- PQ** Constante en kW y kVAr
- Z** Constante de Impedancia
- I** Constante de Corriente

Para la Tabla 7 se puede observar los datos base del sistema, antes de realizar cualquier tipo de regulación de voltaje.

Tabla 7. Valores base del sistema de alimentación de 13 Nodos

Descripción	Valor	Unidad
FP	0,91	p.u
Vm	0,9499	p.u
Pgen	3,14	MW
Qgen	1,37	MVAr

Nodo	Magnitud de Voltaje	Unidad
632	0,9695	p.u
633	0,9671	p.u
634	0,9478	p.u
645	0,966	p.u
646	0,9648	p.u
671	0,9504	p.u
680	0,9504	p.u
684	0,9323	p.u
611	0,9236	p.u
652	0,9283	p.u
692	0,9504	p.u
675	0,9484	p.u

3.2 Algoritmo de Control

En la Figura 7 se muestra el gráfico del sistema de control, donde se propone la regulación de voltaje y mejora del factor de potencia, coordinando el funcionamiento del OLTC y los GDS.

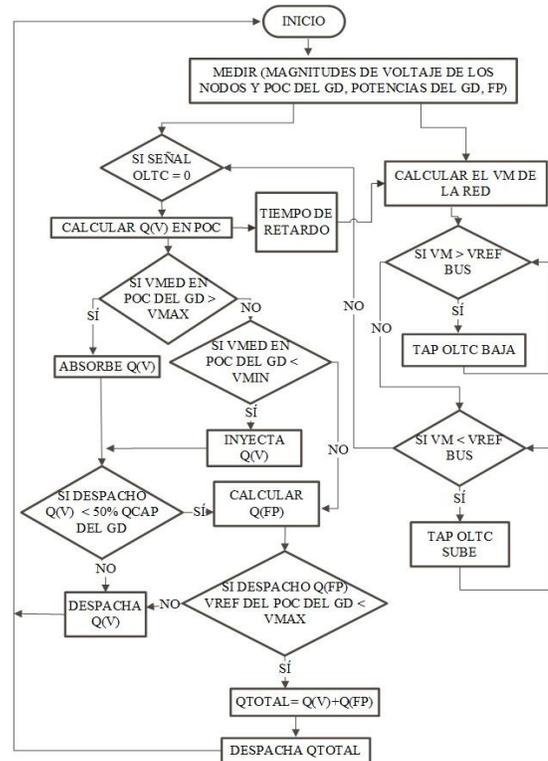


Figura 7. Algoritmo del Sistema de Control Propuesto (OLTC y GD) [Autor]

El algoritmo de control de la Figura 7 también se describe en los siguientes pasos:

Paso 1: Se miden las magnitudes de voltaje de los nodos y cada POC (punto de conexión) de GD, así como las potencias de cada GD. Además, se mide el factor de potencia en la salida del transformador de la subestación.

Paso 2: Una vez medidas las magnitudes de voltaje en todos los nodos, el OLTC trabaja en función del voltaje promedio de la red (V_m). En esta instancia se determina si existe alguna variación significativa entre el V_m y V_{ref} de la Barra (1p.u), dando paso a la regulación de voltaje por medio de los cambios en el tap del transformador (suba/baje) hasta que el V_m llegue al valor más cercano de 1 p.u. Una vez que el OLTC termina su función de regulación da continuidad al siguiente paso.

Paso 3: Se determina si el GD necesita despachar potencia reactiva para la regulación de voltaje $Q(V)$ en función de la desviación que presente el voltaje medido en el punto de conexión POC del GD. Si el V_{med} en el POC está dentro de los valores max y min de la variación de voltaje no es necesario regular el voltaje, cualquier otro valor fuera del rango indica que es necesario despachar potencia reactiva para controlar el nivel de voltaje. Simultáneamente, el sistema mantiene al OLTC en retardo hasta que el GD termine su etapa de regulación.

Paso 4: El sistema compara el valor despachado por $Q(V)$ con la capacidad de potencia reactiva del GD respectivo. Si el valor de $Q(V)$ es mayor al 50% de la capacidad de potencia reactiva del GD, únicamente ese GD inyecta/absorbe potencia reactiva. Si el valor es menor al 50% de la capacidad de potencia reactiva del GD, el sistema de control continua con la etapa del mejoramiento del factor de potencia.

Paso 5: Se evalúa el factor de potencia del sistema y se determina la potencia reactiva de despacho de cada GD para mejorar el factor de potencia $Q(FP)$. Además, se despacha potencia reactiva siempre que V_{med} en el POC del GD sea menor al V_{max} . De esta manera el sistema calcula la potencia reactiva necesaria para la regulación de voltaje y la mejora del factor de potencia, ordenando a los GDS a importar o exportar la potencia reactiva requerida por la red.

Paso 6: Una vez que el GD finaliza el proceso de despacho de potencia reactiva, el OLTC regresa a su etapa de regulación. Como el proceso es continuo y en tiempo real, el OLTC ajusta constantemente el nivel de tensión.

3.3 Casos de Estudio

El presente trabajo se desarrolla en base a la integración de generadores eólicos (GEO) a la red de distribución, dado que los GD tienen la posibilidad de conectarse en cualquier lugar de la red, las unidades GEO se ubican en distintos puntos del sistema de distribución.

Además, en la subestación consta un transformador de potencia equipado con un OLTC, el cual en coordinación con los GEO se encargan de regular el nivel de voltaje de la red y mejorar el factor de potencia frente a la ausencia de armónicos. Simultáneamente se ira añadiendo GD al sistema, observando la respuesta del sistema de control en distintos escenarios con baja y alta inyección de potencia activa.

En la Figura 8 se observa la curva característica de los GEO, donde se aprecia la variación de la velocidad del viento y como esta influye en la potencia activa entregada por el aerogenerador.

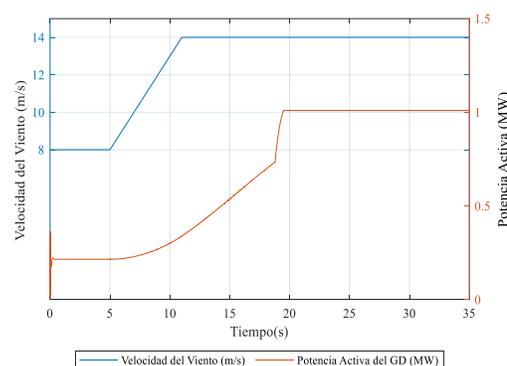


Figura 8. Curva Característica del Aerogenerador [Autor]

Estos valores son empleados en la simulación de los GEO, donde se puede observar cómo la potencia activa generada va incrementando gradualmente a medida que la velocidad del viento incrementa.

3.3.1 Escenario 1: Conexión de un GEO de 1MW a un sistema de distribución

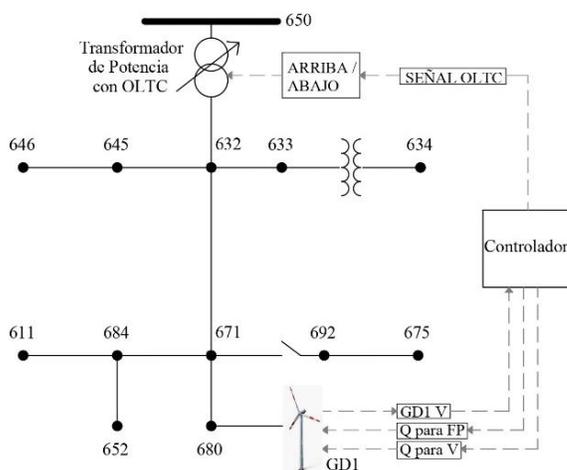


Figura 9. Conexión de un GEO con baja generación de potencia activa [Autor]

El primer escenario implica la red de distribución que se observa en la Figura 9, donde se aprecia la incorporación de un OLTC en el transformador de potencia de la subestación y la conexión de un GEO con una capacidad de generación de 1 MW en el nodo 680 de la red de distribución.

También, se observa el sistema de control que coordina la ejecución del OLTC y el GD1. El sistema de control en base a los datos limita la operación de los equipos de regulación, estos equipos no pueden trabajar al mismo tiempo porque su capacidad de regulación se vería afectada.

El controlador recibe los datos del OLTC y del GD1 en tiempo real, entre ellos los niveles de voltaje de todos los nodos, las potencias activas y reactivas, el factor de potencia y la disponibilidad de potencia reactiva. Esto permite al sistema evaluar y asignar la ejecución etapas de regulación de manera ordenada sin que exista algún tipo de afectación o variación en la red.

3.3.2 Escenario 2: Conexión de dos GEO de 1 y 2MW a un sistema de distribución

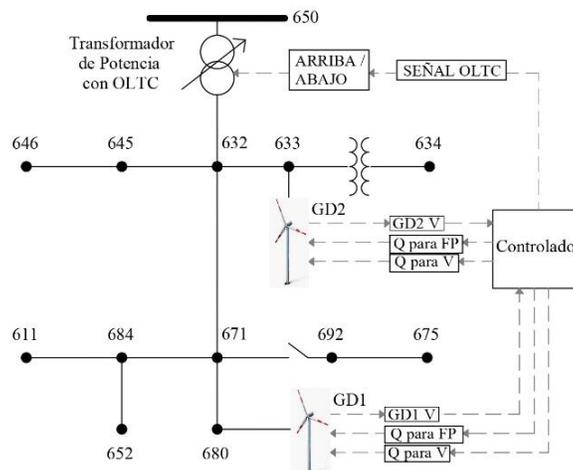


Figura 10. Conexión de dos GEO con alta generación de potencia activa [Autor]

El segundo escenario implica la red de distribución que se observa en la Figura 10, donde se aprecia la incorporación de un OLTC en el transformador de potencia de la subestación y la conexión de dos GEO con una capacidad de generación total de 3 MW, el GD1 cuenta con una capacidad de 2MW y se ubica en el nodo 680, el GD2 cuenta con una capacidad de 1MW y se ubica en el nodo 633.

De igual manera que el escenario 1 se observa el sistema de control que coordina la ejecución del OLTC y el GD1. En este escenario se agrega un GD2 que funciona de igual manera que el GD1, pero la potencia activa total inyectada por los GDS aumenta a 3MW.

El controlador recibe los datos del OLTC y del GD1-GD2 en tiempo real. Esto permite al sistema evaluar y asignar la ejecución de las etapas de regulación de manera ordenada sin que exista algún tipo de afectación o variación en la red.

4. Análisis de Resultados

Para realizar el análisis de cada uno de los escenarios es necesario tomar en cuenta los valores base que presenta el sistema de distribución de 13 nodos de la IEEE como se observa en la Tabla 7, en base a estos datos se podrá verificar si la aplicación del sistema de control y la implementación de un transformador con OLTC mejora los perfiles de voltaje y el factor de potencia del sistema.

La red de distribución que se muestra en la Figura 9 es similar a la Figura 10 pero la cantidad de GDS cambia. Estos sistemas se modelaron en MATLAB SIMULINK para verificar la eficacia del sistema de control propuesto.

La principal diferencia de cada escenario es la cantidad de potencia activa generada por GEO para evaluar la respuesta del sistema de control bajo diferentes niveles de penetración de GD. A continuación, se analiza los resultados obtenidos de los dos escenarios propuestos.

4.1 Resultados del Escenario 1

Para el primer escenario se analiza el sistema distribución que se indica en la Figura 9 donde se observa la incorporación de un transformador de potencia equipado con un OLTC, además de la presencia de un GD acoplado a la red. Todo esto acompañado de un sistema de control para regular el voltaje de la red y mejorar el factor de potencia.

Inicialmente la magnitud del V_m de la red tiene un valor de 0.949 pu, un valor inferior al compararlo con el V_{ref} bus. Además, el GD1 va generando potencia activa gradualmente en función de la variación del viento. Mientras tanto el OLTC toma el control para mejorar el perfil de voltaje. En la Tabla 8 se observa los datos del sistema

cuando actúa el OLTC, donde se busca que el V_m se acerque a 1 p.u, por medio de los cambios del tap del transformador.

Tabla 8. Primera acción de regulación de voltaje que realiza el OLTC

Descripción		Valor	Unidad
Factor de Potencia		0,91	p.u
Potencia Reactiva del Trafo		1,46	MVA _r
Potencia Activa del GD1		0,583	MW
Posición del Tap		+2	
V_m		0,984	p.u
Actual Voltaje OLTC		1,004	p.u

Nodo	Valor	Nodo	Valor
632	1,004 p.u	680	0,984 p.u
633	1,001 p.u	684	0,964 p.u
634	0,981 p.u	611	0,961 p.u
645	0,999 p.u	652	0,965 p.u
646	0,998 p.u	692	0,983 p.u
671	0,9803 p.u	675	0,981 p.u

Partiendo de un voltaje promedio de la red de 0,949 p.u se encuentran perfiles de voltaje bajos con una variación de al menos el 8% de su voltaje nominal. Esta variación de voltaje dentro de una red de media tensión no es permisible, la variación de voltaje máxima es de $\pm 6\%$ como los establece la Regulación No. ARCERNR – 002/20 para redes de medio voltaje [43]. Dado que el voltaje promedio de la red es inferior que el V_{ref} bus (1 p.u) el OLTC se esfuerza para igualar estos valores.

El sistema calcula el valor del tap para regular la salida del voltaje del transformador, equiparando el V_m con V_{ref} bus. En este caso el tap va incrementando de paso en paso hasta ubicarse en el tap +2. En este punto las magnitudes de voltaje de toda la red incrementaron una vez realizado la regulación de voltaje por medio del OLTC,

donde el voltaje promedio de la red es de 0,984 p.u y el perfil más bajo de la red es de 0,961 p.u en el nodo 611 el cual se encuentra dentro de la variación de voltaje permitido.

Mientras el GD1 va inyectando gradualmente potencia activa en función de la velocidad del viento, se puede observar que no existe un cambio representativo en los valores de la red.

Tabla 9. Valores cuando el GD1 aporta potencia activa, antes de una regulación.

Descripción	Valor	Unidad
Factor de Potencia	0,89	p.u
Potencia Reactiva del Trafo	1,46	MVAr
Potencia Activa del GD1	1,01	MW
Posición del Tap	+2	
V _m	0,986	p.u
Actual Voltaje OLTC	1,005	p.u

Nodo	Valor	Nodo	Valor
632	1,005 p.u	680	0,987 p.u
633	1,002 p.u	684	0,968 p.u
634	0,982 p.u	611	0,964 p.u
645	1,001 p.u	652	0,968 p.u
646	1 p.u	692	0,987 p.u
671	0,987 p.u	675	0,985 p.u

Una vez que el GD1 entrega su potencia nominal (1,01 MW), se puede apreciar que los perfiles de voltaje de la red tienen un ligero incremento en su magnitud como se muestra en la Tabla 9, todas las magnitudes de voltaje están dentro de la desviación pretendida del $\pm 6\%$. De igual manera se observa un pequeño aumento en el voltaje promedio de la red y la disminución del factor de potencia frente a la presencia del GD1. La baja inyección de potencia activa del aerogenerador no representa un problema para la red.

Tabla 10. Valores de la red cuando se activa sistema de control del GD1 y el OLTC

Descripción	Valor	Unidad
Factor de Potencia	0,95	p.u
Potencia Reactiva del Trafo	1,03	MVAr
Potencia Activa del GD1	0,46	MW
Posición del Tap	+2	
V _m	0,996	p.u
Actual Voltaje OLTC	1,012	p.u

Nodo	Valor	Nodo	Valor
632	1,012 p.u	680	1,002 p.u
633	1,009 p.u	684	0,979 p.u
634	0,989 p.u	611	0,976 p.u
645	1,008 p.u	652	0,979 p.u
646	1,007 p.u	692	0,998 p.u
671	0,998 p.u	675	0,996 p.u

Dado que la desviación del voltaje promedio de la red está dentro de los valores permisibles el OLTC se encuentra en retardo mientras funciona el sistema de control del GD1. En ese momento se mide el perfil de voltaje del POC del GD1, el sistema calcula la potencia reactiva necesaria para mejorar la magnitud de voltaje.

En este caso el POC del GD1 no presenta una desviación de voltaje significativa por lo que el sistema da paso al mejoramiento del factor de potencia, exportando la potencia reactiva calculada por el sistema de control, de esta manera el factor de potencia incrementa a 0,95 p.u.

Además, la exportación de potencia reactiva para corregir el factor de potencia aumentó ligeramente las magnitudes de voltaje provocando que el voltaje promedio de la red tenga un valor cercano al 1 p.u.

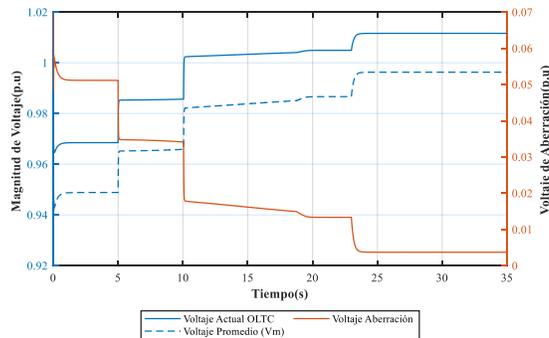


Figura 11. Voltaje Promedio, de Aberración y en la salida del Trafo [Autor]

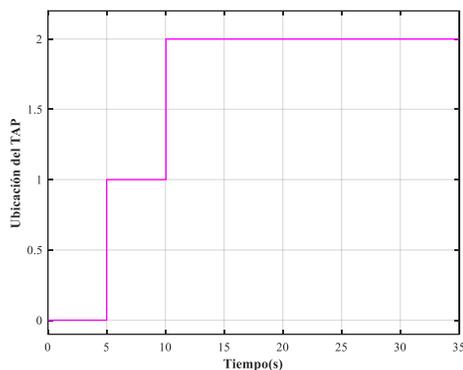


Figura 12. Cambio de TAP en el Transformador [Autor]

Como se observa en la Figura 11 se muestra el voltaje promedio de la red, el voltaje actual del OLTC y el voltaje de aberración que indica la cantidad de desviación del V_m respecto al valor buscado que es 1 p.u. Inicialmente el V_m y el voltaje de aberración están más alejados. Este valor es medido antes que el OLTC empiece a operar, por lo que nos indica un valor desviación del V_m , que es de 0,051 p.u respecto al voltaje referencia (1p.u).

Para disminuir esta desviación el OLTC entra en funcionamiento como se observa en la Figura 12, en $t = 5s$ y $t = 10s$ el cambio del tap a un valor de +2, consigue que el nivel de voltaje se incremente y el V_m de la red suba a 0,986 p.u, consecuentemente disminuya el voltaje de aberración a 0,014 p.u.

En $t = 23s$ se acciona el sistema de control para la corrección del factor de

potencia, el cual provoca que se eleve levemente el nivel de la red, donde el V_m incrementa a 0,996 p.u. Esta acción de exportación de potencia reactiva provoca que la desviación del V_m se reduzca de 0,014 p.u a 0,004 p.u. Por lo cual el OLTC considera que no es necesario realizar algún ajuste adicional en el tap.

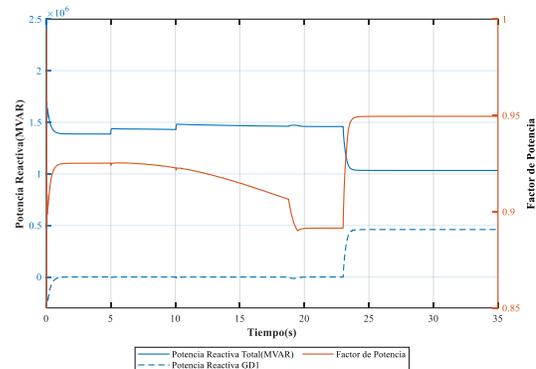


Figura 13. Potencia reactiva en el GD1 y el factor de potencia asociado [Autor]

En la Figura 13 se observa los valores medidos en el transformador principal del sistema de distribución, donde se observa la potencia reactiva que fluye por el transformador junto al factor de potencia que lo asocia, de igual manera se aprecia cuando el GD1 importa potencia reactiva.

Respecto al factor de potencia se puede apreciar una ligera disminución en un $t=19s$, cuando el GD1 aporta su potencia activa nominal. Después de un tiempo el sistema de control da acción al GD1 para exportar potencia reactiva para la mejora del factor de potencia donde se evidencia que pasa de 0,89 p.u a 0,95 p.u, al mismo tiempo que la potencia reactiva total que fluye a través del transformador se reduce con la acción del GD1.

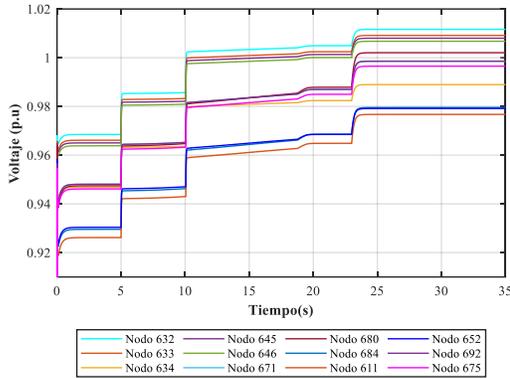


Figura 14. Magnitudes de voltaje de los nodos del sistema de distribución [Autor]

En la Figura 14 se muestra cada una de las magnitudes de voltaje medidas en toda la red. Se observa como las magnitudes de voltaje inicialmente son bajas, pero aumentan significativamente mediante la operación del sistema de control a través de la coordinación del GD1 y el OLTC.

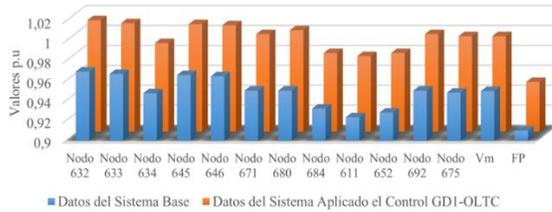


Figura 15. Comparación del sistema base y el sistema aplicado el control [Autor]

En el escenario 1 se ha mostrado que inicialmente en el sistema de distribución se experimentan magnitudes de bajo voltaje. Sin embargo, el sistema de control logro aumentar las magnitudes a un rango aceptable mediante la activación del OLTC en referencia al voltaje promedio de la red, asimismo se evidencio la disminución de la variación de voltaje de de 0,014 p.u a 0,004 p.u. Además, la exportación de potencia reactiva del GD1 mejoro el factor de potencia, todo esto se realizó a través del sistema de control coordinando el funcionamiento del OLTC con el GD1, todas estas mejoras se observan en la Figura 15.

4.2 Resultados del Escenario 2

En el segundo escenario se analiza el sistema distribución que se indica en la Figura 11, donde se observa la incorporación de un transformador de potencia equipado con un OLTC, además de la presencia de dos GDS acoplados a la red. Todo esto acompañado de un sistema de control para regular el voltaje de la red y mejorar el factor de potencia. El objetivo es evaluar la efectividad del algoritmo propuesto cuando la cantidad de GDS y la potencia activa que generan se incrementa en comparación al escenario 1.

Inicialmente se observa en la Tabla 7 que existen magnitudes de voltaje inferiores al 6% del voltaje nominal, de igual manera se puede apreciar que el V_m tiene un valor de 0.949 p.u, un valor inferior al compararlo con el V_{ref} bus.

A medida que los GDS se van acoplando a la red, el sistema de control inicia el proceso de regulación de voltaje con la acción del OLTC en función del voltaje promedio de la red. En la Tabla 11 se observa los datos del sistema cuando actúa el OLTC, donde se busca que el V_m se acerque a 1p.u, por medio de los cambios del tap del transformador.

Tabla 11. Valores cuando el OLTC realiza la primera acción de regulación

Descripción	Valor	Unidad	
Factor de Potencia	0,88	p.u	
Potencia Reactiva del Trafo	1,46	MVA _r	
Potencia Activa del GD1	1,13	MW	
Potencia Activa del GD2	0,56	MW	
Posición del Tap	+2		
V_m	0,988	p.u	
Actual Voltaje OLTC	1,006	p.u	
Nodo	Valor	Nodo	Valor
632	1,006 p.u	680	0,989 p.u

633	1,003 p.u	684	0,969 p.u
634	0,983 p.u	611	0,974 p.u
645	1,002 p.u	652	0,966 p.u
646	1,001 p.u	692	0,988 p.u
671	0,988 p.u	675	0,986 p.u

En la Tabla 11 se puede evidenciar el accionamiento del OLTC, donde el sistema calcula el valor del tap para regular la salida de voltaje del transformador, equiparando el V_m con V_{ref} bus. En este caso el tap va incrementando de paso en paso hasta ubicarse en el tap +2. El resultado de la acción del OLTC se refleja en el voltaje promedio de la red que es de 0,988 p.u.

Todas las magnitudes de voltaje se encuentran dentro de los valores aceptables que exigen las empresas distribuidoras. Mientras los GDS van inyectando gradualmente potencia activa a la red, se puede observar un leve decaimiento del factor de potencia.

Tabla 12. Valores de la red cuando el GD1 y GD2 aportan su potencia activa total

Descripción	Valor	Unidad
Factor de Potencia	0,88	p.u
Potencia Reactiva del Trafo	1,49	MVAr
Potencia Activa del GD1	2,05	MW
Potencia Activa del GD2	1,01	MW
Posición del Tap	+2	
V_m	0,992	p.u
Actual Voltaje OLTC	1,008	p.u

Nodo	Valor	Nodo	Valor
632	1,008 p.u	680	0,995 p.u
633	1,007 p.u	684	0,976 p.u
634	0,986 p.u	611	0,98 p.u
645	1,004 p.u	652	0,971 p.u
646	1,003 p.u	692	0,993 p.u
671	0,993 p.u	675	0,991 p.u

Una vez que el GD1 y el GD2 entregan su potencia total de 3,06 MW, se puede apreciar que los perfiles de voltaje de la red tienen un ligero incremento en su magnitud, de igual manera con el voltaje promedio, todas las magnitudes voltaje están dentro de la desviación pretendida del $\pm 6\%$. Sin embargo, el factor de potencia decae abruptamente a 0,71 p.u, posteriormente el sistema de control calcula la cantidad de potencia reactiva que debe exportar GD1 y GD2 para mejorar factor de potencia.

Tabla 13. Valores cuando finaliza la regulación de los GDS coordinado con OLTC

Descripción	Valor	Unidad
Factor de Potencia	0,99	p.u
Potencia Reactiva del Trafo	0,15	MVAr
Potencia Activa del GD1	2,04	MW
Potencia Activa del GD2	1,01	MW
Posición del Tap	+1	
V_m	1,002	p.u
Actual Voltaje OLTC	1,012	p.u

Nodo	Valor	Nodo	Valor
632	1,008 p.u	680	0,995 p.u
633	1,007 p.u	684	0,976 p.u
634	0,986 p.u	611	0,98 p.u
645	1,004 p.u	652	0,971 p.u
646	1,003 p.u	692	0,993 p.u
671	0,993 p.u	675	0,991 p.u

Empezamos por ver que la desviación del voltaje promedio de la red tiene un valor muy cercano a cero (0.002 p.u). Debido a esto el OLTC se encuentra en retardo, dando el control a los GDS. El sistema de control calcula la cantidad de potencia reactiva que deben exportar los GDS para mejorar el factor de potencia y evidentemente este valor aumenta hasta 0,99 p.u.

Consecuencia del mejoramiento del factor de potencia, en el momento que los GDS exportan potencia reactiva las magnitudes de voltaje de todo el sistema crecen superando el 1pu en los nodos de POC de GD y los nodos cercanos a ellos, donde ninguno de los nodos supera la desviación de voltaje máxima. Sin embargo, el voltaje promedio de la red aumenta y el sistema de control da paso a la acción del OLTC, el cual disminuye su tap a +1 para igualar el voltaje promedio con el Vref del bus, dando como resultado un valor de 1,002 p.u.

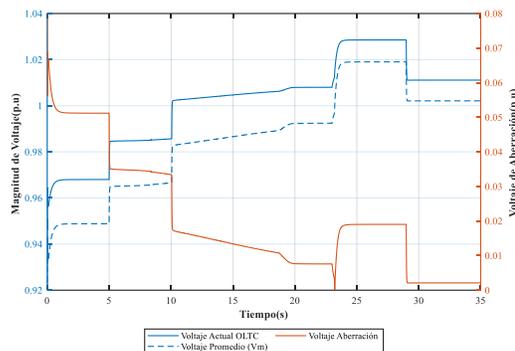


Figura 16. Voltaje Promedio, de Aberración y en la salida del Trafo [Autor]

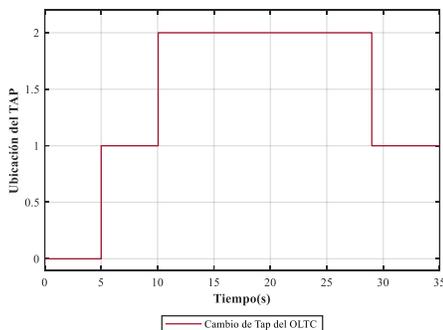


Figura 17. Cambio de TAP en el Transformador [Autor]

Como se observa en la Figura 16 se muestra el voltaje promedio de la red, el voltaje actual del OLTC y el voltaje de aberración. Se percibe de inicio el alto valor del voltaje de aberración, esto nos indica la

desviación del voltaje promedio de la red respecto al Vref.

Para reducir esta desviación el sistema de control asigna la regulación de voltaje al OLTC como se observa en la Figura 17 en $t = 5s$ y $t = 10s$ se realiza el cambio de ubicación del tap donde alcanza un valor de +2, consiguiendo que incremente el V_m a 0,988 p.u y disminuya el voltaje de aberración a 0,012 p.u. En $t = 23s$ el sistema de control ordena a los GDS a exportar potencia reactiva para mejorar el factor de potencia, esta acción provoca un ajuste en el V_m a 1,02 p.u, incrementando la desviación del V_m de 0,012 p.u a 0,02 p.u.

Frente a este aumento del V_m el sistema de control ordena el accionamiento del OLTC, en $t = 29s$ el sistema calcula el cambio de tap a +1. Llegando a este punto el cambio de tap provoca que el V_m sea muy próximo a 1 p.u, de igual manera el voltaje de aberración tiene un valor cercano a cero.

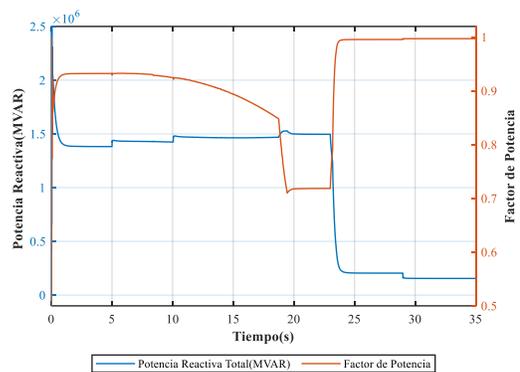


Figura 18. Potencia reactiva total y el factor de potencia del trafo [Autor]

En la Figura 18 se observa la potencia reactiva que fluye por el transformador junto al factor de potencia que lo asocia, en este caso se puede observar cómo va disminuyendo continuamente el factor de potencia hasta un valor de 0,71 p.u.

La potencia activa entregada por GD1 y GD2 cubre gran parte de la carga que

demanda por el sistema de distribución, provocando que la potencia activa que fluye a través del transformador se reduzca y eventualmente el valor del factor de potencia decaiga.

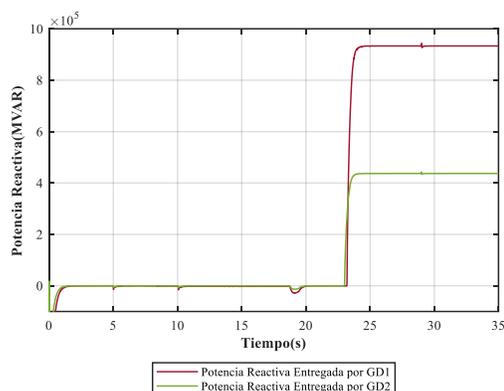


Figura 19. Potencia Reactiva Entregada por GD1 Y GD2 [Autor]

Para solucionar este problema se puede observar en la Figura 19 como instantes después de presenciar esta caída el sistema otorga el control a GD1 y GD2 para exportar potencia reactiva a la red. En ese instante se aprecia cómo va mejorando el factor de potencia eventualmente.

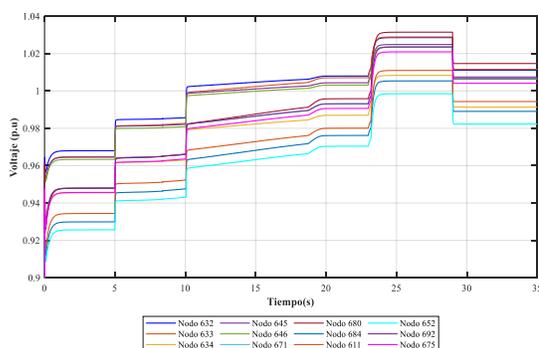


Figura 20. Magnitudes de voltaje de los nodos del sistema de distribución [Autor]

En la Figura 20 se muestra cada una de las magnitudes de voltaje medidas en toda la red. Se observa como las magnitudes de voltaje incrementan gradualmente, se puede distinguir de forma escalonada cada uno de los procesos de regulación de

voltaje que se realiza a través de la coordinación del GD1, GD2 y el OLTC.

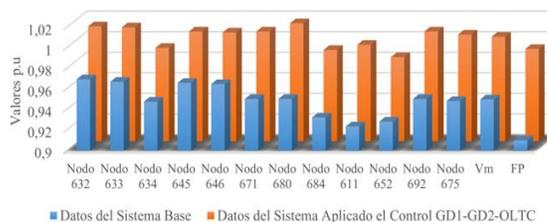


Figura 21. Comparación del sistema base y el sistema aplicado el control [Autor]

En el escenario 2 se ha mostrado que frente a los bajos valores de voltaje y una alta exportación de potencia activa a la red. El sistema de control es efectivo, de manera que ha mejorado cada uno de los índices que posee es sistema de distribución, tal como se aprecia en la Figura 21. Todo esto se debe a la correcta coordinación entre los GDS y el OLTC.

5. Conclusiones

Posterior al estudio y análisis de los resultados obtenidos en este trabajo, se presentan las siguientes conclusiones:

En este trabajo se presenta un esquema de control diferente, que permite a la red de distribución regular de forma óptima el perfil de voltaje y a su vez mejorar el factor de potencia cuando se conectan varios GD. En base a la coordinación de las capacidades de regulación entre el OLTC y los GDS.

El sistema de control propuesto se probó en una red de distribución de 13 nodos de la IEEE donde se adiciono el OLTC y el nuevo esquema de control, dicho sistema se modelo en MATLAB SIMULINK. La evaluación se llevó a cabo en dos escenarios con diferentes niveles de penetración de GD.

En el escenario 1, frente a bajas magnitudes de voltaje y la integración de un GEO con una capacidad de 1MW, el sistema de control consiguió mejorar el

perfil de voltaje en cada uno de los nodos, esto se ve reflejado en el voltaje promedio de la red V_m donde su valor incrementa 0,94 p.u a 0,99 p.u. También se evidencio la mejora del factor de potencia de 0,91 p.u a 0,95 p.u.

De igual manera en el escenario 2 se aprecia la mejora del V_m de 0,94 p.u a 1,002 p.u, así como del FP de 0,91 p.u a 0,99 p.u. En el transcurso de este escenario se observó una caída significativa del FP, pero el correcto e inmediato funcionamiento del sistema de control logro mejorar este índice mediante la exportación de potencia reactiva de los GDS.

Basándose en el análisis de los resultados obtenidos, se puede concluir que el sistema de control propuesto logra coordinar eficazmente el OLTC con los GDS, controlando las magnitudes de voltaje y el factor de potencia de la red de distribución.

6. Trabajos Futuros

Partiendo de los estudios y resultados obtenidos en el presente trabajo, se puede como base para realizar investigaciones relacionadas con:

- Óptima ubicación y dimensionamiento de múltiples unidades de GD
- Óptima ubicación y dimensionamiento de GD modelado en diferentes sistemas de la IEEE
- Optima selección del tap del OLTC frente a posibles contingencias de la red.

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] E. O. Hasan, A. Y. Hatata, E. A. E. Badran, and F. H. Yossef, "Voltage Control of Distribution Systems Using Electronic OLTC," *2018 20th Int. Middle East Power Syst. Conf. MEPCON 2018 - Proc.*, pp. 845–849, 2019.
- [3] R. Ma, R. Wu, M. A. Khanwala, D. Li, and S. Dang, "Power demand forecasting using stochastic model: Parameter estimation," *Proc. - Int. Conf. Mod. Electr. Power Syst. MEPS 2015*, pp. 20–23, 2015.
- [4] M. Joorabian, M. Ajodani, and M. Baghdadi, "A method for voltage regulation in distribution network equipped with OLTC transformers and DG units," *Asia-Pacific Power Energy Eng. Conf. APPEEC*, vol. 1, pp. 1–5, 2010.
- [5] M. Z. C. Wanik, M. M. Bukshaisha, and S. R. Chaudhry, "PV generation in distribution network and its impact on power transformer on-load tap changer operation," *2017 IEEE Manchester PowerTech, Powertech 2017*, 2017.
- [6] W. Sun, G. Zou, S. Qiao, and X. Du, "A Novel Voltage Regulation Scheme for Active Distribution Grid," *Proc. - 2020 5th Asia Conf. Power Electr. Eng. ACPEE 2020*, pp. 493–497, 2020.
- [7] D. Iioka, T. Fujii, T. Tanaka, T. Harimoto, and J. Motoyama, "Voltage reduction in medium voltage distribution systems using constant power factor control of PV PCS," *Energies*, vol. 13, no. 20, 2020.
- [8] B. N. Rao, N. Senroy, and A. R.

- Abhyankar, "Analysis of OLTC behaviour in a wind power integrated distribution system," *Asia-Pacific Power Energy Eng. Conf. APPEEC*, vol. 2015-March, no. March, pp. 8–12, 2014.
- [9] S. C. Angaphiwatchawal Pikkanate, Patipol Katasema, "A Cooperation between OLTC and Local Controls of Photovoltaic Inverter for Enhancing the Hosting Capacity of Typical Distribution System in Thailand," *Congr. Int. Ing. Eléctrica/Electrónica, Informática, Telecomunicaciones y Tecnol. la Inf.*, pp. 1–4, 2021.
- [10] A. N. Hasan and N. Tshivhase, "Voltage regulation system for OLTC in distribution power systems with high penetration level of embedded generation," *Int. Trans. Electr. Energy Syst.*, vol. 29, no. 7, pp. 1–16, 2019.
- [11] FENERCOM, "Guía Básica de la Generación Distribuida."
- [12] M. Stadler, G. Cardoso, and S. Mashayekh, "Distributed Energy Resources and Microgrids Modelling," *Microgrids - Berkeley Lab*, p. 2030, 2013.
- [13] F. Soto, *Generación eléctrica distribuida.*
- [14] L. F. Grisales, B. J. Restrepo Cuestas, and F. E. Jaramillo, "Ubicación y dimensionamiento de generación distribuida: una revisión TT - Location and sizing of distributed generation: a review," *Cienc. e Ing. Neogranadina*, vol. 27, no. 2, pp. 157–176, 2017.
- [15] A. de R. y C. de E. y R. N. N. Renovables, "REGULACIÓN Nro. ARCERNR-001/2021," pp. 1–39, 2021.
- [16] M. M. Ortega and E. E. V. Guevara, "Como Forma De Acceder Al Autoconsumo Eléctrico a."
- [17] S. V. Kulkarni and D. N. Gaonkar, "Operation and control of a microgrid in isolated mode with multiple distributed generation systems," *Proc. 2017 IEEE Int. Conf. Technol. Adv. Power Energy Explor. Energy Solut. an Intell. Power Grid, TAP Energy 2017*, pp. 1–6, 2018.
- [18] M. R. Javed, M. Islam, and Z. Babar, "Study of scope and effects of isolated small distributed generation sources and their integration with existing system," *2015 Power Gener. Syst. Renew. Energy Technol. PGSRET 2015*, 2015.
- [19] L. Camargo, "GENERACIÓN DISTRIBUIDA: Democratización de la energía eléctrica," *Criterio Libr.*, vol. 8, pp. 105–112, 2008.
- [20] K. L. Khatri, A. R. Muhammad, S. A. Soomro, N. A. Tunio, and M. M. Ali, "Investigation of possible solid waste power potential for distributed generation development to overcome the power crises of Karachi city," *Renew. Sustain. Energy Rev.*, vol. 143, no. March, 2021.
- [21] J. Carlos, C. Galeano, and G. L. Tiria, "Importancia del Mantenimiento de Cambiadores Bajo Carga," pp. 1–8.
- [22] A. Granero, "Cambiadores de tomas bajo carga (OLTC) para Transformadores," pp. 1–16, 2016.
- [23] A. Jain, T. Tewari, A. Das, S. Anand, and A. Mohapatra, "Coordinated Voltage Control in LV Distribution Systems using OLTC and BESS," *2018 20th Natl. Power Syst. Conf. NPSC 2018*, pp.

- 1–6, 2018.
- [24] N. Tshivhase, A. N. Hasan, and T. Shongwe, “A Fault Level-Based System to Control Voltage and Enhance Power Factor through an On-Load Tap Changer and Distributed Generators,” *IEEE Access*, vol. 9, pp. 34023–34039, 2021.
- [25] S. P. S. Matos, M. C. Vargas, L. G. V. Fracalossi, L. F. Encarnação, and O. E. Batista, “Protection philosophy for distribution grids with high penetration of distributed generation ☆,” *Electr. Power Syst. Res.*, vol. 196, no. March, 2021.
- [26] C. Zeng, X. Liu, W. Fu, H. Miao, and Y. Liu, “Power flow analysis of distribution network containing distributed generation based on sequence operation,” *POWERCON 2014 - 2014 Int. Conf. Power Syst. Technol. Towar. Green, Effic. Smart Power Syst. Proc.*, no. Powercon, pp. 2580–2584, 2014.
- [27] A. Elrayyah and N. K. Singh, “Autonomous Control Strategy for Reliable OLTC Operation under PV Power Fluctuation with Effective Voltage Regulation,” *ECCE 2020 - IEEE Energy Convers. Congr. Expo.*, pp. 2766–2772, 2020.
- [28] I. Kulaev and Y. Kubarkov, “Regulation of voltage and optimization of power losses in active-adaptive networks,” *Proc. - 2018 Int. Conf. Ind. Eng. Appl. Manuf. ICIEAM 2018*, pp. 1–4, 2018.
- [29] W. Moondee and W. Srirattanawichaikul, “Study of Coordinated Reactive Power Control for Distribution Grid Voltage Regulation with Photovoltaic Systems,” *2019 IEEE PES GTD Gd. Int. Conf. Expo. Asia, GTD Asia 2019*, pp. 136–141, 2019.
- [30] K. Fukushima, T. Nayuki, H. Hatta, and H. Kobayashi, “Voltage Regulation in Low-Voltage Distribution Grids with Reactive Power Control by Power Conditioning Subsystem Coordination,” *SEST 2019 - 2nd Int. Conf. Smart Energy Syst. Technol.*, pp. 1–5, 2019.
- [31] J. F. Mora, *Circuitos eléctricos*. .
- [32] 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.
- [33] E. Fiorucci, “The measurement of actual apparent power and actual reactive power from the instantaneous power signals in single-phase and three-phase systems,” *Electr. Power Syst. Res.*, vol. 121, pp. 227–242, 2015.
- [34] M. H. Qian, Y. Z. Liu, N. Chen, L. Z. Zhu, D. W. Zhao, and D. J. Jiang, “A static reactive power coordination control strategy of solar PV plant considering voltage and power factor,” *IET Conf. Publ.*, vol. 2015, no. CP679, 2015.
- [35] J. T. Putra, Sarjiya, and M. Isnaeni BS, “Impact of high penetration of Photovoltaic Generation on voltage fluctuation of transmission and distribution systems,” *ICITACEE 2015 - 2nd Int. Conf. Inf. Technol. Comput. Electr. Eng. Green Technol. Strength. Inf. Technol. Electr. Comput. Eng. Implementation, Proc.*, pp. 333–336, 2016.
- [36] P. Pachanapan, “The control of

- large scale grid-tied photovoltaic rooftop systems to avoid the power factor charge,” *Proc. 2019 Int. Conf. Power, Energy Innov. ICPEI 2019*, no. Icpei, pp. 24–27, 2019.
- [37] N. Daratha, B. Das, and J. Sharma, “Coordination between OLTC and SVC for voltage regulation in unbalanced distribution system distributed generation,” *IEEE Trans. Power Syst.*, vol. 29, no. 1, pp. 289–299, 2014.
- [38] T. T. Ku, C. H. Lin, C. S. Chen, and C. T. Hsu, “Coordination of transformer on-load tap changer and pv smart inverters for voltage control of distribution feeders,” *IEEE Trans. Ind. Appl.*, vol. 55, no. 1, pp. 256–264, 2019.
- [39] L. Jiang and K. M. Smedley, “Volt/VAR Control with DERs, LTCs, and Switched Capacitors: Case Study with a Commercial Distribution System,” *2019 IEEE PES Innov. Smart Grid Technol. Asia, ISGT 2019*, pp. 1330–1334, 2019.
- [40] Q. Xie, X. Shentu, X. Wu, Y. Ding, Y. Hua, and J. Cui, “Coordinated voltage regulation by on-load tap changer operation and demand response based on voltage ranking search algorithm,” *Energies*, vol. 12, no. 10, 2019.
- [41] J. Liu *et al.*, “An OLTC-inverter coordinated voltage regulation method for distribution network with high penetration of PV generations,” *Int. J. Electr. Power Energy Syst.*, vol. 113, no. June, pp. 991–1001, 2019.
- [42] 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.
- [43] D. de la agencia de regulación y control de energía y recursos naturales no Renovables, “REGULACIÓN No. ARCERNNR-002/20.” p. 35, 2020.

7.1 Matriz de Estado de Arte

Tabla 14. Matriz de Estado del Arte

CONTROL DEL PERFIL DE VOLTAJE Y MEJORA DEL FACTOR DE POTENCIA COORDINANDO GENERADORES DISTRIBUIDOS CON UN CAMBIADOR DE TOMAS BAJO CARGA EN UN SISTEMA DE DISTRIBUCIÓN																						
ITEM	AÑO	TÍTULO DEL ARTÍCULO	CITAS	TEMÁTICA						FORMULACIÓN DEL PROBLEMA				RESTRICCIONES DEL PROBLEMA		PROPUESTA PARA RESOLVER EL PROBLEMA		SOLUCIÓN PROPUESTA				
				Generación Distribuida	Cambiador de Tomas Bajo Carga OLTC	Afectación a la Calidad del Sistema de Distribución	Regulación de Voltaje	Generalidades del Factor de Potencia	Coordinación de Generadores	Mejoramiento de Perfil de Voltaje	Mejoramiento del Factor de Potencia	Algoritmo del Sistema de Control	Operatividad del Cambiador de Tomas Bajo Carga	Variación de Potencia Reactiva en los Generadores Distribuidos	Restricción de Niveles de Voltaje	Restricción en la Importación y Exportación de Potencia Reactiva	Restricción de Capacidad de Generación	Coordinación de Generadores Distribuidos y el Cambiador de Tomas Bajo Carga	Control de la Regulación de Voltaje	Corrección del Factor de Potencia	Determinación de la Posición del Tap	Aporte de la Generación Distribuida a la Red
1	2014	Transformer voltage regulation - Compact expression dependent on tap position and primary/secondary voltage	18		☒		☒				☒			☒				☒				☒
2	2018	Voltage Control of Distribution Systems Using Electronic OLTC	2	☒	☒		☒				☒		☒					☒	☒		☒	☒
3	2015	Power demand forecasting using stochastic model: Parameter estimation	2			☒																
4	2010	A method for voltage regulation in distribution network equipped with OLTC transformers and DG units	4	☒	☒	☒	☒		☒	☒		☒	☒			☒	☒	☒	☒		☒	☒
5	2017	PV generation in distribution network and its impact on power transformer on-load tap changer operation	3	☒	☒		☒			☒			☒					☒	☒		☒	☒
6	2020	A Novel Voltage Regulation Scheme for Active Distribution Grid	1	☒		☒	☒		☒	☒		☒	☒		☒	☒	☒	☒			☒	☒
7	2020	Voltage reduction in medium voltage distribution systems using constant power factor control of PV PCS	18	☒		☒	☒	☒		☒	☒			☒		☒			☒			
8	2014	Analysis of OLTC behaviour in a wind power integrated distribution system,	1	☒	☒	☒	☒		☒	☒		☒	☒	☒	☒		☒	☒		☒	☒	☒

CONTROL DEL PERFIL DE VOLTAJE Y MEJORA DEL FACTOR DE POTENCIA COORDINANDO GENERADORES DISTRIBUIDOS CON UN CAMBIADOR DE TOMAS BAJO CARGA EN UN SISTEMA DE DISTRIBUCIÓN

DATOS		TEMÁTICA							FORMULACIÓN DEL PROBLEMA					RESTRICCIONES DEL PROBLEMA		PROPUESTA PARA RESOLVER EL PROBLEMA			SOLUCIÓN PROPUESTA							
ITEM	AÑO	TÍTULO DEL ARTÍCULO	CITAS	Generación Distribuida	Cambiador de Tomas Bajo Carga OLTC	Afectación a la Calidad del Sistema de Distribución	Regulación de Voltaje	Generalidades del Factor de Potencia	Coordinación de Generadores	Mejoramiento de Perfil de Voltaje	Mejoramiento del Factor de Potencia	Algoritmo del Sistema de Control	Operatividad del Cambiador de Tomas Bajo Carga	Variación de Potencia Reactiva en los Generadores Distribuidos	Restricción de Niveles de Voltaje	Restricción en la Importación y Exportación de Potencia Reactiva	Restricción de Capacidad de Generación	Coordinación de Generadores Distribuidos y el Cambiador de Tomas Bajo Carga	Control de la Regulación de Voltaje	Corrección del Factor de Potencia	Determinación de la Posición del Tap	Aporte de la Generación Distribuida a la Red	Aplicación de un Sistema de Control entre GDS y OLTC	Importación y Exportación de Potencia Reactiva de los Generadores Distribuidos	Mejoramiento del Voltaje Promedio de la Red	
9	2021	A Cooperation between OLTC and Local Controls of Photovoltaic Inverter for Enhancing the Hosting Capacity of Typical Distribution System in Thailand	1	☒	☒	☒	☒	☒	☒	☒	☒	☒	☒	☒	☒			☒	☒		☒	☒	☒	☒	☒	☒
10	2019	Voltage regulation system for OLTC in distribution power systems with high penetration level of embedded generation	7	☒	☒	☒	☒	☒	☒	☒		☒	☒		☒		☒	☒	☒		☒	☒	☒			☒
11	2007	Guía Básica de la Generación Distribuida.	0	☒																		☒				
12	2013	Distributed Energy Resources and Microgrids Modelling	0	☒			☒		☒																	
13	2003	Generación eléctrica distribuida	0	☒																		☒				
14	2019	Ubicación y dimensionamiento de generación distribuida: una revisión TT - Location and sizing of distributed generation: a review	1	☒			☒		☒						☒		☒					☒				
15	2021	A. de R. y C. de E. y R. N. N. Renovables, "REGULACIÓN Nro. ARCERNR-001/2021," pp. 1–39, 2021.	0	☒																		☒				
16	2020	Como Forma De Acceder Al Autoconsumo Eléctrico a.	0	☒																		☒				
17	2019	Operation and control of a microgrid in isolated mode with multiple distributed generation systems	1	☒			☒		☒	☒									☒			☒				
18	2015	Study of scope and effects of isolated small distributed generation sources and their integration with existing system	1	☒		☒			☒								☒					☒				

CONTROL DEL PERFIL DE VOLTAJE Y MEJORA DEL FACTOR DE POTENCIA COORDINANDO GENERADORES DISTRIBUIDOS CON UN CAMBIADOR DE TOMAS BAJO CARGA EN UN SISTEMA DE DISTRIBUCIÓN

DATOS		TEMÁTICA						FORMULACIÓN DEL PROBLEMA				RESTRICCIONES DEL PROBLEMA			PROPUESTA PARA RESOLVER EL PROBLEMA			SOLUCIÓN PROPUESTA							
ITEM	AÑO	TÍTULO DEL ARTÍCULO	CITAS	Generación Distribuida	Cambiador de Tomas Bajo Carga OLTC	Afectación a la Calidad del Sistema de Distribución	Regulación de Voltaje	Generalidades del Factor de Potencia	Coordinación de Generadores	Mejoramiento de Perfil de Voltaje	Mejoramiento del Factor de Potencia	Algoritmo del Sistema de Control	Operatividad del Cambiador de Tomas Bajo Carga	Variación de Potencia Reactiva en los Generadores Distribuidos	Restricción de Niveles de Voltaje	Restricción en la Importación y Exportación de Potencia Reactiva	Restricción de Capacidad de Generación	Coordinación de Generadores Distribuidos y el Cambiador de Tomas Bajo Carga	Control de la Regulación de Voltaje	Corrección del Factor de Potencia	Determinación de la Posición del Tap	Aporte de la Generación Distribuida a la Red	Aplicación de un Sistema de Control entre GDS y OLTC	Importación y Exportación de Potencia Reactiva de los Generadores Distribuidos	Mejoramiento del Voltaje Promedio de la Red
29	2019	Study of Coordinated Reactive Power Control for Distribution Grid Voltage Regulation with Photovoltaic Systems	3	☒			☒	☒	☒	☒	☒	☒		☒	☒	☒			☒	☒		☒		☒	☒
30	2019	Voltage Regulation in Low-Voltage Distribution Grids with Reactive Power Control by Power Conditioning Subsystem Coordination	1				☒	☒	☒	☒	☒			☒	☒	☒			☒	☒		☒		☒	☒
31	2015	Circuitos eléctricos.	0					☒												☒					
32	2018	Optimal reactive power compensation in electrical distribution systems with distributed resources. Review	32	☒			☒	☒	☒	☒	☒			☒	☒	☒			☒	☒		☒		☒	☒
33	2018	The measurement of actual apparent power and actual reactive power from the instantaneous power signals in single-phase and three-phase systems	23					☒												☒					
34	2015	A static reactive power coordination control strategy of solar PV plant considering voltage and power factor	1	☒	☒	☒	☒	☒	☒	☒	☒			☒	☒	☒			☒	☒		☒		☒	☒
35	2016	Impact of high penetration of Photovoltaic Generation on voltage fluctuation of transmission and distribution systems	5	☒	☒										☒		☒								
36	2019	The control of large scale grid-tied photovoltaic rooftop systems to avoid the power factor charge	1	☒		☒	☒	☒		☒	☒			☒	☒	☒			☒	☒		☒			
37	2014	Coordination between OLTC and SVC for voltage regulation in unbalanced distribution system distributed generation	135	☒	☒	☒	☒																		
38	2019	Coordination of transformer on-load tap changer and pv smart inverters for voltage control of distribution feeders	17	☒	☒	☒	☒	☒	☒	☒	☒		☒	☒	☒	☒		☒	☒	☒	☒		☒	☒	

CONTROL DEL PERFIL DE VOLTAJE Y MEJORA DEL FACTOR DE POTENCIA COORDINANDO GENERADORES DISTRIBUIDOS CON UN CAMBIADOR DE TOMAS BAJO CARGA EN UN SISTEMA DE DISTRIBUCIÓN

ITEM	AÑO	TÍTULO DEL ARTÍCULO	CITAS	TEMÁTICA							FORMULACIÓN DEL PROBLEMA				RESTRICCIONES DEL PROBLEMA			PROPUESTA PARA RESOLVER EL PROBLEMA				SOLUCIÓN PROPUESTA			
				Generación Distribuida	Cambiador de Tomas Bajo Carga OLTC	Afectación a la Calidad del Sistema de Distribución	Regulación de Voltaje	Generalidades del Factor de Potencia	Coordinación de Generadores	Mejoramiento de Perfil de Voltaje	Mejoramiento del Factor de Potencia	Algoritmo del Sistema de Control	Operatividad del Cambiador de Tomas Bajo Carga	Variación de Potencia Reactiva en los Generadores Distribuidos	Restricción de Niveles de Voltaje	Restricción en la Importación y Exportación de Potencia Reactiva	Restricción de Capacidad de Generación	Coordinación de Generadores Distribuidos y el Cambiador de Tomas Bajo Carga	Control de la Regulación de Voltaje	Corrección del Factor de Potencia	Determinación de la Posición del Tap	Aporte de la Generación Distribuida a la Red	Aplicación de un Sistema de Control entre GDS y OLTC	Importación y Exportación de Potencia Reactiva de los Generadores Distribuidos	Mejoramiento del Voltaje Promedio de la Red
39	2019	Volt/VAR Control with DERs, LTCs, and Switched Capacitors: Case Study with a Commercial Distribution System	3	☒			☒				☒	☒			☒	☒	☒			☒		☒			
40	2019	Coordinated voltage regulation by on-load tap changer operation and demand response based on voltage ranking search algorithm	11		☒		☒				☒		☒	☒						☒		☒			
41	2019	An OLTC-inverter coordinated voltage regulation method for distribution network with high penetration of PV generations	20	☒	☒		☒			☒	☒	☒		☒		☒				☒		☒	☒		
42	2018	A real-time optimal coordination scheme for the voltage regulation of a distribution network including an OLTC, capacitor banks, and multiple distributed energy resources	85	☒	☒					☒	☒	☒	☒	☒	☒	☒	☒	☒			☒	☒	☒		
43	2020	REGULACIÓN No. ARCERNR-002/20." p. 35, 2020	0			☒								☒											
CANTIDAD:				34	17	18	30	10	16	27	13	17	16	13	23	13	18	11	23	13	16	26	10	12	19

7.2 Resumen de Indicadores

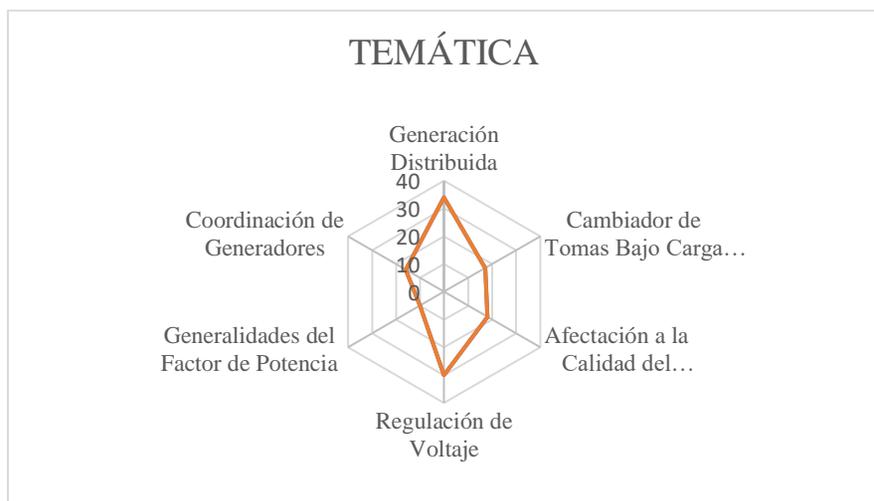


Figura 22. Resumen e Indicador de la Temática - Estado del Arte

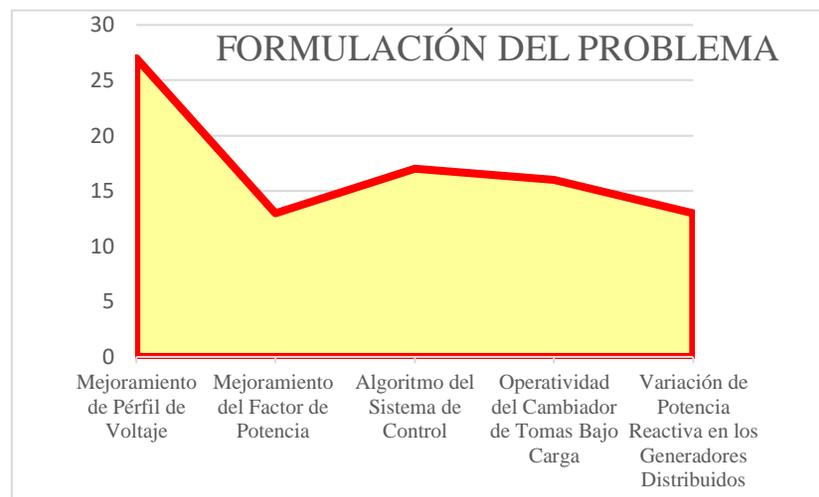


Figura 23. Indicador de formulación del problema - Estado del Arte

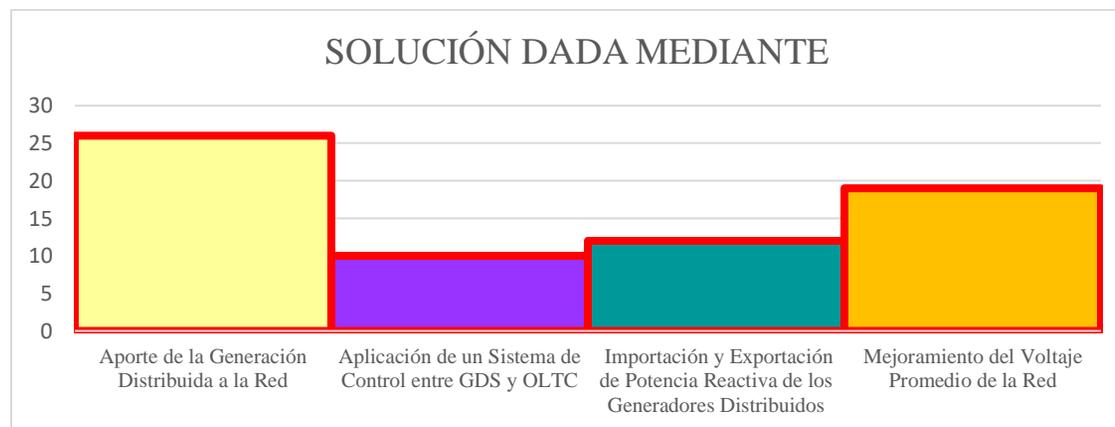


Figura 24. Indicador de solución - Estado del Arte.