



UNIVERSIDAD TÉCNICA DE COTOPAXI

DIRECCIÓN DE POSGRADO

MAESTRÍA EN ELECTRICIDAD

MODALIDAD: INFORME DE INVESTIGACIÓN

Título:

Sintonización de los parámetros de un D-Statcom para la estabilidad de voltaje con presencia de generación distribuida.

Trabajo de titulación previo a la obtención del título de Magister en Electricidad
mención Sistemas Eléctricos de Potencia

Autor:

Ing. Holguer Vinicio Yugla Lema

Tutor:

Ing. Quinatoa Caiza Carlos Iván MSc.

LATACUNGA –ECUADOR

2025

APROBACIÓN DEL TUTOR

En mi calidad de Tutor del Trabajo de Titulación **“Sintonización de los parámetros de un D-Statcom para la estabilidad de voltaje con presencia de generación distribuida”** presentado por el Ing. Holguer Vinicio Yugla Lema para optar por el título magíster en Electricidad mención Sistemas Eléctricos de Potencia.

CERTIFICO

Que dicho trabajo de investigación ha sido revisado en todas sus partes y se considera que reúne los requisitos y méritos suficientes para ser sometido a la presentación para la valoración por parte del Tribunal de Lectores que se designe y su exposición y defensa pública.

Latacunga, marzo 2025



MSc. Carlos Iván Quinatoa Caiza

CC. 0503287864

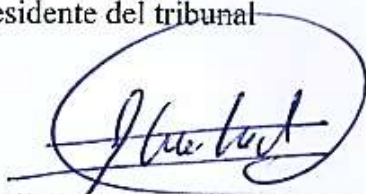
APROBACIÓN DEL TRIBUNAL

El trabajo de Titulación: “Sintonización de los parámetros de un D-Statcom para la estabilidad de voltaje con presencia de generación distribuida”, ha sido revisado, aprobado y autorizado su impresión y empastado, previo a la obtención del título de magíster en Electricidad mención sistemas eléctricos de potencia; el presente trabajo reúne los requisitos de fondo y forma para que el estudiante pueda presentarse a la exposición y defensa.

Latacunga, marzo 2025



.....
MSc. Ing. Mauricio Eduardo Mullo Pallo
CC:0503755183
Presidente del tribunal



.....
MSc. Ing. Marco Anibal León Segovia
CC: 0502305402
Lector 2



.....
MSc. Ing. Jessica Nataly Castillo Fiallos
CC:0604590216
Lector 3

DEDICATORIA

Gracias a Dios por haberme guiado durante el desarrollo
del presente proyecto y de manera incondicional a mi
esposa e hijos por todo el apoyo
brindado para poder concluir
con mi trabajo de titulación
Ing. Holguer Vinicio Yugla Lema

AGRADECIMIENTO

Gracias a Dios por haberme guiado durante el desarrollo
del presente proyecto y de manera incondicional a mi
esposa e hijos por todo el apoyo
brindado para poder concluir
con mi trabajo de titulación
Ing. Holguer Vinicio Yugla Lema

RESPONSABILIDAD DE AUTORÍA

Quien suscribe, declara que asume la autoría de los contenidos y los resultados obtenidos en el presente Trabajo de Titulación.

Latacunga, marzo 2025



Ing. Holguer Vinicio Yugla Lema

CC: 0503074437

RENUNCIA DE DERECHOS

Quien suscribe, cede los derechos de autoría intelectual total y/o parcial del presente trabajo de titulación a la Universidad Técnica de Cotopaxi.

Latacunga, marzo 2025



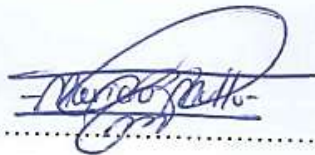
Ing. Holguer Vinicio Yugla Lema

CC: 0503074437

AVAL DEL PRESIDENTE

Quien suscribe, declara que el presente Trabajo de Titulación: Sintonización de los parámetros de un D-Statcom para la estabilidad de voltaje con presencia de generación distribuida, contiene las correcciones a las observaciones realizadas por los lectores en sesión científica del tribunal.

Latacunga, marzo 2025



MSc. Ing. Mauricio Eduardo Mullo Pallo

CC:0503755183

UNIVERSIDAD TÉCNICA DE COTOPAXI
DIRECCIÓN DE POSGRADO

MAESTRÍA EN ELECTRICIDAD
MENCIÓN SISTEMAS ELÉCTRICOS DE POTENCIA

Título: Sintonización de los parámetros de un D-Statcom para la estabilidad de voltaje con presencia de generación distribuida

Autor: Yugla Lema Holguer Vinicio, Ing.

Tutor: Quinatoa Caiza Carlos Iván, M.Sc.

RESUMEN

La presente investigación propone la sintonización de un controlador para un compensador síncrono estático de distribución D-STATCOM con el fin de mejorar los perfiles de voltaje en estado estacionario y estado dinámico para una red eléctrica de distribución con presencia de generación distribuida. En este estudio se desarrolla una metodología empleando de manera conjunta el software de simulación Power Factory-DigSILENT (DSL) y la programación en el entorno de Python 3.6, para el estudio, se selecciona la red de prueba IEEE de 13 nodos, que es una red de distribución desbalanceada y para el proceso de optimización requerido en la metodología, se utiliza el algoritmo de optimización heurística de mapeo de varianza media (MVMO), en el caso de la ubicación del dispositivo FACT en la red de prueba, se selecciona la barra con mayor concentración de carga, no se aborda la ubicación óptima del dispositivo de acuerdo algún criterio específico. Este trabajo se enfoca en la importancia del uso de técnicas de optimización en la sintonización de los parámetros que contiene el controlador de un D-STATCOM, lo que permite determinar de manera eficiente escenarios de operación con regulación de voltaje que cumplen con los límites operativos establecidos por la normativa nacional, haciendo un uso adecuado de la compensación de potencia reactiva en la operación de una red eléctrica.

PALABRAS CLAVE: Perfil de voltaje, DSTATCOM, cargas dinámicas, generación distribuida, PowerFactory (DSL), control automático.

**UNIVERSIDAD TÉCNICA DE COTOPAXI
DIRECCIÓN DE POSGRADO**

**MAESTRÍA EN ELECTRICIDAD
MENCIÓN SISTEMAS ELÉCTRICOS DE POTENCIA**

Title: Tuning of the parameters of a D-Statcom for voltage stability with presence of distributed generation

Author: Yugla Lema Holguer Vinicio, Ing.

Tutor: Quinatoa Caiza Carlos Iván, M.Sc.

ABSTRACT

This research proposes a controller tuning for a D-STATCOM distribution static synchronous compensator in order to improve the steady-state and dynamic state voltage profiles for a distribution network with the presence of distributed generation. In this study, a methodology is developed using the Power Factory-DigSILENT (DSL) simulation software and programming in the Python 3.6 environment, for the study, the IEEE 13-node test network is selected, which is an unbalanced distribution network and for the optimization process required in the methodology, the mean variance mapping heuristic optimization algorithm (MVMHO) is used, in the case of the location of the FACT device in the test network, the bus with the highest load concentration is selected, the optimal location of the device according to any criterion is not addressed. This work focuses on the importance of using optimization techniques in the tuning of the parameters contained in a D-STATCOM controller, which allows to efficiently determine operating scenarios with voltage regulation that comply with the operating limits established by national regulations, making appropriate use of reactive power compensation in the operation of an electrical network.

KEY WORDS: Voltage profile, DSTATCOM, Dynamic loads, Distributed generation, PowerFactory (DSL), Automatic control.

AVAL DE TRADUCCIÓN

Yo Lcda. Lidia Rebeca Yugla Lema, con cédula de identidad número 0502652340, licenciada en Ciencia de la Educación mención Inglés con número de registro de la SENESCYT 1020-07-747861; CERTIFICO haber revisado y aprobado la traducción al idioma Inglés del resumen del trabajo de investigación con el título: SINTONIZACIÓN DE LOS PARÁMETROS DE UN D-STATCOM PARA LA ESTABILIDAD DE VOLTAJE CON PRESENCIA DE GENERACIÓN DISTRIBUIDA, de Ing. Holguer Vinicio Yugla Lema aspirante a magister en Electricidad mención Sistemas Eléctricos de Potencia.

Latacunga, marzo 2025



Mg. Lidia Rebeca Yugla Lema
CC: 0502652340

ÍNDICE DE CONTENIDOS

1. INFORMACIÓN GENERAL -----	1
2. INTRODUCCIÓN -----	1
3. MATERIALES Y MÉTODOS -----	4
3.1 Descripción general -----	4
3.2 Dstatcom -----	5
3.3 Modelo del statcom en DIgSiLent -----	6
4. METODOLOGÍA -----	7
4.1 Modelo de la red -----	7
4.2 Planteamiento del problema de optimización -----	9
4.3 Casos de simulaciones -----	10
5. SIMULACIÓN Y RESULTADOS -----	12
5.1 Caso 1: Incremento de carga en la red de distribución -----	13
5.2 Caso 2: Falla Trifásica en una línea de distribución -----	16
6. CONCLUSIONES -----	19
7. REFERENCIAS -----	20

ÍNDICE DE FIGURAS

FIGURA 1. Diseño de DSTATCOM implementado en la red de 13 Nodos de la IEEE -----	5
FIGURA 2. Modelo Básico del dstatcom -----	6
FIGURA 3. Modelo “STATCOM-Controller” en librería de PowerFactory -----	7
FIGURA 4. Respuesta del controlador PI y respuesta dinámica sin la sintonización -----	9
FIGURA 5. Metodología de sintonización dstatcom -----	12

FIGURA 6. Comportamiento dinámico e inyección de reactivos con evento de incremento de carga en cascada, con y sin dstatcom, nodo de incidencia 632 ---	13
FIGURA 7. Comportamiento dinámico del voltaje de todos los nodos de la red de prueba, caso 1 -----	15
FIGURA 8. Grafica de la respuesta del perfil de voltaje SS y CS en nodos de 13 barras de la IEEE, fase A, B, C, caso 1 -----	16
FIGURA 9. Comportamiento dinámico del voltaje e inyección de reactivos con evento de cortocircuito, con y sin dstatcom, nodo de incidencia 632-----	17
FIGURA 10. Comportamiento dinámico del voltaje de todos los nodos de la red de prueba, caso 2 -----	18
FIGURA 11. Grafica de la respuesta del perfil de voltaje SS y CS en nodos de 13 barras de la IEEE, fase A, B, C, caso 2 -----	19

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1. Voltajes máximos y mínimos para los tres escenarios sin considerar el aporte del dstatcom -----	14
Tabla 2. Voltajes máximos y mínimos para los tres escenarios considerando el aporte del dstatcom -----	14
Tabla 3. Voltajes máximos y mínimos del voltaje en simulación RMS con y sin presencia del dstatcom -----	17

1. INFORMACIÓN GENERAL

Título del Proyecto:	Sintonización de los parámetros de un D-Statcom para la estabilidad de voltaje con presencia de generación distribuida
Línea de investigación:	Energías alternativas y renovables, eficiencia energética y protección ambiental.
Proyecto de investigación asociado:	Desarrollo de sistemas eficientes para el abastecimiento y uso de energía eléctrica a nivel local, regional o nacional.
Grupo de Investigación:	Sistemas Eléctricos de Potencia
Red nacional o internacional:	Instituto de Ingenieros Eléctricos y Electrónicos (IEEE)

2. INTRODUCCIÓN

El desarrollo de la tecnología ha generado cambios sustanciales en las comunicaciones, aportando con grandes beneficios, dando lugar a requerimientos a ser atendidos en el mundo de las redes de distribución energética para hacer frente a las grandes variaciones que sufren, así como al ingreso de las demandas de los consumidores y de la generación distribuida. Las redes se encuentran independientes con sus formas de construcción, por lo cual, su modificación total y parcial es mucho más complicada en función del tiempo y el costo de generación, en este caso el uso de un compensador estático es adecuado, el mismo que permite proporcionar energía reactiva de acción rápida en redes de transmisión eléctrica de alto voltaje [1]. Sin embargo, los mayores retos que enfrenta la ingeniería en el ámbito eléctrico es el tema de la calidad de energía, el cual se compone de tareas como la corrección del factor de potencia, filtrados de armónicos en una red, estabilidad de voltaje, puesta a tierra, entre otros. El objetivo final es brindar al usuario una señal de energía limpia y segura para su proceso. Cuando en una red industrial se omiten estos conceptos, el sistema se encuentra propenso a tener problemas de inestabilidad de voltaje, disparos innecesarios, etc. Los dispositivos

más avanzados para la compensación de fallas en las redes de distribución son los dispositivos activos, la cual aprovecha de la electrónica de potencia y las técnicas de procesamiento de señales digitales, ofreciendo soluciones más eficientes. El compensador estático de distribución DSTATCOM constituye un dispositivo importante para optimizar la calidad de la energía en un sistema de distribución o transmisión; el presente trabajo tiene como propósito principal alcanzar la estabilidad de voltaje con presencia de generación distribuida a través de la sintonización de los parámetros de un DSTATCOM que fundamentalmente cumple una función como fuente de energía reactiva que ayuda a equilibrar los voltajes en diferentes nodos de la red de distribución proporcionando energía real o reactiva [2]. En el presente estudio, a través de la utilización de un DSTATCOM se pretende controlar el flujo de corriente desde la fuente hasta la carga, para garantizar que se mantenga el perfil de voltaje deseado, el compensador utiliza un inversor modulado por ancho de pulso [3], es factible la aplicación de DSTATCOM porque conjuntamente con fuentes de energía renovable (solar, eólica o hidroeléctrica) puede ser beneficiosa en términos de operación e inclusive, ahorro de costos de facturación eléctrica.

Cuando existe la presencia de generación distribuida en una red eléctrica, en este caso energías renovables como centrales fotovoltaicas o eólicas, estas centrales generan potencia activa, pero no pueden ser capaces de suministrar potencia reactiva a la red en todo momento, siendo un problema para mantener los niveles adecuados de voltaje cuando se presente incrementos en la demanda o en condiciones de falla. Mediante el dispositivo FACT, en este caso el D-STATCOM, es posible proporcionar potencia reactiva en tiempo real, ajustando el voltaje de la red y manteniendo los niveles de voltaje dentro de la banda permitida para operación de la red [4].

El tiempo de respuesta y la eficacia del D-STATCOM para la regulación de voltaje en condiciones dinámicas de la red de distribución con presencia de generación distribuida, está definido por los parámetros ajustados en el controlador del equipo, los cuales pueden ser determinados con varias simulaciones para un evento en análisis [5]. Los múltiples eventos de falla o incrementos de carga que puede

presentarse en la operación de sistema de distribución, vuelven complejos la determinación de los parámetros de los controladores del equipo, siendo necesario el uso de técnicas avanzadas en simulación.

Para el desarrollo de este estudio, se propone una metodología para sintonizar los parámetros del DSTATCOM para eventos de falla e incrementos de carga súbita que podría experimentar la operación de una red de distribución [6] [7], para el estudio se ha seleccionado el modelo estándar IEEE de 13 nodos, mismo que corresponde a un sistema desequilibrado, cuya característica es contar con dos transformadores de distribución trifásicos, un banco de condensadores de conexión trifásica y uno monofásico. Con la ayuda del Software Digsilent Power Factory y mediante los diagramas de bloques, a través del lenguaje de programación DSL se emplea un modelo genérico de controlador para el FACT y se evalúa la eficacia del controlador ante diferentes eventos.

La determinación de los parámetros más adecuados para el controlador se puede modelar mediante una función objetivo con restricciones, la misma que puede ser resuelta con un método matemático de optimización, debido a la complejidad de las ecuaciones que estarían involucradas en el modelo, se hace necesario el uso de técnicas heurísticas. De acuerdo a la literatura, para resolver problemas matemáticos enfocados a ingeniería eléctrica, se han usado distintos métodos como: algoritmos genéticos, PSO, redes neuronales, sin embargo, motivado por los resultados en aplicaciones para sistemas de potencia, se selecciona el algoritmo de optimización heurística de mapeo de varianza media (MVMO), el mismo que ya ha sido desarrollado en software libre como es el entorno de Python y puede ser empleado para resolver problemas de optimización complejos. En ese sentido, se propone el uso de la librería MVMO.py para sintonizar el controlador del DSTATCOM, [8] [9] [10].

Por último, debido a los diferentes modos de control que contiene el equipo como es: control de voltaje de bucle cerrado, control de potencia reactiva, corrección de factor potencia, entre otros, para el estudio se ha seleccionado el modo de control de voltaje para el FACT [11] [12]. De modo que el equipo varía la inyección de potencia reactiva a la red, con el objetivo de mantener el voltaje en el punto de

conexión dentro de la banda permitida por la normativa [13], para condiciones de contingencia y estado estacionario. El desarrollo del presente artículo de investigación comprende en tres partes: metodología, simulación y evaluación de resultados y conclusiones.

3. MATERIALES Y MÉTODOS

3.1 Descripción general

La finalidad es realizar dos estudios de casos de simulación, los mismos que pueden presentarse en el sistema de redes de distribución, evento en el que se producen variaciones de voltaje en la red de 13 nodos de la IEEE, sistema que dispone de líneas aéreas y subterráneas con diferentes tipos de configuraciones de las fases. En varias simulaciones se evalúa la sintonización del controlador para un DSTATCOM que cumple la función como fuente de energía reactiva que ayuda a equilibrar los voltajes en diferentes partes de la red de distribución proporcionando energía reactiva; bajo un aumento de carga constante en diferentes tiempos y cortocircuitos.

El diagrama del modelo de la red de 13 Nodos de la IEEE a implementar con el dispositivo DSTATCOM de distribución se ilustra en la figura 1, que desempeña un papel crucial en la gestión de la calidad de la energía eléctrica, proporcionando control dinámico de voltaje y potencia reactiva en sistemas eléctricos de potencia modernos.

El sistema eléctrico de 13 nodos está conformado por 1 generador, 13 líneas de transmisión y 7 cargas desbalanceado [14], el dispositivo de electrónica de potencia DSTATCOM implementado en la librería de PowerFactory 2021 SP2, generación distribuida y las contingencias ilustrada en la figura 1.

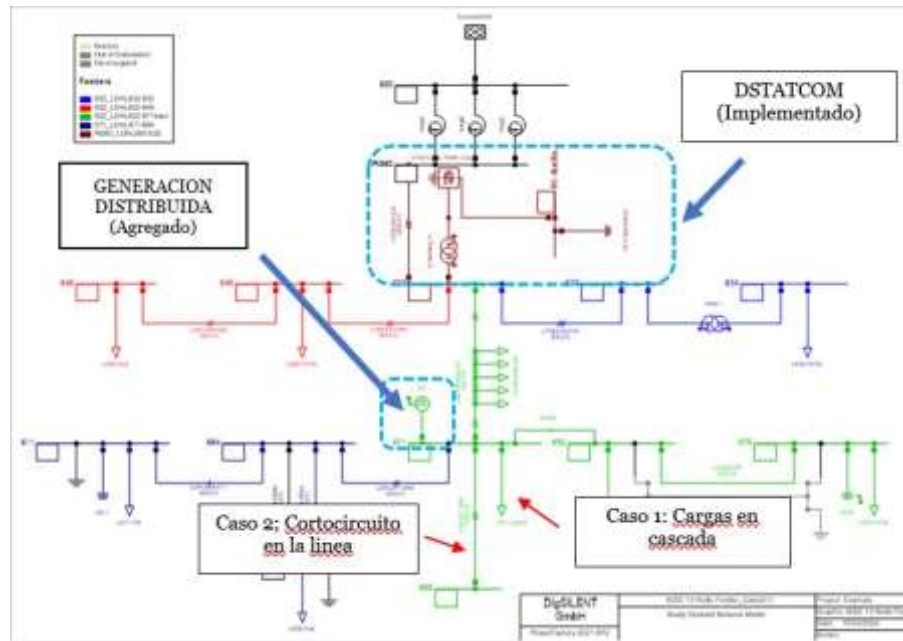


FIGURA 1. Diseño de DSTATCOM implementado en la red de 13 nodos de la IEEE

3.2 Dstatcom

Se ilustra en la figura 2, la conexión de un DSTATCOM que está conectado al bus del sistema de CA a través de un transformador de acoplamiento. En un DSTATCOM, la corriente de compensación máxima es independiente del voltaje del sistema, por lo que funciona a plena capacidad incluso a voltajes bajos. Las ventajas de un DSTATCOM incluyen control de voltaje flexible para mejorar la calidad de la energía, respuesta rápida y aplicabilidad para su uso con cargas fluctuantes altas. La salida del controlador QQ_C es controlable, lo que es proporcional a la diferencia de magnitud de voltaje ($V_C - V$) y viene dada por la siguiente ecuación (1); Voltaje de barra (V), Voltaje del DSTATCOM (V_C), reactancia del sistema(X) [15].

$$QQ_C = \frac{V(V_{CC}-V)}{X} \quad (1)$$

La estructura básica de un compensador síncrono estático o DSTATCOM se puede clasificar en dos tipos dependiendo del inversor, las del tipo de fuente de voltaje y fuente de corriente, en general es más utilizada la fuente de voltaje. En la figura 2, se ilustra un DSTATCOM con la estructura de fuente de voltaje, lo cual consta de la fuente de voltaje (un condensador electrolítico en la barra DC) [15].

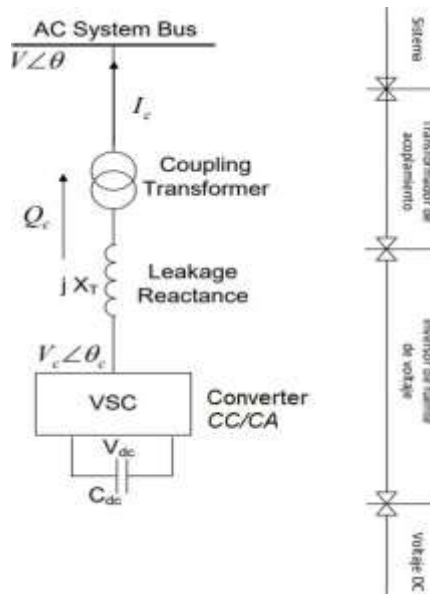


FIGURA 2. Modelo básico del STATCOM [15]

3.3 Modelo del STATCOM en DIgSiLent

Para modelar un STATCOM en DIgSILENT es necesario crear una barra en DC con un condensador y conectarlos al sistema a través de un inversor trifásico. El control del inversor es configurado con el modelo “STATCOM-Controller” ilustrado en la figura 3, que es parte de las librerías de DIgSILENT. Para la asociación del inversor. El modelo de control consta de dos reguladores de tensión: el primer regulador está dedicado a controlar el voltaje en DC a través del capacitor, y el segundo regulador tiene la función de controlar el voltaje en el lado AC [16].

El control de la corriente producida por el inversor para el control del voltaje del lado DC y AC se realiza con controladores proporcionales-integradores (bloques PI). Estos bloques PI constan de un integrador que tienen un tiempo de asentamiento determinado por los parámetros T_p y T_v , y una ganancia K_p o K_v que reduce el error cuando se logra el estado estacionario para el control de las barras DC y AC respectivamente [16] [17]. La variación o transición con la que se inyecta corriente reactiva capacitiva o inductiva respecto el voltaje se refleja con una ganancia determinada por el parámetro “droop”. Además, la medición de la corriente reactiva posee un retardo con una función de transferencia de primer orden el cual posee una constante de tiempo de 0,01 [18].

tipos dependiendo del inversor, las del tipo de fuente de voltaje y fuente de corriente; En general, es más utilizada la fuente de voltaje.

Para implementar el modelo dinámico del DSTATCOM en el software de simulación, se emplea un modelo genérico proveniente de las bases de Power Factory de Digsilent. El control del inversor es configurado con el nombre "STATCOM-Controller". Para la asociación del inversor, elementos de medición y el control se tiene un "Frame" que permite agrupar estos elementos con el fin de que el control actúe sobre el inversor seleccionado, los voltajes medidos y la potencia nominal actúen como entradas del controlador. El Frame asocia las corrientes de salida del controlador con el inversor para que genere la corriente necesaria y un PLL, se busca el sincronismo entre las tensiones de la barra y la generada por el inversor. Este modelo consta de dos reguladores de voltaje: el uno dedicado a controlar el voltaje en DC a través del capacitor, y otro que tiene la función de controlar el voltaje en el lado AC. El control de la corriente producida por el inversor para el control del voltaje del lado DC y AC se realiza con controladores proporcionales-integradores (bloques PI). Estos bloques PI constan de un integrador que tienen un tiempo de asentamiento determinado por los parámetros T_p y T_v , y una ganancia K_p o K_v que reduce el error cuando se logra el estado estacionario para el control de las barras DC y AC respectivamente [14] [15]. Con el controlador en funcionamiento, sin establecer la sintonización adecuado de los parámetros se presenta soluciones no aceptables como se presenta en figura 4.

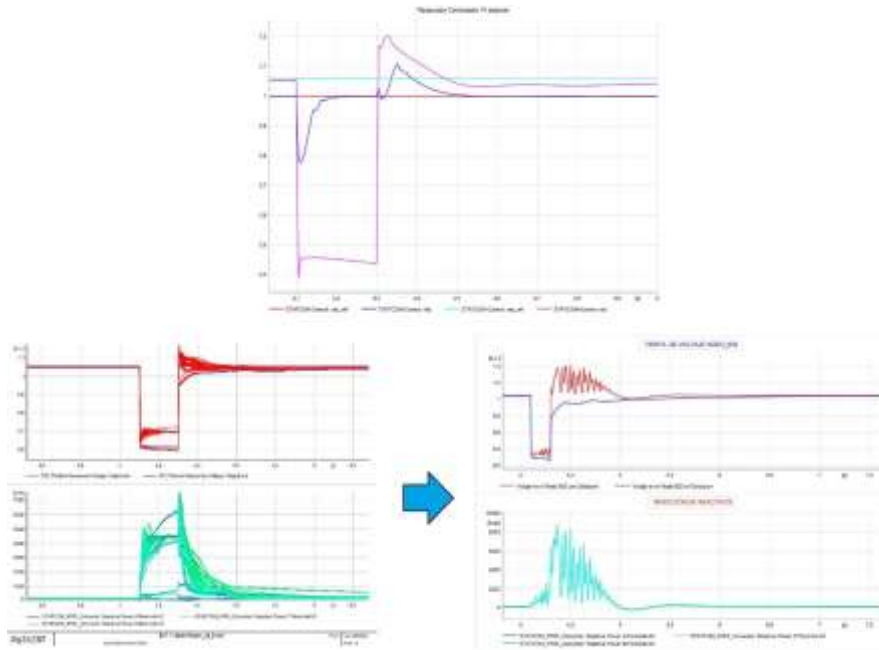


FIGURA 4. Respuesta del controlador PI y respuesta dinámica sin la sintonización

4.2 Planteamiento del problema de optimización

Una vez implementado el DSTATCOM en la red de distribución, con sus controladores para simulación dinámica, se presenta la necesidad de establecer un método para determinar los parámetros T_p , T_v , K_p , K_v , K_d , T_d , K_q , T_q que son parte de los controladores PI del dispositivo FACT. Considerando que se requiere regular voltaje en el punto de conexión, se plantea minimizar el error entre el voltaje de referencia del nodo de conexión y el voltaje de salida del D-STATCOM tanto para la componente DC como AC. En ese sentido, al considerar que el error va a estar presente por un periodo de tiempo, es necesario incluir en la formulación matemática la integral para un delta de tiempo, de esta manera el problema puede formularse, como se indica en (2).

$$OF = \int_0^T [\omega_{DC} \cdot (V_{DCref} - V_{DC})^2 + \omega_{AC} \cdot (V_{ACref} - V_{AC})^2] dt \quad (2)$$

Sujeto a las restricciones:

$$XX_{min} \leq XX \leq XX_{max} \quad (3)$$

Donde V_{AC} y V_{ACref} , corresponden a la señal eléctrica de salida y de referencia, ω_{DC} representa el factor de peso, T es el período de simulación, y X constituye el vector D -dimensional que contiene los valores de parámetros dinámicos sujeto a límites máximos y mínimos que pueden alcanzar en la simulación, el vector X , una vez culminado el proceso iterativo, proporciona la solución candidata. La función objetivo se define para la optimización que persigue una búsqueda multicriterio para encontrar la mejor X , la solución del problema implica reducir el error entre las señales de salida y las señales de referencia, cabe señalar que las restricciones no abarcan los límites operativos de voltaje todos los nodos y flujos en líneas de distribución, la solución se enfoca en cumplir un voltaje de referencia que está dentro de la banda permitida de operación para el punto de conexión [10] [16].

Para encontrar la solución al problema de optimización, se propone el uso del método heurístico de mapeo media varianza **MVMO**, el mismo que está desarrollado en software libre Python, en el cual, se debe ingresar la función objetivo y las restricciones lineales para el problema. Se define inicialmente los parámetros del optimizador y la ilustración inicial se genera de manera aleatoria, se ingresan los límites de restricciones lineales para ingresar por completo el problema. Debido a que es necesario ejecutar varias simulaciones RMS en Power Factory para extraer los valores de voltajes y posteriormente ingresar en el optimizador, es necesario desarrollar un script general en Python, que ejecute de manera automática este proceso, en ese sentido, se crea el script “optimal_parameters_statcom.py”, en donde se hace el procesamiento de los datos y la ejecución del optimizador de manera conjunta el algoritmo del **MVMO** es parametrizado con una población inicial y un número definido de iteraciones, de manera que, al correr el optimizador, cuando se cumple el número de iteraciones seteado, el algoritmo se detiene y proporciona como solución óptima a los valores con el mayor fitness de T_p , T_v , K_p , K_v , K_d , T_d , K_q , T_q que minimizan el error entre las señales de voltaje comparadas.

4.3 Casos de simulaciones

Continuando con la metodología, para completar el proceso de la sintonización de los parámetros dinámicos del controlador del D-STATCOM, es necesario proponer

dos tipos de eventos que pueden presentarse en una red de distribución, como es el caso de una falla en la red y un incremento de carga. Con la simulación de los eventos propuestos se obtienen los parámetros que mejor se ajustan a los eventos en mención, en el caso de incremento de carga, se propone un escenario donde se tiene 3 incrementos de carga para el nodo No. 671, con incrementos del 100 % en potencia activa y reactiva en cada paso, para un tiempo de 4 segundos en cada periodo, con un total de 12 segundos para la simulación completa, con el objetivo de evidenciar como el dispositivo FACT mantiene el voltaje en el nodo de incidencia evitando caídas severas de voltaje que podría provocar inestabilidad de voltaje por falta de reactivos en la red.

Para el caso de contingencia en la red, se crea una falla trifásica en la mitad de la línea LOHL671-680 conectado entre los nodos No. 680 y No.671 la misma que es despejada en 200 ms (milisegundos), con el fin de evidenciar la rapidez de recuperación de voltaje que experimenta el nodo de incidencia con la actuación del dispositivo FACT.

Para resumir los procesos y subprocesos involucrados en la metodología propuesta en este artículo científico, se ha elaborado un diagrama de flujo que ilustra de manera concisa los pasos a seguir para sintonizar los parámetros de un D-STATCOM cuando se requiera para un estudio eléctrico en una red de distribución. El diagrama de flujo en mención se describe en la figura 5.

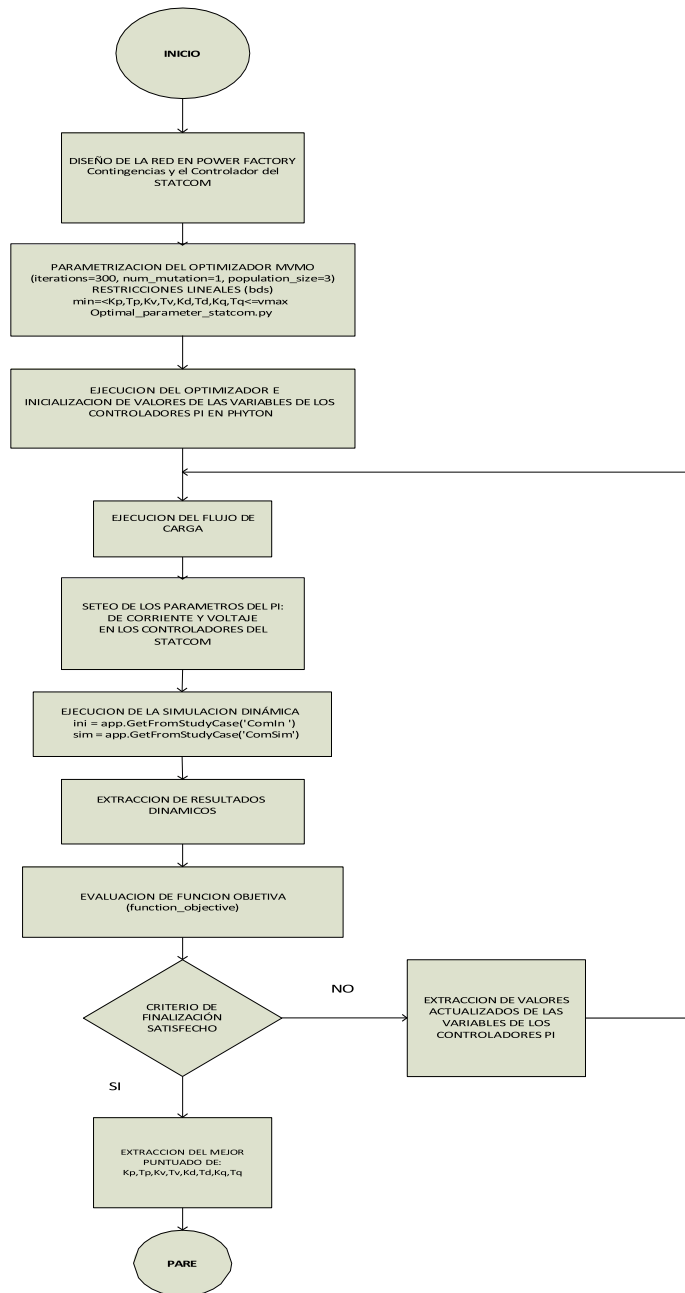


FIGURA 5. Metodología de sintonización dstatcom

5. SIMULACIÓN Y RESULTADO

En el presente proyecto se abordaron dos escenarios que pueden presentarse en redes de distribución, considerando que dichos eventos generan perturbaciones en los niveles de voltaje de la red de prueba de 13 nodos IEEE. Se procede a simular y tabular los resultados obtenidos de los dos casos propuestos para la estabilidad de

voltaje con presencia de generación distribuida, adicional a los casos propuestos, se simulo escenarios de operación sin considerar el dispositivo FACT.

5.1 Caso 1: Incremento de carga en la red de distribución

En el primer caso se evalúa el rendimiento del D-STATCOM con los parámetros sintonizados, considerando 3 incrementos de carga en el nodo 671 de la red de distribución IEEE 13 nodos. Se ejecuta la simulación RMS en Power Factory Digsilent para un periodo de 20 seg, y se verifica el comportamiento dinámico del voltaje bajo el aumento de carga cada 4 segundos, como se ilustra en la figura 6. Se hace una comparación del comportamiento del voltaje sin y con D-STATCOM para evidenciar la respuesta dinámica del dispositivo sintonizado, enfocando el análisis en el nodo de incidencia No. 632

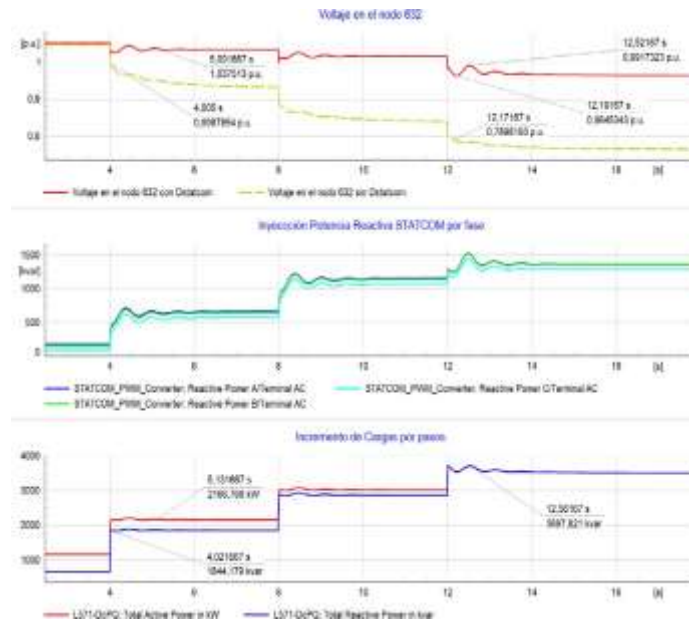


FIGURA 6. Comportamiento dinámico e inyección de reactivos con evento de incremento de carga en cascada, con y sin dstatcom, nodo de incidencia 632

Una vez obtenidos los resultados, se realizó una comparación entre los valores de voltaje máximo y mínimo alcanzados en el nodo de incidencia No. 632, considerando los escenarios con y sin la acción del dispositivo FACTS DSTATCOM. Los voltajes fueron analizados en los mismos instantes de tiempo, lo que permitió evaluar el impacto del compensador en la estabilidad del sistema. Los resultados obtenidos se presentan en las siguientes tablas; 1 y 2.

Tabla 1. Voltajes máximos y mínimos para los tres escenarios sin considerar el aporte del dstatcom

<i>Escenario</i>	<i>1</i>	<i>2</i>	<i>3</i>
Vmin[p.u.]	0,987	0,890	0,787
Vmax[p.u.]	0,950	0,854	0,784
P[kW]	2154,960	2987,171	3538,471
Q[kVar]	1847,111	2844,930	3538,471
t min [s]	4,060	8,020	12,210
t max [s]	5,150	9,140	12,530

Tabla 2. Voltajes máximos y mínimos para los tres escenarios considerando el aporte del dstatcom

<i>Escenario</i>	<i>1</i>	<i>2</i>	<i>3</i>
Vmin[p.u.]	1,029	1,004	0,964
Vmax[p.u.]	1,036	1,019	0,992
P[kW]	2154,960	2987,170	3538,470
Q[kVar]	1847,111	2844,934	3538,470
t min [s]	4,060	8,020	12,210
t max [s]	5,150	9,140	12,530

Se evidencia que el nodo de incidencia con el aporte del D-STATCOM tiene voltajes mínimos y máximos que están dentro de la banda de (0.95-1.05) pu, con tres oscilaciones amortiguadas estables, de esta manera se garantiza la calidad de voltaje para los incrementos de carga propuestos. Sin la presencia del dispositivo FACT, se aprecia una degradación total del voltaje llegando a un valor de 0.787 pu, el cual no es un valor correcto para la operación normal de la red.

Debido a que el aporte de reactivos por parte del D-STATCOM no solo afecta al nodo de conexión, sino también al resto de nodos de la red, se extrae de la simulación el comportamiento dinámico de todos los nodos del sistema de distribución, que se ilustra en la figura 7.

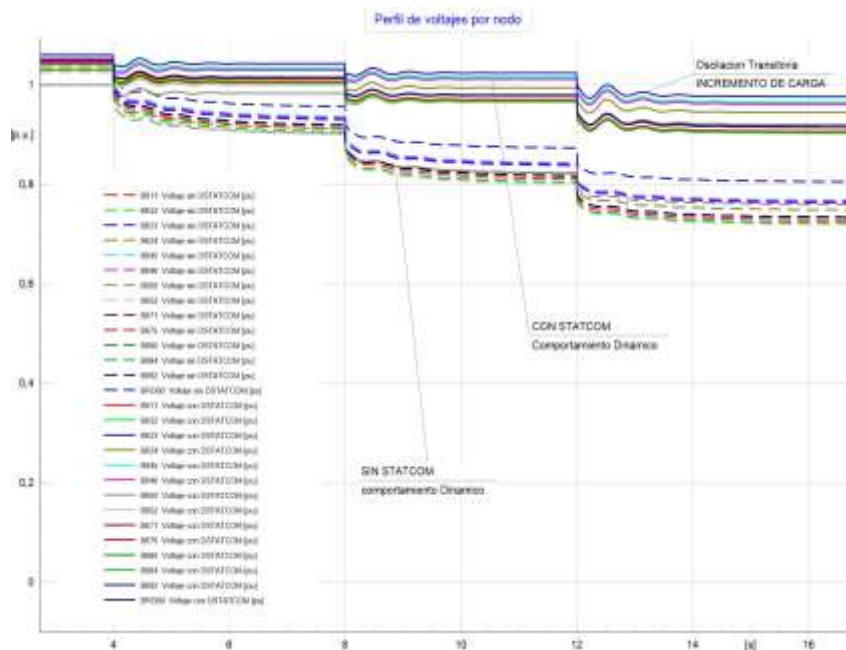


FIGURA 7. Comportamiento dinámico del voltaje de todos los nodos de la red de prueba, caso 1

El perfil mostrado en la figura 7, evidencia que la operación del D-STATCOM garantiza niveles de voltaje superiores a 0.9 p.u. en estado dinámico, incluso bajo condiciones de incremento de carga. La inyección de potencia reactiva por parte del dispositivo permite mejorar significativamente la calidad del servicio en comparación con el escenario en el que no se dispone de un dispositivo FACTS en la red. En este contexto, se observa que el DSTATCOM, correctamente sintonizado y en operación, proporciona una respuesta inmediata y efectiva para mitigar la insuficiencia de potencia reactiva causada por los aumentos en la demanda.

Una vez culminado la simulación dinámica donde se aprecia la adecuada sintonización de los parámetros del D-STATCOM, se procede analizar el perfil de voltaje en estado estacionario de la red de prueba. En este caso, se selecciona un incremento de carga del 100 % para verificar si los voltajes cumplen con la normativa de calidad, donde se extrae como límites operativos (1.05-0.95) pu, se hace una comparación con el caso sin dispositivo FACT, de esta manera, los voltajes por cada fase para todos los nodos de la red se presentan en la figura 8.

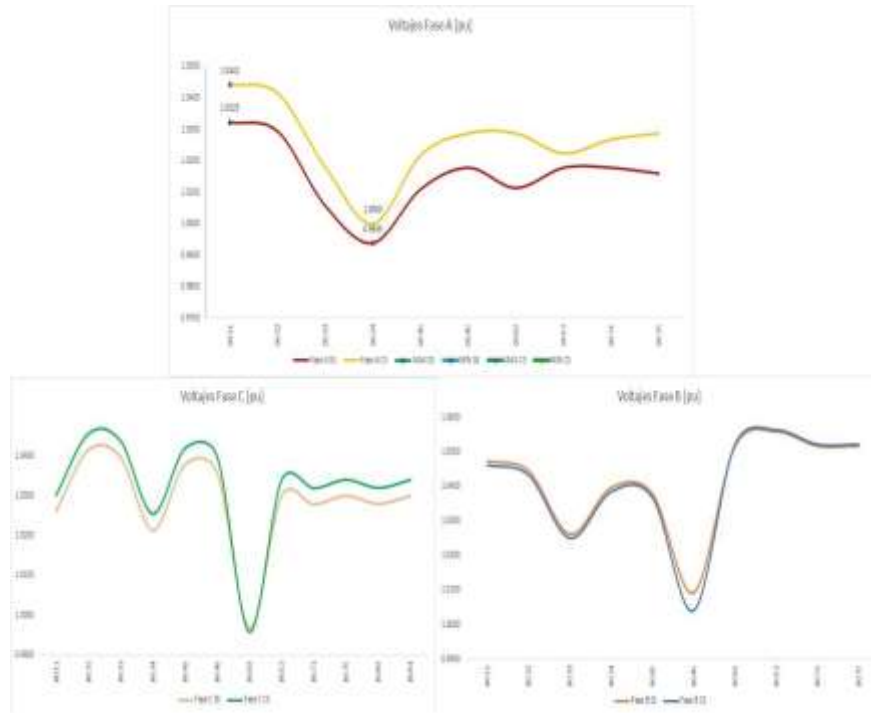


FIGURA 8. Grafica de la respuesta del perfil de voltaje SS y CS en nodos de 13 barras de la IEEE, fase A, B, C, caso 1

5.2 Caso 2: Falla Trifásica en una línea de distribución

En este escenario se produce una falla trifásica en la mitad de la línea LOHL671-680 de la red de 13 nodos de la IEEE, con un tiempo de despeje de 200 ms después de haber ocurrido la falla. En el periodo que dura la falla sin la participación del DSTATCOM, se aprecia que el hueco de voltaje llega hasta un valor de 0,273 pu, mientras que con el aporte del dispositivo FACT se alcanza un valor 0,304 pu. Una vez que la falla es despejada con la apertura de la línea, el voltaje tarda aproximadamente unos 3 seg en recuperar al valor nominal en el nodo 632 sin el aporte del D-STATCOM, mientras que con la operación del FACT, la recuperación de voltaje se presenta en unos 300 ms, siendo una respuesta inmediata en la regulación de voltaje. Para que el nodo de conexión experimente una recuperación inmediata de voltaje, el DSTATCOM proporciona 1,00 MVar por fase aproximadamente. El comportamiento dinámico del voltaje se ilustra en la figura 9.

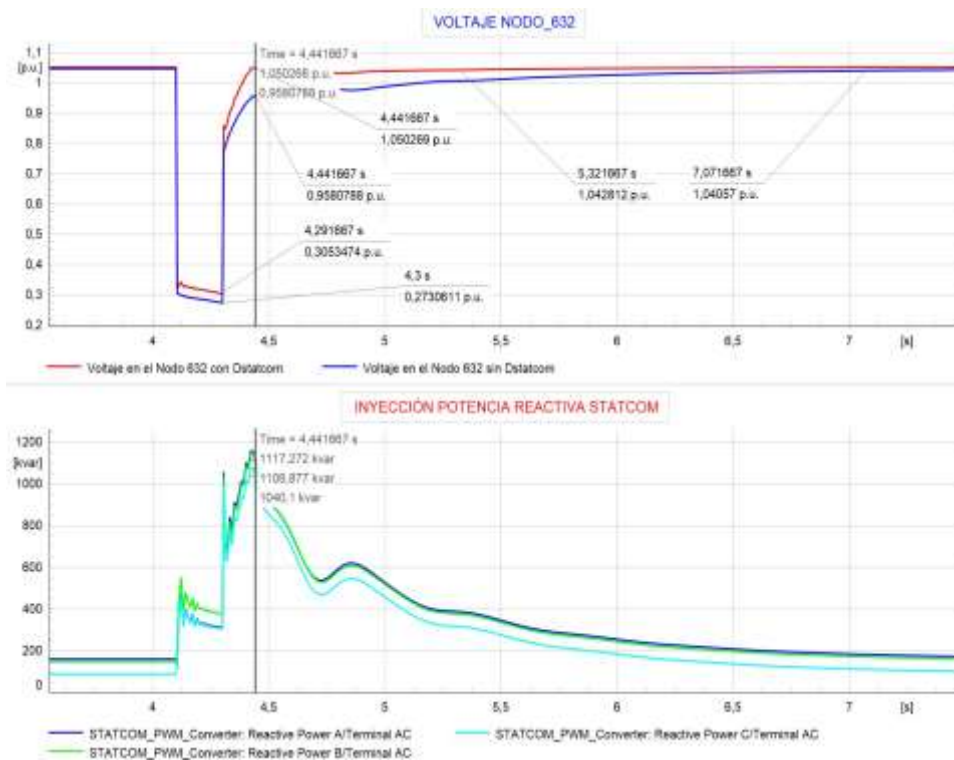


FIGURA 9. Comportamiento dinámico del voltaje e inyección de reactivos con evento de cortocircuito, con y sin dstatcom, nodo de incidencia 632

Debido a que el comportamiento dinámico del voltaje tiene pequeñas oscilaciones con la sintonización de parámetros, se registran los valores máximos y mínimos de la señal de voltaje. Simultáneamente, se capturan los valores de voltaje sin la presencia del D-STATCOM para realizar una comparación directa. Bajo estas condiciones, se obtiene los resultados que se presenta en la Tabla 3.

Tabla 3. Voltajes máximos y mínimos del voltaje en simulación RMS con y sin presencia del dstatcom

	<i>SIN STATCOM</i>	<i>CON STATCOM</i>
Vmin[p.u.]	0,273	0,304
Vmax[p.u.]	0,958	1,050
Q:A[kWar]	-	1117,272
Q:B[kWar]	-	1109,877
Q:C[kWar]	-	1040,100
t min [s]	4,300	4,300
t max [s]	4,442	4,442

Además, refleja la respuesta inmediata del D-STATCOM en la recuperación de voltaje una vez despejada la falla, a los 140 ms se alcanza un valor de 1,050 pu, mientras que en condiciones sin FACT, se evidencia un valor de 0,958 pu, que es un valor aceptable para operación normal, pero es significativamente inferior al valor nominal de la barra que es de 1,050 pu en condiciones normales [13]. De igual manera al caso anterior analizado, el aporte de reactivo por el dispositivo FACT tiene influencia en el resto de los nodos de la red de distribución, por lo cual, se extrae el comportamiento dinámico en todos los nodos, lo cual se ilustra en la figura 10.

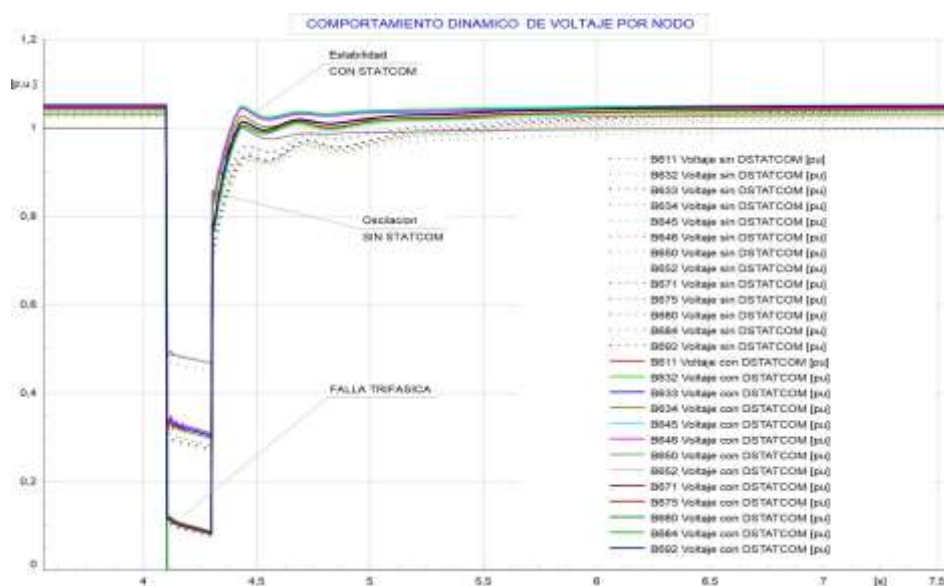


FIGURA 10. Comportamiento dinámico del voltaje de todos los nodos de la red de prueba, caso 2

Considerando que en la red de distribución después del despeje de la falla se presenta un escenario de operación estable, se compara el perfil de voltaje por cada fase en estado estacionario con el caso sin considerar el DSTATCOM, se obteniendo el resultado donde se ilustra en la figura 11.

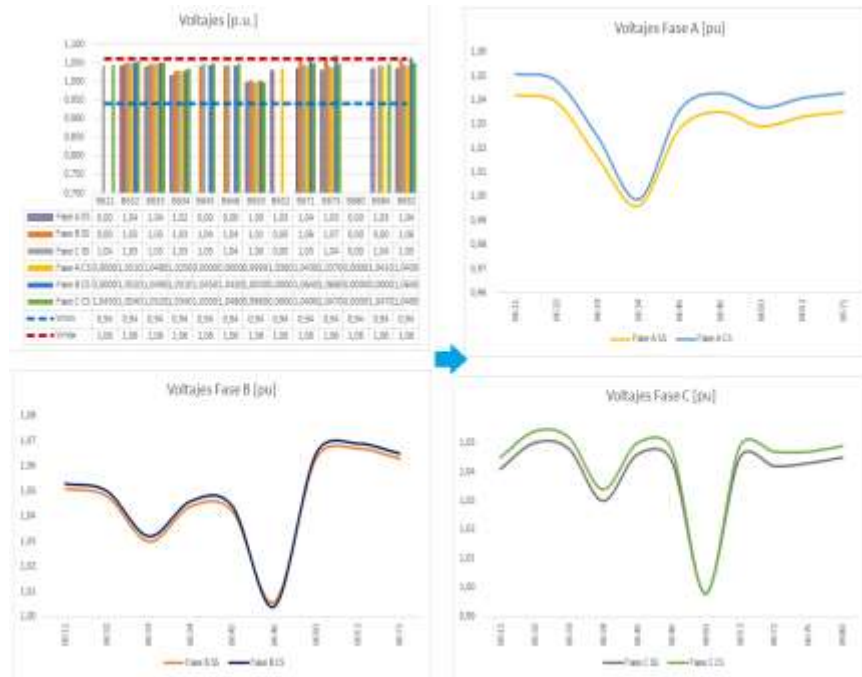


FIGURA 11. Grafica de la respuesta del perfil de voltaje SS y CS en nodos de 13 barras de la IEEE, fase A, B, C, caso 2

Finalmente se verifica en estado estacionario que los perfiles de voltaje considerando el dispositivo FACT, cumplen con los limites operativos de (0,95-1,05) pu, establecidos en la normativa para condiciones de operación normal [13], Se evidencia que el aporte de reactivos del D-STATCOM mejora significativamente los voltajes de la red posterior a la falla.

6. CONCLUSIONES

Mediante la metodología propuesta en este artículo científico, se ha encontrado soluciones factibles para sintonizar un D-STATCOM empleando el algoritmo de optimización heurística MVMO, es decir, que el uso de la programación en Python y sumado al software de simulación Power Factory de Digsilent, se logra ajustar de manera eficiente los parámetros dinámicos de los controladores PI para dispositivos FACTS.

La sintonización del D-STATCOM para condiciones de falla en la red de prueba, fue realizado para una contingencia específica, representativa de las fallas con mayor probabilidad de ocurrencia en un sistema real, Sin embargo, para escenarios en los que se deben evaluar múltiples fallas a las que el dispositivo FACTS debe

responder, sería necesario redefinir y ampliar la función objetivo. Esto permitiría incorporar todos los escenarios posibles, asegurando una respuesta óptima del dispositivo ante diversas condiciones de operación.

Mediante el ajuste de un voltaje de referencia para los componentes AC y DC en el controlador del D-STATCOM, es posible garantizar que el voltaje en el punto de conexión se mantenga dentro de los límites establecidos por la normativa para condiciones de operación normal [13]. En este contexto, el dispositivo FACTS debe suministrar la potencia reactiva necesaria hasta que el nodo de conexión alcance el voltaje de referencia. Este comportamiento está condicionado a que no se excedan los límites máximos de inyección de potencia para los cuales el dispositivo FACTS fue diseñado.

Como trabajos futuros se recomienda complementar el modelo de la función objetivo considerando los límites operacionales de voltaje en barras, flujos en líneas de distribución y transformadores. Es de suma importancia, para otros trabajos, generalizar el modelo de la función objetivo, para poder calibrar los parámetros para con eventos de falla o incrementos de demanda.

Una línea de investigación futura podría centrarse en un análisis más amplio que considere no solo la sintonización óptima del D-STATCOM, como se abordó en este artículo, sino también su ubicación y dimensionamiento óptimos dentro de la red. Este enfoque integral permitiría maximizar la eficiencia operativa del dispositivo FACTS y su impacto en la estabilidad y calidad del sistema eléctrico.

7. REFERENCIAS

- [1] Á. Manopanta, “Diseño de un compensador estático síncrono para la mitigación de variaciones transitorias de voltaje ante la presencia de generación fotovoltaica,” Universidad Politécnica Salesiana, Ecuador, 2020. [Online]. Available: <https://dspace.ups.edu.ec/bitstream/123456789/22563/1/UPS%20-%20TTS799.pdf>

- [2] A. López and J. Castro, “Red colaborativa para el fortalecimiento de la red del sector eléctrico colombiano,” *Revista CIDET*, vol. 18, 2020, [Online]. Available: <http://revista.cidet.org.co/revistas/revista-18/uso-del-compensador-sincronico-estatico-en-las-redes-de-distribucion-d-statcom/>
- [3] S. Benavides, J. Ortiz, J. Gutiérrez, N. Muñoz, J. Cano, and J. López, “Implementation of a distribution static compensator D-STATCOM: hardware and firmware description,” *Scientia et Technica*, vol. 24, no. 4, pp. 555–565, 2019, [Online]. Available: <https://www.redalyc.org/journal/849/84961238002/html/>
- [4] Onofre Morfín, L. Zavala, F. Ornelas, and R. Ramírez, “Compensación de potencia reactiva mediante el control robusto de un STATCOM en un sistema de potencia,” *Ingeniería Investigación y Tecnología*, vol. 22, no. 3, pp. 1–13, Jul. 2021, doi: 10.22201/fi.25940732e.2021.22.3.020.
- [5] A. Lemus, D. Carrión, E. Aguirre, and J. W. González, “Ubicación de los recursos distribuidos en las redes eléctricas marginales rur-urbanas considerando el índice de predicción de colapso de tensión,” *Ingenius*, vol. 2022, no. 28, pp. 25–33, Jul. 2022, doi: 10.17163/ings.n28.2022.02.
- [6] W. Vargas and P. Verdugo, “Revista Técnica "energía,"” *Revista Técnica energía CENACE*, vol. 2, no. 16, pp. 50–59, 2020, [Online]. Available: <https://doi.org/10.37116/revistaenergia.v16.n2.2020.352>
- [7] B. Rojas, “Control de voltaje en redes de distribución mediante el uso de cambiadores de toma bajo carga empleando el software open DSS,” *Universidad Politécnica Salesiana*, 2022. [Online]. Available: <http://dspace.ups.edu.ec/handle/123456789/21871>
- [8] J. Ha Woo, L. Wu, S. Lee, J. Park, and J. Roh, “D-STATCOM d-q Axis Current Reference Control Applying DDPG Algorithm in the Distribution System,” *Revista*

IEEE Access, vol. 9, no. 2, pp. 145840–145851, 2021, doi: 10.1109/ACCESS.2021.3119745.

- [9] J. Kurniawan, O. Bagaswara, and J. Sembiring, “Evolución diferencial e implementación de DATCOM para mejorar la estabilidad longitudinal del diseño del fuselaje,” *Revista de Conferencia Internacional 2023 - IEEE*, Ed., Indonesia, 2024. [Online]. Available: 10.1109/ICARES60489.2023.10329909.
- [10] J. Arcos, H. Lozada, and G. Salazar, “ecuatoriano utilizando la Metodología Mean-Variance Mapping Optimization (MVMO),” *Escuela Politécnica Nacional, Ecuador, 2023*. [Online]. Available: <https://bibdigital.epn.edu.ec/bitstream/15000/17193/1/2016AJIEE-16.pdf>
- [11] L. Paredes, B. Serrano, and M. Molina, “Mejoramiento de la Estabilidad de Tensión con un DSTATCOM en una Microrred Integrada por GD Solar Fotovoltaica y Convencional,” *Revista Técnica de energía*, vol. 16, no. 2, 2020, [Online]. Available: <http://scielo.senescyt.gob.ec/pdf/rte/v16n2/2602-8492-rte-16-02-00029.pdf>
- [12] J. Ramírez, L. Ortiz, and A. Aguila, “Control pasivo tolerante a fallos deensado en dispositivos de compensación dinámicos - SVC mediante una estrategia híbrida,” *Revista de Ciencia y Tecnología*, vol. 2022, no. 28, pp. 34–43, Jul. 2022, doi: 10.17163/ings.n28.2022.03.
- [13] Agencia de Regulación y Control de Energía y Recursos Naturales No Renovables, *Resolución Nro. ARCERNNR 023/23*, 2023. Ecuador, Ecuador, 2023. [Online]. Available: https://www.controlrecursosyenergia.gob.ec/wpcontent/uploads/downloads/2023/09/ProyReg_CodOp.pdf
- [14] L. Sancela, “Óptima ubicación de svc en sistemas de distribución mediante búsqueda exhaustiva para mejora de perfiles de voltaje,” Ecuador, 2020. [Online].

Available: <https://dspace.ups.edu.ec/bitstream/123456789/19125/1/UPS%20-%20TTS097.pdf>

- [15] R. Miranda, “Regulación dinámica de voltaje en sistemas industriales usando transformadores con cambiadores de TAP automáticos y compensadores estáticos de reactivos,” Universidad de Concepción, Uruguay, 2022. Accessed: Jan. 07, 2025. [Online]. Available: <http://repositorio.udec.cl/handle/11594/11051>

- [16] S. H. V. Shewatkar, “Diseño de Controlador PI Adaptativo de STATCOM para Estabilidad de Voltaje,” *Revista de ingeniería de sistemas eléctricos y de potencia*, vol. 5, no. 2, 2019, Accessed: Jan. 07, 2025. [Online]. Available: <https://n9.cl/jyvna>

- [17] Om Prakash, M., & Abdul, S. (2017). Mejora de la calidad de energía en la red de distribución mediante DSTATCOM con sistema de almacenamiento de energía en baterías. *Revista del Departamento de Ingeniería Eléctrica, Instituto Indio de Tecnología Jodhpur*, 83.

- [18] Simbaña, Á. (2024). Óptima ubicación y dimensionamiento DE D-STATCOM en sistemas eléctricos de distribución para mejorar el perfil de voltaje considerando restricción de inyección de armónicos mediante el algoritmo JAYA. Universidad Politécnica, Salesiana, Ecuador. <https://dspace.ups.edu.ec/bitstream/123456789/26765/1/TTS1612.pdf>