

**MEJORAMIENTO DE LOS PERFILES DE TENSIÓN EN UN SISTEMA DE
DISTRIBUCIÓN DE UNA MICRO-RED USANDO COMPENSADORES EN
SERIE D-STATCOM**

**UNIVERSIDAD POLITÉCNICA SALESIANA
SEDE QUITO**

**CARRERA:
INGENIERÍA ELÉCTRICA**

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

**TEMA:
MEJORAMIENTO DE LOS PERFILES DE TENSIÓN EN UN SISTEMA DE
DISTRIBUCIÓN DE UNA MICRO-RED USANDO COMPENSADORES EN
SERIE D-STATCOM**

**AUTOR:
JIMMY STALYN JUIÑA PILLAJO**

**TUTOR:
MANUEL DARIO JARAMILLO MONGE**

Quito, Febrero 2020

JIMMY STALYN JUIÑA PILLAJO

MEJORAMIENTO DE LOS PERFILES DE TENSIÓN EN UN SISTEMA DE DISTRIBUCIÓN DE UNA MICRO-RED USANDO COMPENSADORES EN SERIE D-STATCOM

Universidad Politécnica Salesiana, Quito – Ecuador 2020

Ingeniería Eléctrica

Breve reseña histórica e información de contacto.



JIMMY STALYN JUIÑA PILLAJO (D'1996 – O'2020). Realizó sus estudios de nivel secundario en el Colegio "T. W. Anderson" de la ciudad de Quito. Egresado de Ingeniería Eléctrica de la Universidad Politécnica Salesiana. Su trabajo se basa en mejoramiento de los perfiles de tensión en un sistema de distribución de una micro-red usando compensadores en serie D-STATCOM. juina@est.ups.edu.ec

Dirigido por:



Manuel Dario Jaramillo Monge (Y'1990). Realizó sus estudios superiores en la Universidad de las Fuerzas Armadas ESPE de Quito, donde se graduó de Ingeniero Electrónico en Automatización y Control en el 2014. Además, cursó estudios de posgrado en la Universidad de Newcastle, Reino Unido, donde obtuvo el título en Máster en Electrical Power. Actualmente es profesor ocasional a tiempo completo de la Universidad Politécnica Salesiana. mjaramillo@ups.edu.ec.

Todos los derechos reservados:

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

DERECHOS RESERVADOS
©2020 Universidad Politécnica Salesiana
QUITO - ECUADOR

DECLARATORIA DE COAUTORÍA DEL DOCENTE TUTOR

Yo, MANUEL DARIO JARAMILLO MONGE declaro que bajo mi dirección y asesoría fue desarrollado el trabajo de titulación “MEJORAMIENTO DE LOS PERFILES DE TENSIÓN EN UN SISTEMA DE DISTRIBUCIÓN DE UNA MICRO-RED USANDO COMPENSADORES EN SERIE D-STATCOM” realizado por JIMMY STALYN JUIÑA PILLAJO, obteniendo un producto que cumple con todos los requisitos estipulados por la Universidad Politécnica Salesiana para ser considerados como trabajo final de titulación.

Quito, Febrero de 2020



.....
MANUEL DARIO JARAMILLO MONGE

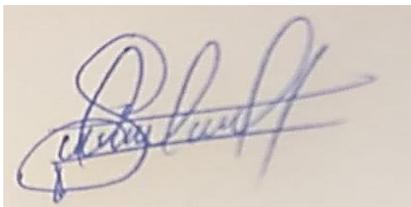
C.C.: 1714298005

CESIÓN DE DERECHOS DE AUTOR

Yo, JIMMY STALYN JUIÑA PILLAJO, con documento de identificación No 171787155-0, manifiesto mi voluntad y cedo a la Universidad Politécnica Salesiana la titularidad sobre los derechos patrimoniales en virtud de que soy autor del trabajo de grado/titulación intitulado: *“MEJORAMIENTO DE LOS PERFILES DE TENSION EN UN SISTEMA DE DISTRIBUCIÓN DE UNA MICRO-RED USANDO COMPENSADORES EN SERIE D-STATCOM”*, mismo que ha sido desarrollado para optar por el título de: Ingeniero Eléctrico, en la Universidad Politécnica Salesiana, quedando la Universidad facultada para ejercer plenamente los derechos cedidos anteriormente.

En aplicación a lo determinado en la Ley de Propiedad Intelectual, en mi condición de autor me reservo los derechos morales de la obra antes citada. En concordancia, suscribo este documento en el momento que hago entrega del trabajo final en formato digital a la Biblioteca de la Universidad Politécnica Salesiana.

Quito, Febrero de 2020



.....
JIMMY STALYN JUIÑA PILLAJO
C.C.: 1717871550

ÍNDICE GENERAL

1	INTRODUCCIÓN	2
1.1	Método de reactancia de acople:	2
1.2	Método de transformador de acople:	2
2	MICRO-RED	2
3	D-STATCOM	3
3.1	Componentes de un D-STATCOM	4
3.1.1	Inversores DC/AC:	4
3.1.2	Filtro L-C:	5
3.1.3	Bloque de control:	5
3.2	Funcionamiento de un D-STATCOM	5
3.3	Análisis y control de un dispositivo D-STATCOM	5
4	PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA	6
4.1	Análisis de niveles de tensión	6
4.1.1	Análisis de perfiles de tensión caso 1	6
4.1.2	Análisis de perfiles de tensión caso 2	6
4.1.3	Análisis de perfiles de tensión caso 3	6
4.2	Método de acople del D-STATCOM a la red	6
5	CASOS DE ESTUDIO	7
5.1	Simulación dinámica de la Micro-red	8
5.1.1	PLL (Phase Locked Loop)	9
5.2	Análisis de los perfiles de tensión de la micro-red	9
5.3	Implementación del D-STATCOM en las barras 8, 11, 14	9
5.4	Implementación del D-STATCOM en las barras 8, 11, 14 y variación de carga ..	9
6	ANÁLISIS DE RESULTADOS	9
6.1	Micro-red de 14 barras	9
6.2	Caso 1: Barra 8	11
6.2.1	Escenario 1	12
6.2.2	Escenario 2	12
6.2.3	Escenario 3	12
6.2.4	Escenario 4	12
6.2.5	Escenario 5	12
6.2.6	Escenario 6	12
6.3	Caso 2: Barra 11	13
6.3.1	Escenario 1	15
6.3.2	Escenario 2	15
6.4	Caso 3: Barra 14	17
6.4.1	Escenario 1	19
6.4.2	Escenario 2	19
6.4.3	Escenario 3	19
6.4.4	Escenario 4	19
6.4.5	Escenario 5	19
7	CONCLUSIONES	20
8	TRABAJOS FUTUROS	21

9	REFERENCIAS.....	21
10	ESTADO DEL ARTE.....	24
11	RESUMEN DE INDICADORES	27

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1. Ejemplo de una micro-red conectada a cargas cercanas con generación distribuida. [1].....	3
Figura 2. Esquema ideal de un dispositivo D-STATCOM[24].	4
Figura 3. Representación de acoplamiento de un D-STATCOM.	5
Figura 4. Método de acoplamiento reactancia conectado en paralelo entre la red y el D-STATCOM.....	7
Figura 5. Método de acoplamiento con transformador conectado en paralelo entre la red y el D-STATCOM.	7
Figura 6. Método de acoplamiento con transformador y condensador trifásicos conectados en paralelo entre la red y el D-STATCOM.....	7
Figura 7. Método de acoplamiento con transformador y condensador trifásicos más una reactancia conectados en paralelo entre la red y el D-STATCOM.	7
Figura 8. Método de acoplamiento con un transformador, condensadores trifásicos y una reactancia conectados en paralelo entre la red y el D-STATCOM.....	7
Figura 9. Simulación dinámica de la micro-red con la inclusión del D-STATCOM.	8
Figura 10. Estructura del D-STATCOM.....	9
Figura 11. Perfiles de tensión de la micro-red de 14 Barras.	11
Figura 12. Simulación del D-STATCOM 30Mvar en la barra 8.	11
Figura 13. Perfiles de Tensión de la micro-red sin D-STATCOM vs D-STATCOM en la barra 8.....	12
Figura 14. Perfil de tensión de la barra 8 de la micro-red, usando D-STATCOM y cargas variables.	13
Figura 15. Perfil de tensión de la barra 11 de la micro-red, usando D-STATCOM y cargas variables.	14
Figura 16. Simulación del D-STATCOM 30Mvar en la barra 11.	14
Figura 17. Perfiles de tensión de la micro-red con la implementación del D-STATCOM en la barra 11.....	15
Figura 18. Perfil de Tensión vs Potencia MVA de la barra 11 para $0 \leq t \leq 2.5$	16
Figura 19. Perfil de Tensión vs Potencia MVA de la barra 11 para $2.5 \leq t \leq 5.0$	16
Figura 20. Perfil de tensión de la barra 14 de la micro-red, usando D-STATCOM y cargas variables.	17
Figura 21. Simulación del D-STATCOM 40Mvar en la barra 14.	17
Figura 22. Perfiles de Tensión de la micro-red sin D-STATCOM vs D-STATCOM en la barra 14.....	18
Figura 23. Perfil de Tensión vs Potencia MVA de la barra 14 para $0 \leq t \leq 2.0$	19
Figura 24. Perfil de Tensión vs Potencia MVA de la barra 14 para $2.0 \leq t \leq 5.0$	20
Figura 25. Resumen e indicador de la temática.	27
Figura 26. Indicador de formulación del problema.....	28
Figura 27. Indicador de solución.....	28

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1. Modo de operación D-STATCOM[22], [23].....	4
Tabla 2. Valores de los componentes del D-STATCOM.	8

Tabla 3. Perfiles de tensión de la micro-red de 14 Barras.	9
Tabla 4. Valores de generación de la micro-red de 14 Barras.	10
Tabla 5. Valores de generación de la micro-red de 14 Barras.	10
Tabla 6. Valores de transformadores de la micro-red de 14 Barras.	10
Tabla 7. Valores de las líneas en p.u de la micro-red.	10
Tabla 8. Valores de cargas de la micro-red.	10
Tabla 9. Datos del perfil tensión de la barra 8	13
Tabla 10. Datos del perfil tensión de la barra 11.	13
Tabla 11. Datos de perfil de tensión de la barra 14.....	18

MEJORAMIENTO DE LOS PERFILES DE TENSION EN UN SISTEMA DE DISTRIBUCIÓN DE UNA MICRO-RED USANDO COMPENSADORES EN SERIE D-STATCOM

Resumen

En la presente investigación se propone desarrollar un modelo que permita mejorar los perfiles de tensión de una micro-red de distribución eléctrica basado en un estándar IEEE usando el Compensador Estático de Distribución (D-STATCOM) conectado en paralelo y con la inclusión de cargas variables. Para el desarrollo de este artículo, se verán varios casos de estudios, que se modelaron utilizando la plataforma MATLAB y Simulink en la que se realizó el análisis del comportamiento de los perfiles de tensión en las diferentes barras del sistema de la micro-red.

El primer caso con lleva el estudio de la micro-red implementado las cargas variables y sin el compensador estático de distribución; para los siguientes casos de estudio se localizó los perfiles de tensión más bajos de las barras del sistema con la finalidad de implementar el D-STATCOM y posteriormente ser analizado el comportamiento de los perfiles de tensión y la acción tomada por el dispositivo ante las variaciones de carga en el tiempo.

Palabras Clave: Micro-red, Compensador Estático de Distribución, Cargas variables, Perfiles de tensión, Potencia Reactiva.

Abstract

In the present study, it is proposed to develop a model that allows to improve the voltage profiles of an electric distribution micro-network based on an IEEE standard using the Static Distribution Compensator (D-STATCOM) connected in parallel and with the inclusion of variable loads.

For the development of this article, several cases of studies will be seen, which were modeled using the MATLAB and Simulink platform in which the analysis of the behavior of the tension profiles in the different bars of the micro-network system was performed.

The first case entails the study of the micro-network implemented the variable loads and without the static distribution compensator; For the following case studies, the lowest tension profiles of the system bars were located in order to implement the D-STATCOM and subsequently to analyze the behavior of the voltage profiles and the action taken by the device before the variations of load over time.

Keywords: Micro-network, Static Distribution Compensator, Variable loads, Voltage profiles, Reactive Power.

1 INTRODUCCIÓN

Una micro-red (Microgrid, por su nombre en inglés) es un conjunto de recursos de energía, como energía distribuida, generadores con energía renovable, sistemas de almacenamiento y cargas interconectadas[1].[2]

Una micro-red puede actuar como una entidad controlable, conectarse o desconectarse de una red de distribución, de esta forma, la micro-red proporciona al sistema de distribución energía más flexible y confiable[1][3].

Una micro-red puede tener una fuente de conexión a la red eléctrica principal (slack), también tiene la facilidad de operar como una red independiente, otorgando al sistema una mayor confiabilidad.[4]

Con el pasar de los años la tecnología ha tomado un papel muy importante en el desarrollo de la micro-red, con el propósito de ayudar a la micro-red acceder a la red de distribución, estas tecnologías han desarrollado métodos de compensación de potencia reactiva.

Un método de potencia reactiva empleada en sistemas de distribución es el dispositivo electrónico de potencia D-STATCOM (Distribution static compensator, por su nombre en inglés), estos dispositivos basados en electrónica de potencia son muy útiles para métodos de compensación en líneas de distribución. Estos dispositivos son los más avanzados y convenientes para proporcionar compensación de potencia reactiva en la línea de distribución[5][6][7].

Los dispositivos D-STATCOM para poder ser empleados se necesitan de métodos de acople, estos acoples nos facilitarían filtrar corrientes, armónicos y

a proporcionar potencia real a la línea de distribución:

1.1 Método de reactancia de acople:

Se basa en el acople con una reactancia de fuga, el cual se lo aprovecharía como reactor de filtro de entrada, evitando inyección de armónicos indeseados en la red, este método de acople es más usado para sistemas de distribución de bajo voltaje y potencias bajas.

1.2 Método de transformador de acople:

Este método permitirá realizar la conexión entre el D-STATCOM y una micro-red de distribución, también es conocido por su facilidad de aportar con potencia real a la línea de distribución y con el D-STATCOM aportar potencia reactiva, obteniendo resultados óptimos de compensación.

Para el presente documento se implementó el dispositivo D-STATCOM acoplado a un transformador, para mejorar los perfiles de tensión de las barras de nuestro sistema, una ventaja de este método de acople es la calidad de onda de corriente y voltaje.[8][9][10][11]

2 MICRO-RED

En el pasado una red de energía eléctrica era considerada como una extensa red que contiene proveedores y consumidores de energía que están conectadas por líneas de transmisión y distribución operados por uno o más agentes de control.

Las redes de energía eléctrica de transmisión eran consideradas redes de alto voltaje. Sin embargo, gracias a recientes estudios e investigaciones se han desarrollado micro redes a nivel de distribución de energía, con el objetivo de ayudar a la red de energía eléctrica inyectando generación distribuida a nivel

de distribución, reduciendo las pérdidas comunes de la red de transmisión.

Ante la creciente demanda de energía eléctrica las empresas de servicios públicos de América del norte han iniciado investigaciones sobre cómo gestionar la demanda futura e integrar fuentes de energías renovables no convencionales en la red de energía eléctrica [12][13].

Las micro-redes también denominadas microgrids (MGs), han sido propuestas para la utilización de los recursos energéticos de manera eficiente, las MGs permiten conectar o desconectar al sistema de la red de energía eléctrica, lo cual las convierten en fuentes importantes para el desarrollo de la generación distribuida (DG) y conceptos de almacenamiento de energía [14].

Por esta razón el objetivo final de las fuentes de energía renovables, con la inclusión de la generación distribuida es conseguir minimizar el uso frecuente de los combustibles fósiles y disminuir su

precio, también uno de los beneficios de las MGs es permitir maximizar y aprovechar todos los recursos de la DG en caso de interrupciones dentro de la red de energía eléctrica. Otro beneficio de la implementación de las MGs es en la toma de decisiones del operador en el ámbito de despacho económico de la red, permitiendo al operador decidir cuándo vender o comprar energía[15][16].

Algunas MGs requieren de recursos adicionales como DG, sistemas de almacenamiento de energía, y compensación reactiva; esto se debe al crecimiento repentino y continuo de la demanda de carga.

En la Figura 1 se muestra un ejemplo de una micro-red, y su generación distribuida las cuales se encuentra constituidas por sistemas fotovoltaicos, eólicos, hidroeléctricas, aprovechando todos los recursos renovables para abastecer de energía eléctrica a todas las cargas cercanas de la MG.



Figura 1. Ejemplo de una micro-red conectada a cargas cercanas con generación distribuida. [1]

3 D-STATCOM

El compensador estático de distribución también conocido como (D-STATCOM

– *Distribution static compensator*) por sus siglas en inglés, es un dispositivo de compensación basado en la electrónica de potencia, estos dispositivos son muy

conocidos por su aporte rentable que proporcionan una compensación de potencia reactiva conectada a un bus de una red de distribución de energía eléctrica[5][17].

El D-STATCOM es un dispositivo que trabaja alimentado por inversores de fuente de voltaje (VSI - voltage source invertir), por sus siglas en inglés, el objetivo es mitigar los armónicos, varios problemas de calidad de tensión y compensar potencia reactiva tanto inductiva como capacitiva [18][19]. Este dispositivo es conocido por su forma de generar y absorber potencia reactiva continuamente, lo hace de manera controlable y variando su amplitud, ángulo de fase con respecto al nodo de referencia, también puede intercambiar potencia real siempre y cuando se le proporcione una fuente de CC[20][21].

El modo de operación se ilustra en la Tabla 1, en el cual se detalla el modo

capacitivo e inductivo en el cual se puede colocar el dispositivo por la relación del voltaje del VSC (voltage-source converter).

Tabla 1. Modo de operación D-STATCOM[22], [23].

Relación	Modo de operación	
$V_{bus} > V_{vsc}$	Capacitivo	Inyecta potencia reactiva
$V_{bus} < V_{vsc}$	Inductivo	Absorbe potencia reactiva
$\angle \phi = \angle \theta$	Intercambia potencia reactiva	

En la Figura 2 se puede observar un ejemplo del esquema ideal de un dispositivo de compensación D-STATCOM, con sus componentes como: inductancias de acoples conectadas a fuentes, condensador de CC, varios módulos inversores.

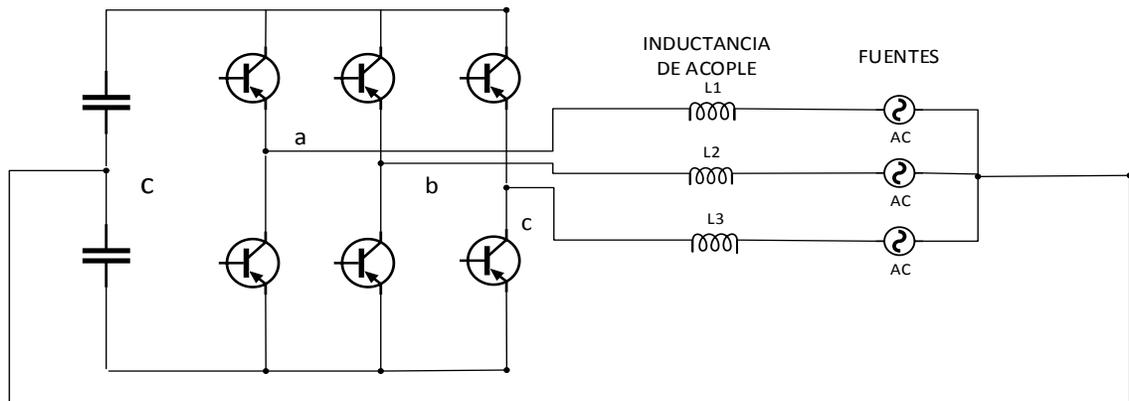


Figura 2. Esquema ideal de un dispositivo D-STATCOM[24].

3.1 Componentes de un D-STATCOM

El D-STATCOM se compone de tres partes importantes:

3.1.1 Inversores DC/AC:

Los inversores DC/AC implementados en el dispositivo electrónico de potencia D-STATCOM están basados en IGBT, son utilizados para crear la onda de voltaje de salida que se controla tanto en

magnitud como ángulo de fase, con la finalidad de generar una corriente reactiva de compensación dependiendo del sistema[20].

3.1.2 Filtro L-C:

El filtro L-C tiene mejores efectos de filtrado que un simple inductor, es ampliamente utilizado en el dispositivo D-STATCOM, para reducir los armónicos de alta frecuencia, la inductancia toma un papel importante en el cambio de voltaje de la salida del inversor. Estos filtros son diseñados de acuerdo a la topología de la red y los armónicos que presenten en la salida del inversor.[20][25][26].

Los valores del filtro L-C conectados a la salida del inversor se encuentran en la Tabla 2 y proporcionan un factor de calidad de 40 a 60Hz.

3.1.3 Bloque de control:

Los bloques de control del D-STATCOM son los que se encargan de conmutar los módulos, estos módulos están basado en la teoría de control de cuadros sincrónicos y también pueden controlar dispositivos externos como banco de compensadores[20].

3.2 Funcionamiento de un D-STATCOM

Los dispositivos D-STATCOM basado en VSC tiene una frecuencia de conmutación debido a los semiconductores de potencia media, en consecuencia, de eso, la onda de tensión de entrada del convertidor puede contener armónicos significativos.

Generalmente los dispositivos son diseñados para un nivel de tensión bajo, por ende se debe proporcionar un método de acoplamiento para poder conectarlos a la red, el método consiste en la implementación de un transformador de acoplamiento, el cual

permitirá eliminar la operación de los semiconductores de potencia en paralelo y poder tener un nivel de tensión más bajo en el caso de ser un sistema de MV[27].

En la Figura 3 se observa un ejemplo de acoplamiento mediante el transformador para eliminar la operación de los semiconductores de potencia a MV.

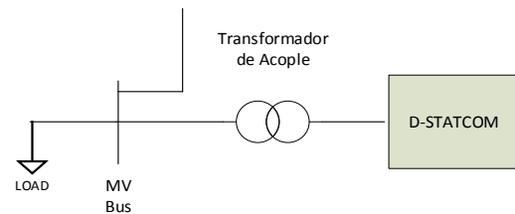


Figura 3. Representación de acoplamiento de un D-STATCOM.

Finalmente se puede decir que asignar un D-STATCOM en la red de distribución eléctrica permitirá reducir las pérdidas de energía y mejorar los perfiles de tensión de cada una de las barras del SEP.[28]

3.3 Análisis y control de un dispositivo D-STATCOM

Al analizar un dispositivo, se determina que el mismo produce, pulsaciones de potencia con una frecuencia de hasta 2 veces, la potencia instantánea del punto de conexión se debe al cruce de componentes positivos y negativos de voltajes y corrientes, tanto como las pérdidas de reactancias de conexión entre el sistema y el D-STATCOM, como también las pérdidas de conmutación del inversor del D-STATCOM que son bajas[29][30][31].

El dispositivo realiza una compensación dinámica del sistema reactivo al encender y apagar constantemente los IGBT, podrían inyectarse armónicos a la red y dañar la

carga de energía si no se los filtra de manera adecuada e incluso podría llegar a causar resonancias en la red[29][30].

4 PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

En el análisis de los niveles de tensión se identificó que tres barras del sistema de 14 barras de distribución[32], se encontraban por niveles bajos de tensión. Para solucionar este problema se estableció el método de compensación reactiva, la cual se basa en la implementación de un dispositivo electrónico de potencia D-STATCOM.

Este dispositivo tiene como función absorber o aportar con potencia reactiva al sistema y mejorar los perfiles de tensión según la condición de la micro-red y para condiciones de cargas variables futuras en el transcurso del tiempo, para lo cual se determinó un método de acople, que consiste en conectar un transformador Y/Δ , el cual nos ayudará a evitar armónicos no deseados en la micro-red y evitar las operaciones de los semiconductores del D-STATCOM.

4.1 Análisis de niveles de tensión

Para el presente análisis se realizó el modelamiento de un sistema de distribución de una micro-red de 14 barras[32], mediante la plataforma MATLAB y Simulink, en el cual se llevó a cabo las siguientes operaciones para la simulación de la micro-red:

4.1.1 Análisis de perfiles de tensión caso 1

Análisis en las barras de baja tensión más representativas dentro del sistema sin la implementación del dispositivo D-STATCOM.

4.1.2 Análisis de perfiles de tensión caso 2

Análisis en las barras de baja tensión más representativas con variación de carga sin implementación del dispositivo D-STATCOM.

4.1.3 Análisis de perfiles de tensión caso 3

Análisis en las barras de baja tensión más representativas con variación de carga con implementación del dispositivo D-STATCOM.

Para los análisis de perfiles de tensión en los diferentes análisis se tomaron los datos del sistema como se muestran en las Tablas 3, 4, 5, 6, 7 y 8.

4.2 Método de acople del D-STATCOM a la red

En esta sección se determinará los diferentes métodos de acople del dispositivo D-STATCOM conectado a la red de distribución de la micro-red, estos dispositivos deben cumplir con objetivos los cuales serán detallados a continuación:

- a) Magnitud del componente de potencia reactiva inyectada por el D-STATCOM.
- b) Contenido armónico de la corriente aproximadamente sinusoidal inyectada por el D-STATCOM.

Para el acople de un D-STATCOM la frecuencia de conmutación de los semiconductores de potencia de un VSC es relativamente mucho más bajo, por lo que el convertidor de forma de onda puede contener componentes armónicos que pueden ser perjudiciales para la red, por ende, el dispositivo D-STATCOM no se puede conectar directamente a la red.

A continuación, se detallan los diferentes métodos de acople de un D-STATCOM:

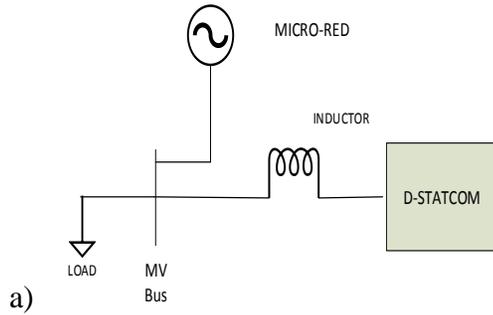


Figura 4. Método de acoplamiento reactancia conectado en paralelo entre la red y el D-STATCOM.

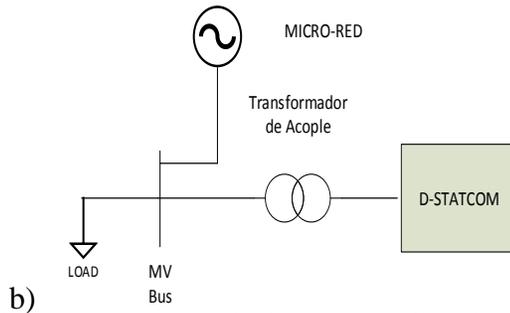


Figura 5. Método de acoplamiento con transformador conectado en paralelo entre la red y el D-STATCOM.

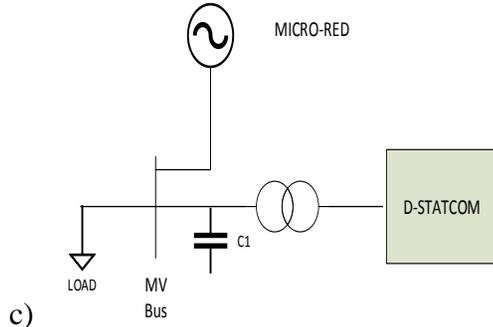


Figura 6. Método de acoplamiento con transformador y condensador trifásicos conectados en paralelo entre la red y el D-STATCOM.

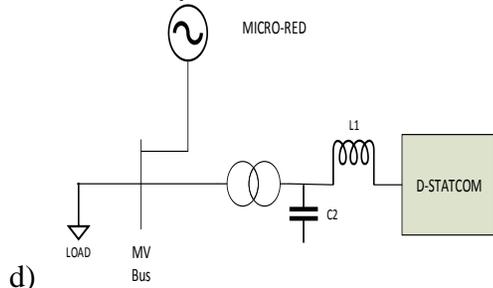


Figura 7. Método de acoplamiento con transformador y condensador trifásicos más una reactancia

conectados en paralelo entre la red y el D-STATCOM.

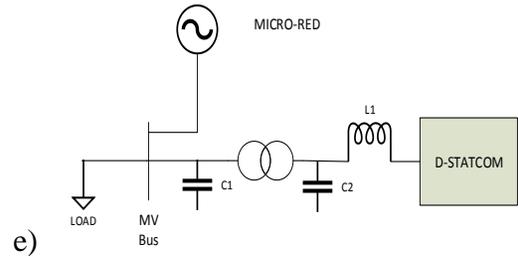


Figura 8. Método de acoplamiento con un transformador, condensadores trifásicos y una reactancia conectados en paralelo entre la red y el D-STATCOM.

En la Figura 4 se observa la conexión de un D-STATCOM conectado directamente a la red mediante una reactancia trifásica, este tipo de acoplamiento no es posible para niveles de tensión de media y baja potencia, son más usados para niveles de tensión más bajos[33].

En las Figura 5, Figura 6, Figura 7 y Figura 8 la reactancia de fuga del transformador trifásico se logra aprovechar como reactor de filtro de entrada, mientras que los condensadores trifásicos vendrían a comportarse como un filtro de entrada de pasa bajo trifásico al lado AC del VSC[27][34].

5 CASOS DE ESTUDIO

En la micro-red se ha realizado diferentes casos de estudio para evaluar el estado de los diferentes niveles de tensión a nivel de distribución de energía eléctrica.

Esta micro-red consta de un sistema de 14 barras, con cargas inductivas y capacitivas según el estándar IEEE de prueba [32][35], para la simulación se procedió a identificar las barras más vulnerables ante un crecimiento de la demanda.

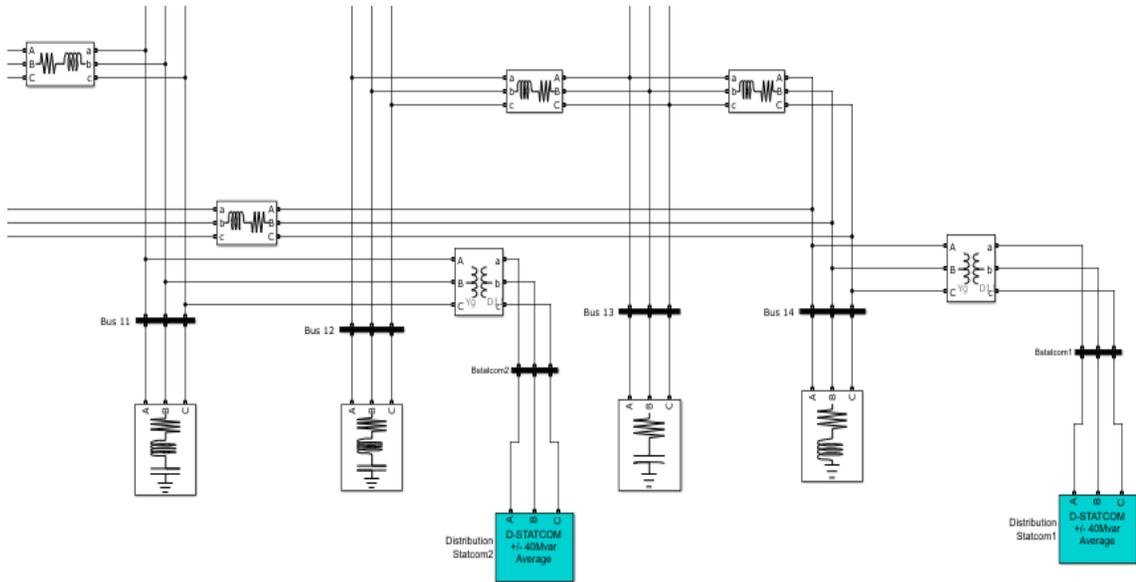


Figura 9. Simulación dinámica de la micro-red con la inclusión del D-STATCOM.

5.1 Simulación dinámica de la Micro-red

Para la simulación dinámica de la micro-red, realizada mediante la plataforma MATLAB & Simulink, es necesario considerar parámetros principales: voltajes de las barras, líneas, valores de transformadores, frecuencia, generadores y cargas conectadas a la micro-red; aspectos que son importantes para la inclusión del D-STATCOM.

En la Figura 9 se ilustra la estructura de simulación dinámica de la micro-red, con la inclusión del dispositivo D-STATCOM actuando como elemento de compensación reactiva, acoplada mediante un transformador trifásico Y/ Δ reductor 138 kV /25kV; usando el bloque powergui para implementar parámetros de tiempo de simulación.

En la Figura 10 se ilustra la estructura de un D-STATCOM, el bloque de control de voltaje, condensador DC, filtros L-C; el uso del transformador es para el acoplamiento entre el inversor PWM y la red, el inversor PWM se reemplaza en el lado de AC con tres

fuentes de voltaje equivalentes promediadas durante un ciclo de la frecuencia de conmutación de 1.68 kHz, el lado en DC el inversor está modelado por una fuente de corriente con la inclusión de un condensador, los valores se de los componentes del D-STATCOM se detallan en la siguiente Tabla 2.

Tabla 2. Valores de los componentes del D-STATCOM.

Elemento	Valor
Filtro L	800uH
Filtro C	100 uF
Condensador DC	10000 UF
Transformador	1.25Kv /25kV

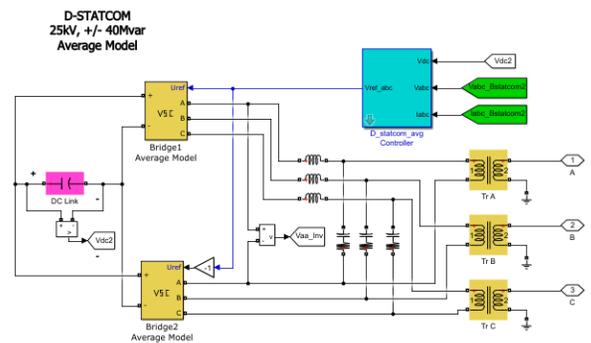


Figura 10. Estructura del D-STATCOM.

5.1.1 PLL (Phase Locked Loop)

Bucle de fase bloqueada, esta sincronizado con el fundamental de los voltajes primarios del transformador, sincronizando el sistema eléctrico de potencia en frecuencia y en el desfase angular.

5.2 Análisis de los perfiles de tensión de la micro-red

Análisis de los perfiles de tensión en las barras 8, 11, 14, sin la implementación del D-STATCOM, en el cual se determinó que las barras ya mencionadas son las más influyentes dentro del sistema de la micro-red, en estos tres casos se llevara a cabo la implementación del dispositivo D-STATCOM, para mejorar los perfiles de tensión del sistema, cabe mencionar que para el acoplamiento se utilizara el método de transformador de acople para evitar los armónicos inyectados por el dispositivo de electrónica de potencia D-STATCOM.

5.3 Implementación del D-STATCOM en las barras 8, 11, 14

En esta sección se realizará la implementación de tres dispositivos D-STATCOM de 30MVar en la barra 8, 40MVar en la barra 11 y 40MVar en la barra 14 para ser analizado el efecto de compensación del dispositivo; los efectos en los perfiles de tensión de las barras ya mencionadas y cómo afecta al sistema de distribución de la micro-red.

5.4 Implementación del D-STATCOM en las barras 8, 11, 14 y variación de carga

Para esta sección se estableció implementar mediante switches de bloques de control de Simulink la apertura ON/OFF de cargas variables

como de igual manera de los estados de ON/OFF del dispositivo D-STATCOM, con la finalidad de recrear una simulación de variación de carga en tiempo continuo. En el que se analizara el comportamiento del D-STATCOM ante variación de carga y la compensación de potencia reactiva para los perfiles de tensión de las barras más bajas del sistema.

6 ANÁLISIS DE RESULTADOS

Se escogieron tres barras del sistema con los perfiles de tensión más bajos, para ser evaluados con la compensación de potencia reactiva que nos ofrece el dispositivo D-STATCOM y también se realizó un análisis de como afectara las variaciones de carga en tiempo continuo a los perfiles de tensión en las barras 8, 11, 14 del sistema ya implementado el D-STATCOM.

6.1 Micro-red de 14 barras

Los datos del sistema de distribución de prueba de una micro-red de 14 barras se detallan a continuación en la siguiente Tabla 3, estos valores de perfiles de tensión de las diferentes barras se encuentran en valores P.U sin la implementación del D-STATCOM, el sistema contiene una potencia base de ($S_{base} = 100\text{MVA}$) y un voltaje base de ($V_{base} = 138\text{ kV}$).

Tabla 3. Perfiles de tensión de la micro-red de 14 Barras.

Barras	Voltajes P. U
1	1.0501
2	1.0222
3	0.9998
4	1.0056
5	1.0016
6	0.9809
7	0.9541

8	0.9441
9	0.9691
10	0.9599
11	0.9214
12	0.9236
13	0.9231
14	0.8647

Tabla 4. Valores de generación de la micro-red de 14 Barras.

Generadores	Potencia (MW)	Potencia Reactiva (MVar)
1	232.39	-16.55

Tabla 5. Valores de generación de la micro-red de 14 Barras.

Generadores	Potencia (MW)	Potencia Reactiva (MVar)	
		Min	Max
2	40	-40	50
3	-	0	40
6	-	-6	24
8	-	-6	24

Tabla 6. Valores de transformadores de la micro-red de 14 Barras.

Transformadores	X (p.u)
4-7	0.20912
4-9	0.55618
5-6	0.25202

Tabla 7. Valores de las líneas en p.u de la micro-red.

Líneas	R (p.u)	X (p.u)	B (p.u)
1-2	0.01938	0.05917	0.05280
1-5	0.05403	0.22304	0.0492
2-3	0.04699	0.19797	0.0438
2-4	0.05811	0.17632	0.034

2-5	0.05695	0.17388	0.0346
3-4	0.06701	0.17103	0.0128
4-5	0.01335	0.04211	0
6-11	0.09498	0.1989	0
6-12	0.12291	0.25581	0
6-13	0.06615	0.13027	0
7-8	0	0.17615	0
7-9	0	0.11001	0
9-10	0.03181	0.0845	0
9-14	0.12711	0.27038	0
10-11	0.08205	0.19207	0
12-13	0.22092	0.19988	0
13-14	0.17093	0.34802	0

Tabla 8. Valores de cargas de la micro-red.

Load	MW	MVar
Barra 2	35.70	13.60
Barra 3	120.2	19.00
Barra 4	47.80	-3.90
Barra 5	7.60	1.60
Barra 6	11.20	7.50
Barra 9	69.50	34
Barra 10	59	-40
Barra 11	135.0	50.3
Barra 12	81.00	49.50
Barra 13	160.0	-60
Barra 14	110.9	2.50

En la Figura 11 se detallan gráficamente los valores en P.U de los perfiles de tensión de la micro-red en su estado original.

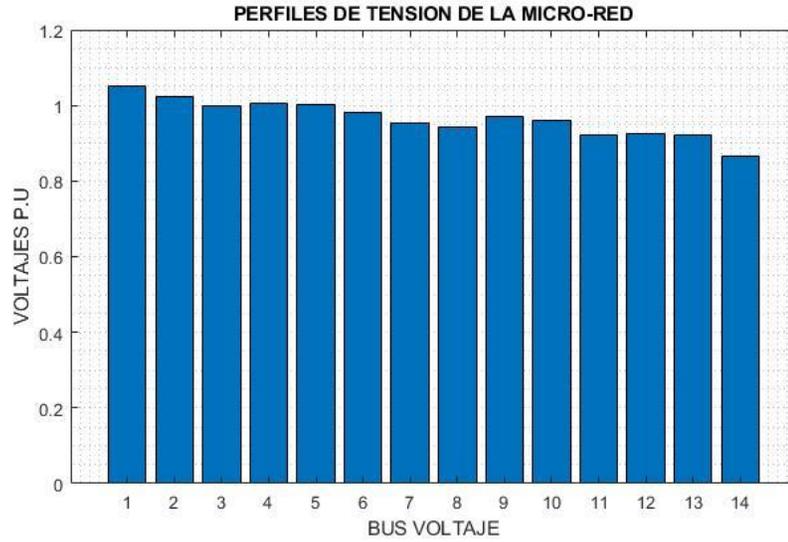


Figura 11. Perfiles de tensión de la micro-red de 14 Barras.

6.2 Caso 1: Barra 8

En esta sección se determinó que se necesita de un D-STATCOM de 30MVar de capacidad, a un voltaje de 25 Kv conectado a la barra 8, con el cual se obtiene un mejoramiento de tensión y tolerancia ante variación de cargas futuras en el tiempo.

En la Figura 13 se puede observar como el dispositivo D-STATCOM mejora los perfiles de tensión de la micro-red y tolera variaciones de carga conectados a la barra 8.

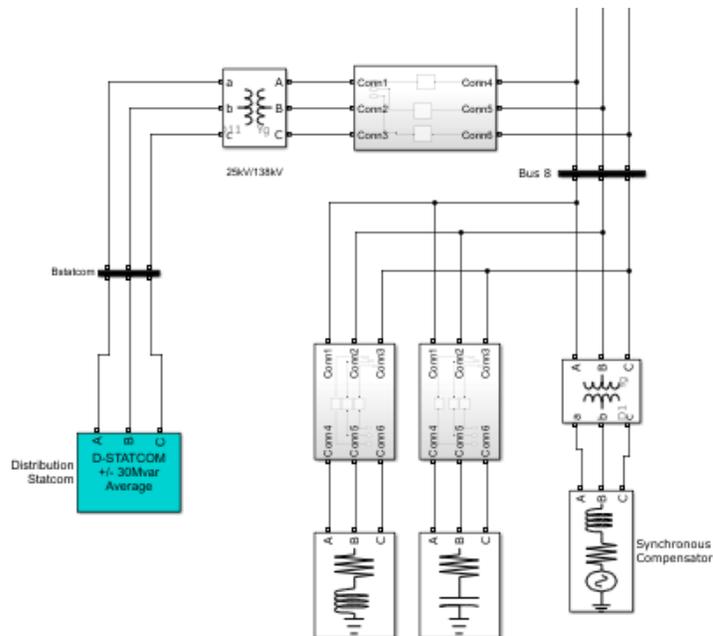


Figura 12. Simulación del D-STATCOM 30Mvar en la barra 8.

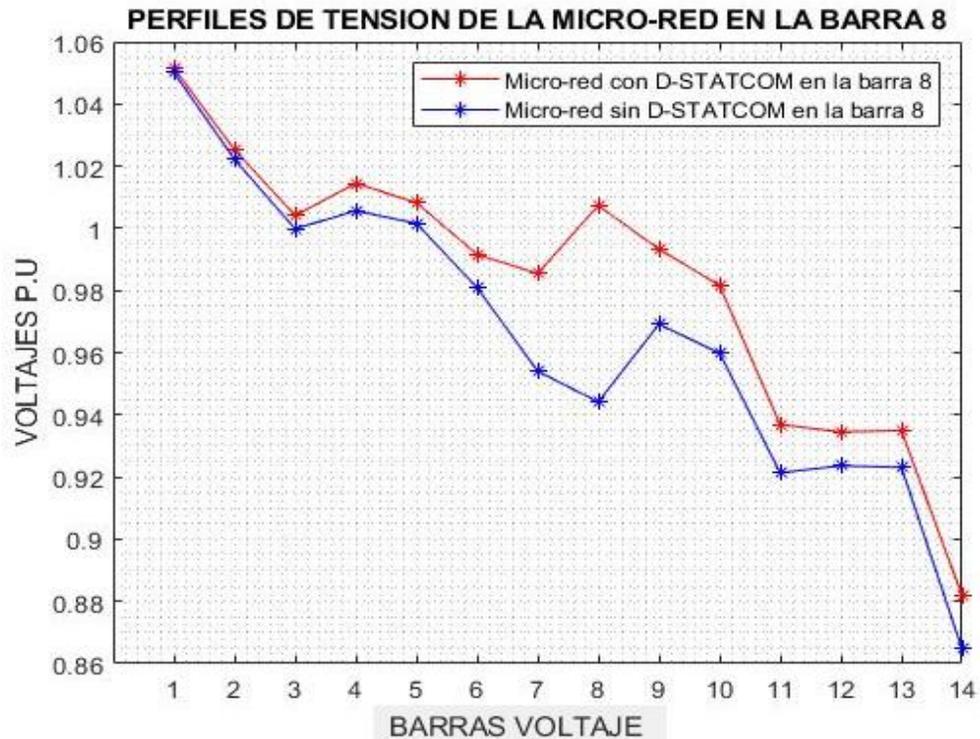


Figura 13. Perfiles de Tensión de la micro-red sin D-STATCOM vs D-STATCOM en la barra 8.

En los resultados obtenidos de la Figura 14 se puede analizar los siguientes comportamientos:

6.2.1 Escenario 1

Para $0 \leq t < 550\text{ms}$ nuestra micro-red se encuentra sin la implementación del D-STATCOM.

6.2.2 Escenario 2

Para $550\text{ms} \leq t < 1000\text{ms}$ a nuestro modelo de la micro-red se conecta una carga variable, sin la implementación del D-STATCOM.

6.2.3 Escenario 3

Para $1000\text{ms} \leq t < 1550\text{ms}$ al modelo de la micro-red en la barra se conecta el dispositivo D-STATCOM, obteniendo un mejoramiento de tensión en la barra mencionada.

6.2.4 Escenario 4

Para $1550\text{ms} \leq t < 2200\text{ms}$ el modelo de la micro-red cuenta con el dispositivo D-

STATCOM en pleno funcionamiento y se incrementa otra carga variable a la barra 8, pese a tener 2 cargas variables nuestro sistema el D-STATCOM no presenta ningún problema y mantiene el perfil de tensión en valores permisibles.

6.2.5 Escenario 5

Para $2200\text{ms} \leq t < 2600\text{ms}$ en este caso se desactiva 1 carga variable del sistema, se pudo observar que el comportamiento del D-STATCOM no es alterado, conservando su operación y compensación al perfil de tensión ante variación de carga.

6.2.6 Escenario 6

Para $2600\text{ms} \leq t \leq 5000\text{ms}$ en este lapso se observa un comportamiento de conexión y desconexión de carga asimilando un incremento o decremento de carga, con el objetivo de analizar el efecto que causa en el D-STATCOM y

como el dispositivo compensaría el perfil de tensión en la barra 8.

En la Tabla 9 se detallan los resultados del perfil de tensión en función al tiempo y cargas variables de la barra 8 de la micro-red.

Tabla 9. Datos del perfil tensión de la barra 8

Tiempo (t) ms	Voltaje p.u
0 – 550	0.9441

550-1000	0.9353
1000-1550	0.9975
1550-2200	0.9651
2200-2600	0.9975
2600-3550	1.007
3550-4500	0.9651
4500-5000	1.007

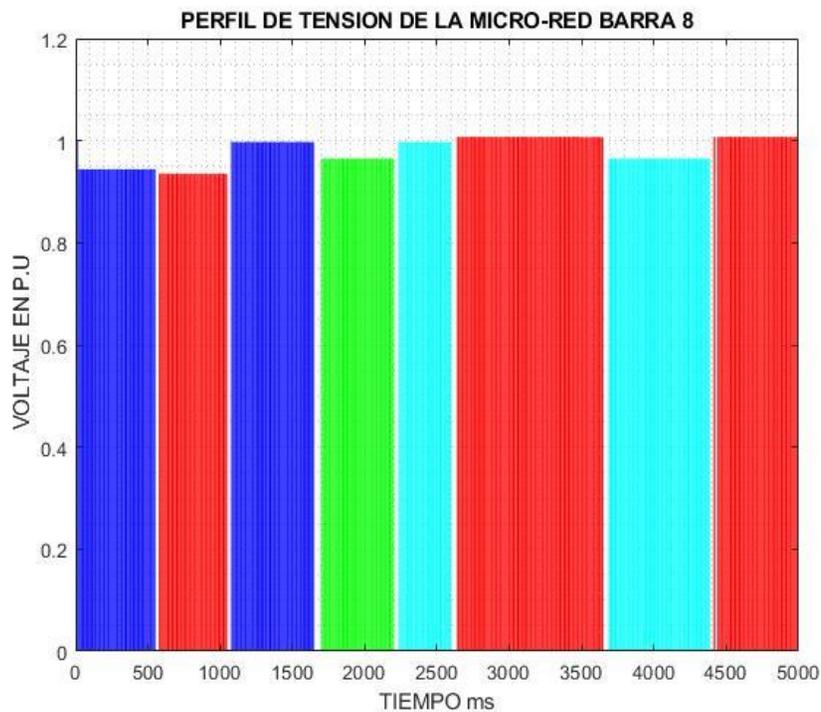


Figura 14. Perfil de tensión de la barra 8 de la micro-red, usando D-STATCOM y cargas variables.

6.3 Caso 2: Barra 11

El resultado que nos arroja nuestro modelo de la barra 11 de la micro-red se determinó que se debe colocar un D-STATCOM de 30MVar, a un voltaje de 25 kV, con esta capacidad de potencia podremos mejorar el perfil de tensión y tolerar variaciones de cargas en el transcurso del tiempo.

Tabla 10. Datos del perfil tensión de la barra 11.

Tiempo (t) ms	Voltaje p.u	Carga MVA
0 – 550	0.9208	144.0663
550-1500	0.8803	173.613
1500-2000	0.8256	221.571
2000-2500	0.8803	173.613
2500-3500	0.959	144.0663

3500-4200	0.856	221.5718
4200-5000	0.9594	144.0663

En la Tabla 10 se detalla los resultados del perfil de tensión en función al tiempo y cargas variables de la barra 11 de la micro-red.

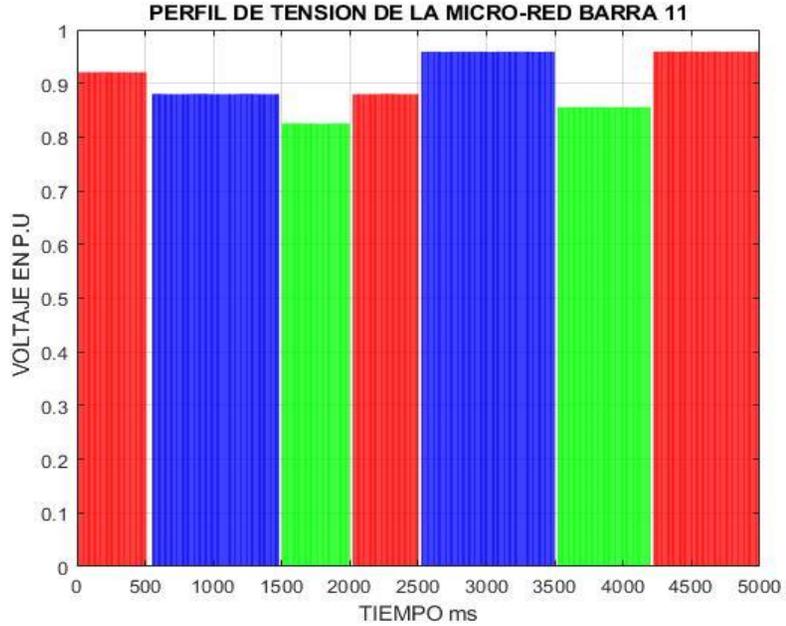


Figura 15. Perfil de tensión de la barra 11 de la micro-red, usando D-STATCOM y cargas variables.

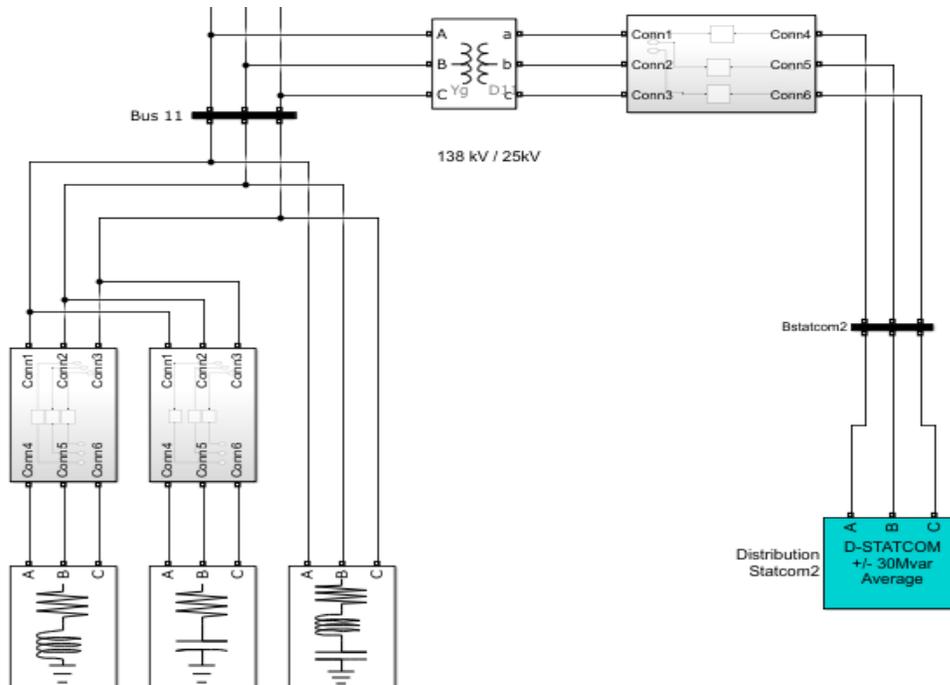


Figura 16. Simulación del D-STATCOM 30Mvar en la barra 11.

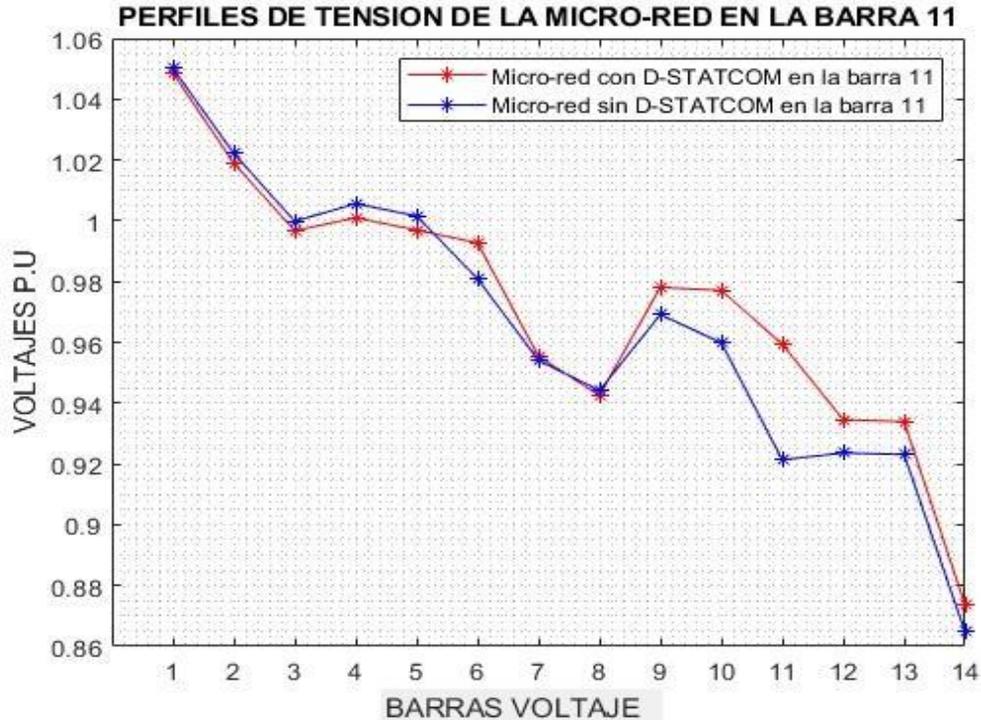


Figura 17. Perfiles de tensión de la micro-red con la implementación del D-STATCOM en la barra 11.

En la Figura 17 se puede observar el mejoramiento de los perfiles de tensión al implementar el D-STATCOM en la barra 11.

6.3.1 Escenario 1

En los resultados obtenidos de la simulación del modelo de la micro-red en la barra 11, cabe mencionar que durante el tiempo de $t=0$ a $t=2.6$, el sistema se encuentra sin la implementación de D-STATCOM, lo cual se puede observar que el perfil de tensión en la barra 11 baja considerablemente.

6.3.2 Escenario 2

Para el tiempo $t=2.6$ a $t=5.00$ el D-STATCOM entra en funcionamiento aportando al sistema potencia reactiva y mejorando el perfil de tensión en la barra 11.

En la Figura 17 se puede observar el comportamiento del D-STATCOM conectado a la barra 11 y su efecto hacia las otras barras compensando los perfiles de tensión de todo el sistema vs al sistema de la micro-red sin la implementación del D-STATCOM.

En la barra 11 se analizó el perfil de tensión con la inclusión de cargas variables, con el objetivo de observar el comportamiento del D-STATCOM ante cambios de carga, como se puede observar en la Figura 18 y Figura 19 las diferentes variaciones de tensión y cargas en la barra 11.

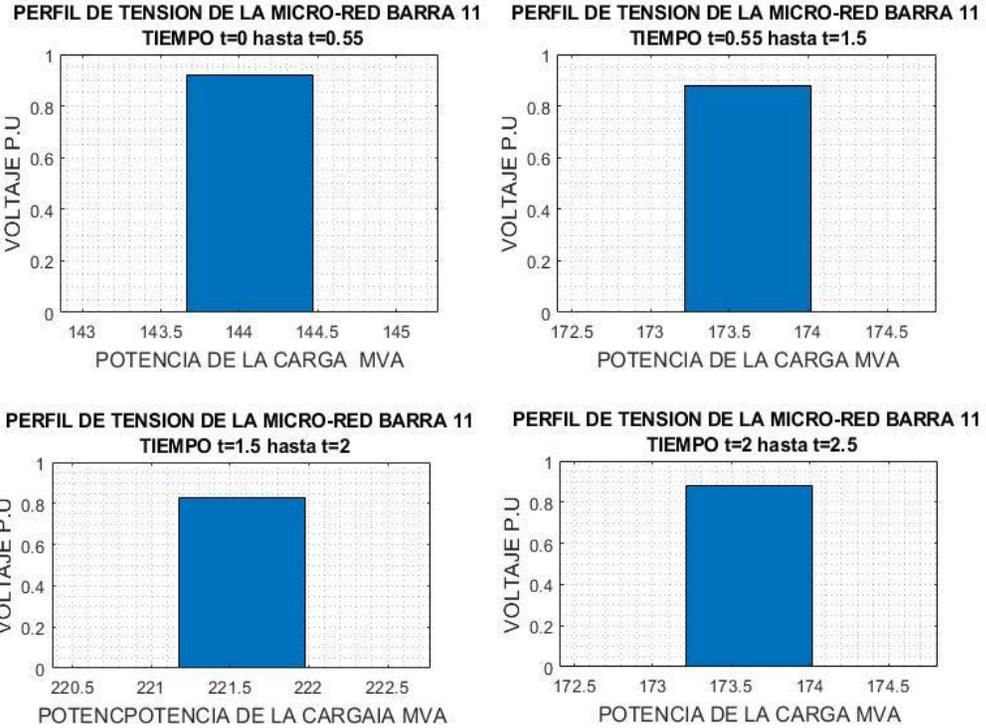


Figura 18. Perfil de Tensión vs Potencia MVA de la barra 11 para $0 \leq t \leq 2.5$.

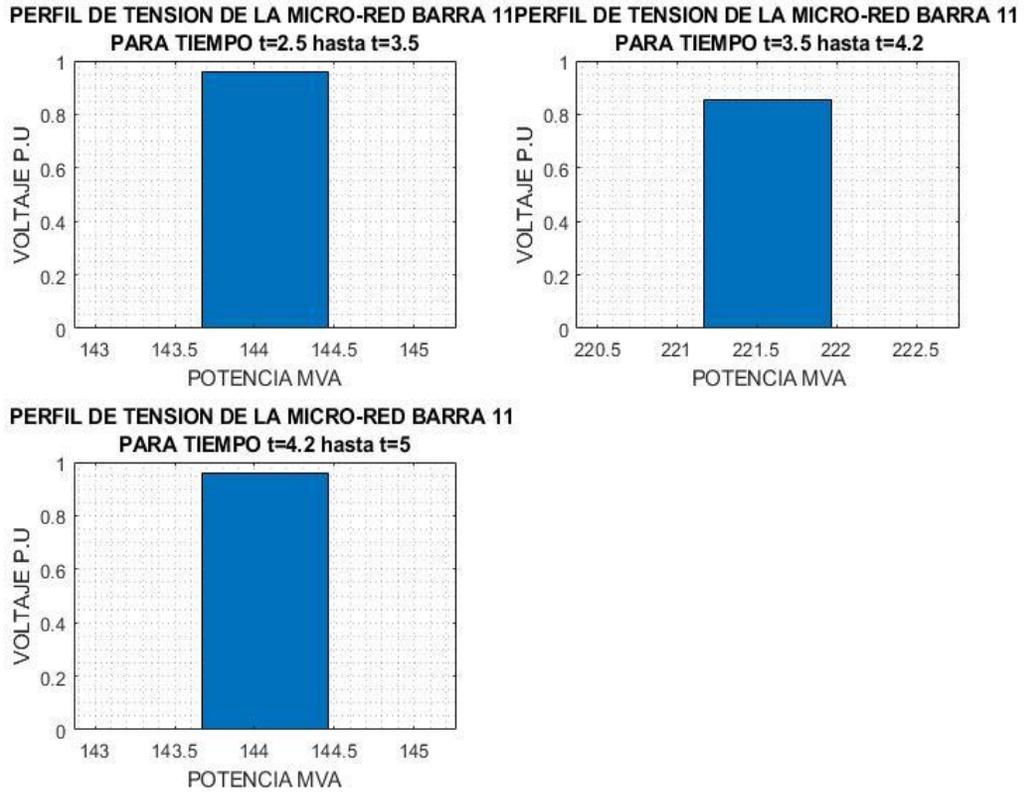


Figura 19. Perfil de Tensión vs Potencia MVA de la barra 11 para $2.5 \leq t \leq 5.0$.

6.4 Caso 3: Barra 14

En la Figura 20 se puede observar como el dispositivo D-STATCOM mejora los perfiles de tensión de la micro-red y tolera variaciones de carga conectados a la barra 14.

En la Figura 22 se puede analizar el comportamiento del D-STATCOM conectado en paralelo a la barra 14 y como afecta a los diferentes perfiles de tensión de la micro-red.

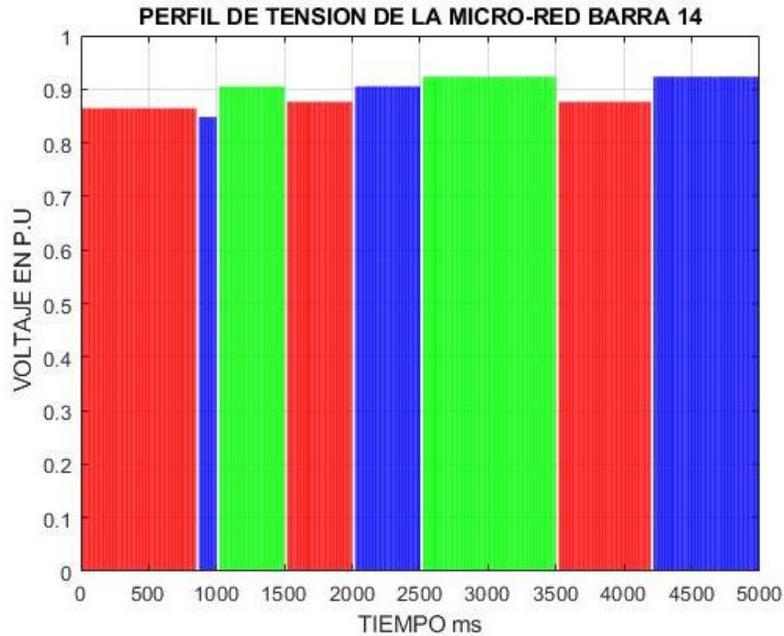


Figura 20. Perfil de tensión de la barra 14 de la micro-red, usando D-STATCOM y cargas variables.

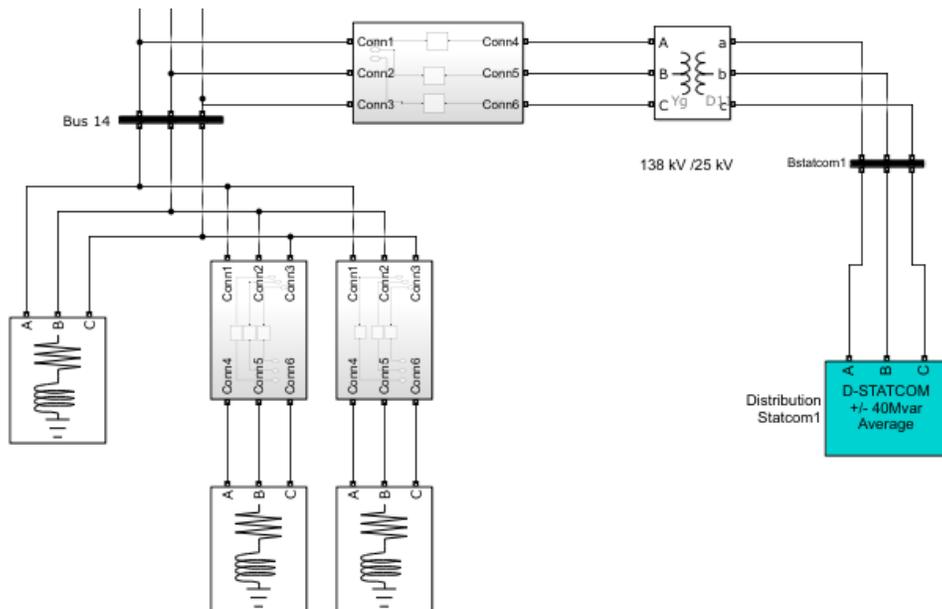


Figura 21. Simulación del D-STATCOM 40Mvar en la barra 14.

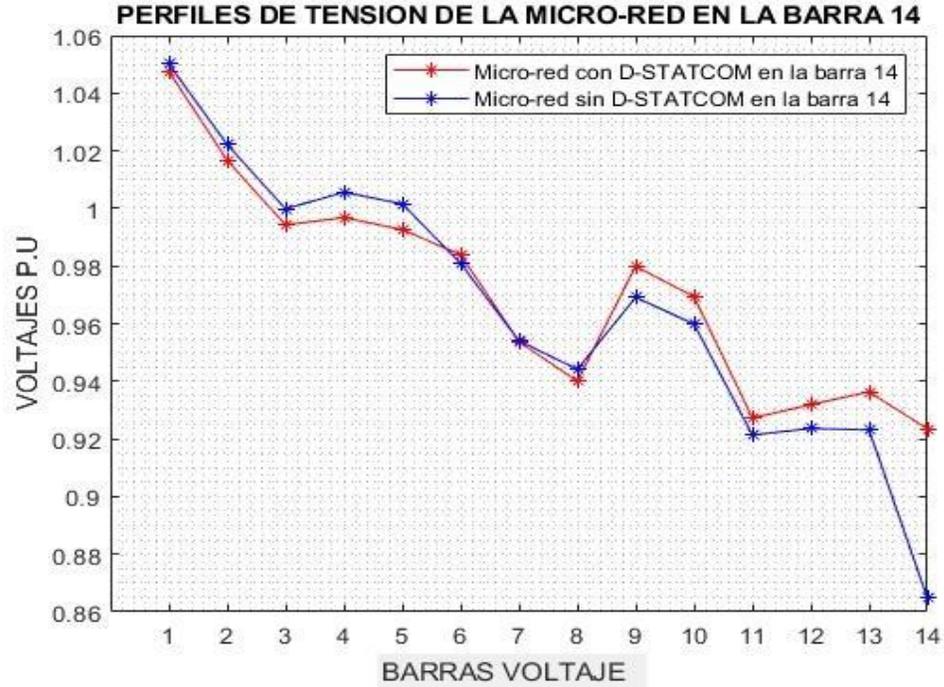


Figura 22. Perfiles de Tensión de la micro-red sin D-STATCOM vs D-STATCOM en la barra 14.

El resultado que nos arroja el modelo de la micro-red en la barra 14 se determinó que se debe colocar un D-STATCOM de 40MVar, a un voltaje de 25 kV.

Tabla 11. Datos de perfil de tensión de la barra 14

Tiempo (t)	Voltaje p.u	Carga MVA
0 – 0.85	0.8646	110.9282
0.85 – 1.00	0.8482	119.5114
1.00-1.50	0.9054	119.5114
1.50-2.00	0.8763	135.405

2.00-2.50	0.9054	119.5114
2.50-3.50	0.9235	110.9282
3.50-4.20	0.8763	135.405
4.20-5.00	0.9235	110.9282

En la Tabla 11 se detallan los resultados del perfil de tensión en función al tiempo y cargas variables de la barra 14 de la micro-red como se observa en la Figura 20.

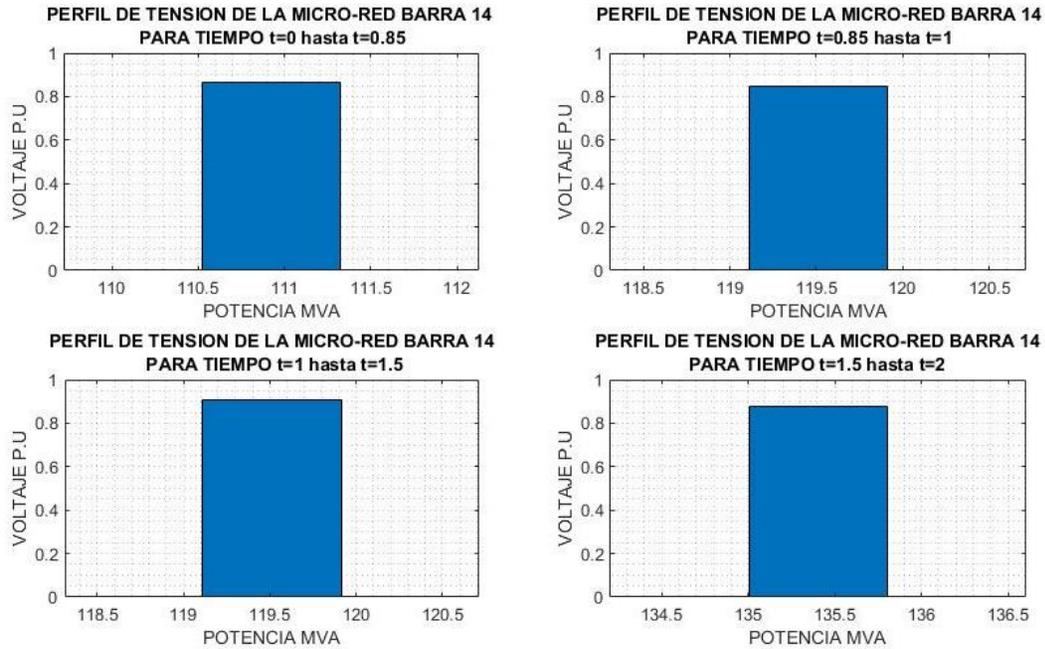


Figura 23. Perfil de Tensión vs Potencia MVA de la barra 14 para $0 \leq t \leq 2.0$.

En la Figura 23 se puede analizar los siguientes resultados obtenidos de perfil de tensión:

6.4.1 Escenario 1

Para $0 \leq t < 0.85$ la micro-red se encuentra sin la implementación del D-STATCOM, por lo que el perfil de tensión se encuentra por debajo de 0.9 p.u.

6.4.2 Escenario 2

Para $0.85 \leq t < 1.00$ a nuestro modelo de la micro-red se conecta a la barra 14 una carga variable, sin la implementación del D-STATCOM.

6.4.3 Escenario 3

Para $1.00 \leq t < 1.50$ se conecta el dispositivo D-STATCOM, obteniendo un mejoramiento de 0.9054 en p.u de tensión en la barra 14, para este caso se encuentran dos cargas conectadas a la barra; la primera carga inicial de la

micro-red entre $0 \leq t < 0.85$ y la carga variable conectada en $0.85 \leq t < 1.00$.

6.4.4 Escenario 4

Para $1.50 \leq t < 2.00$ el modelo de la micro-red cuenta con el dispositivo D-STATCOM el cual se encuentra en pleno funcionamiento y se incrementa otra carga variable a la barra 14, pese a presentar un incremento de carga en la barra el D-STATCOM presenta una tensión de 0.8763 en p.u, una tensión mayor que en caso de $0.85 \leq t < 1.00$ en el cual la tensión cae hasta 0.8482 en p.u.

En la Figura 24 se puede analizar los siguientes resultados obtenidos de perfil de tensión:

6.4.5 Escenario 5

Para el caso de $2.00 \leq t \leq 5.00$ el modelo toma un comportamiento de conexión y desconexión de carga asimilando un incremento o decremento de carga, con el objetivo de analizar el

efecto que causa en el D-STATCOM y como el dispositivo compensaría el perfil de tensión en la barra 14.

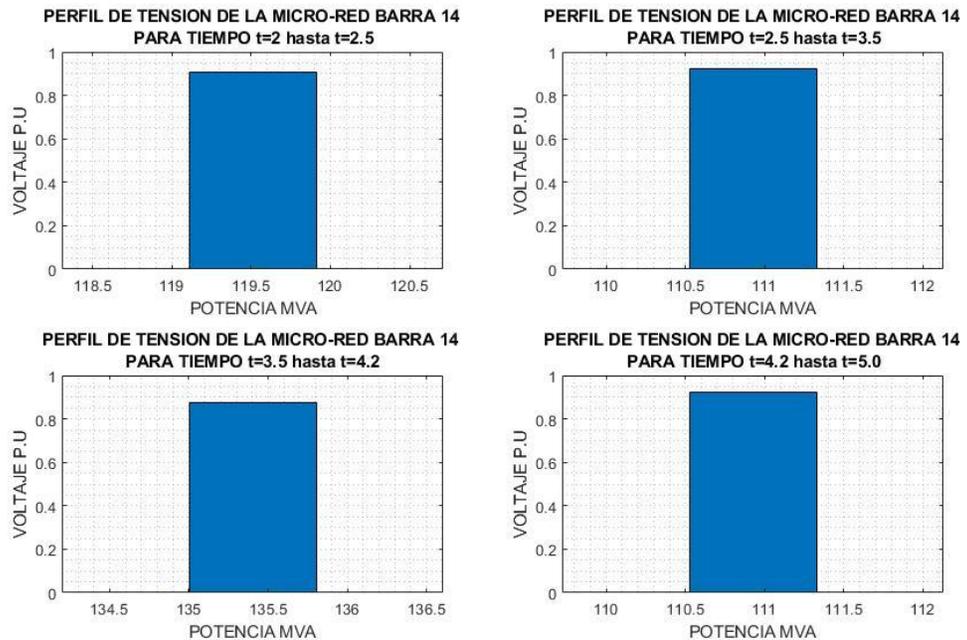


Figura 24. Perfil de Tensión vs Potencia MVA de la barra 14 para $2.0 \leq t \leq 5.0$.

7 CONCLUSIONES

El D-STATCOM pudo ser simulado y modelado mediante la plataforma MATLAB y Simulink de manera efectiva y precisa en las barras de estudio para mejorar los perfiles de tensión.

En todos los casos de estudios, se logró mediante la inyección de potencia reactiva del D-STATCOM y el método de acople de transformador un mejoramiento de los perfiles de tensión en el sistema, ondas perfectamente sinusoidales y eliminación de armónicos perjudiciales a la red.

Una ventaja del método de transformador de acople para el D-STATCOM es el aporte de potencia reactiva a la línea de distribución, obteniendo mejores

resultados para la compensación en las líneas.

Cada escenario nos proyectó un mejoramiento del perfil de tensión, gracias a la inyección de potencia reactiva del D-STATCOM y también se puede observar cómo es el comportamiento de un D-STATCOM ante una variación de carga en el transcurso del tiempo.

Los valores de capacidad de D-STATCOM fueron analizados respectivamente y simulados para conseguir ondas de corriente y voltajes sinusoidales perfectas y un aumento en los perfiles de tensión.

Una desventaja del D-STATCOM es los componentes semiconductores, estos

semiconductores ocasionan armónicos los cuales pueden ser inyectados a la línea de distribución si no se realiza un filtro de armónicos o método de acople.

8 TRABAJOS FUTUROS

Con el fin de dejar propuestas para trabajos futuros se puede proponer un modelo de optimización en cuanto a costos de implementación, y óptima ubicación de los dispositivos D-STATCOM.

Investigar y modelar otros tipos de acople para conectar el D-STATCOM a la línea de distribución, que indiquen menos costos y mayor compensación.

Simular un modelo con varias micro-red conectadas a un sistema de distribución eléctrica, implementando compensación de potencia reactiva y minimizar pérdidas.

Programar un método para la micro-red ante fallas monofásicas, bifásicas y trifásicas.

9 REFERENCIAS

- [1] L. Meng, M. Savaghebi, F. Andrade, J. C. Vasquez, and J. M. Guerrero, "Microgrid Central Controller Development and Hierarchical Control Implementation in the Intelligent MicroGrid Lab of Aalborg University," *2015 IEEE Appl. Power Electron. Conf. Expo.*, pp. 2585–2592, 2015.
- [2] B. Zhao, X. Zhang, and J. Chen, "Integrated Microgrid Laboratory System," *2013 IEEE Power Energy Soc. Gen. Meet.*, p. 1, 2013.
- [3] T. Hailu, L. Mackay, L. Ramirez-elizondo, J. Gu, and J. A. Ferreira, "Voltage Weak DC Microgrid," *2015 IEEE First Int. Conf. DC Microgrids*, pp. 138–143, 2015.
- [4] C. Opathella, "Prototype Microgrid Design and Results," *2018 IEEE Electr. Power Energy Conf.*, pp. 1–5, 2018.
- [5] P. M. Saradva, K. T. Kadivar, M. H. Pandya, and A. J. Rana, "Application of D-STATCOM to control power flow in distribution line," *2016 Int. Conf. Energy Effic. Technol. Sustain. ICEETS 2016*, pp. 479–484, 2016.
- [6] A. Varshney, "Comparison of Different Topologies of Fuzzy Logic Controller to Control D-STATCOM," *2016 3rd Int. Conf. Comput. Sustain. Glob. Dev.*, pp. 2492–2497, 2016.
- [7] S. Ziaeinejad and A. Mehrizi-sani, "Design Tradeoffs in Selection of the DC-Side Voltage for a D-STATCOM," vol. 33, no. 6, pp. 3230–3232, 2018.
- [8] K. Somsai and T. Kulworawanichpong, "Steady-State Performance of D-STATCOM for Load Voltage Regulation," *2012 Asia-Pacific Power Energy Eng. Conf.*, pp. 1–4, 2012.
- [9] L. Yu, J. Zhang, and C. Jiang, "D-STATCOM control based on self-tuning PI with neural networks," in *China International Conference on Electricity Distribution, CIGRE, 2012*, pp. 5–6.
- [10] R. Pandey, "Power quality improvement using CHBMLI based," pp. 27–32, 2015.

- [11] W. Rohouma and R. S. Balog, "Capacitor-Less D-STATCOM for Reactive Power Compensation," *2018 IEEE 12th Int. Conf. Compat. Power Electron. Power Eng. (CPE-POWERENG 2018)*, pp. 1–6.
- [12] K. R. Padiyar; Anil M. Kulkarni, "1.1 Present Status of Grid Operation," pp. 1–18, 2019.
- [13] A. Bergson, "1. Introduction," *Sov. Natl. Income Prod. 1937*, pp. 1–16, 2019.
- [14] J. M. Guerrero, J. C. Vasquez, J. Matas, L. G. De Vicuña, and M. Castilla, "Hierarchical control of droop-controlled AC and DC microgrids - A general approach toward standardization," *IEEE Trans. Ind. Electron.*, vol. 58, no. 1, pp. 158–172, 2011.
- [15] A. Sallam and O. Malik, "Microgrids and Smart Grids," *Electr. Distrib. Syst. Second Ed.*, pp. 553–580, 2018.
- [16] G. Strbac, N. Hatziargyriou, J. P. Lopes, C. Moreira, A. Dimeas, and D. Papadaskalopoulos, "Microgrids: Enhancing the resilience of the European megagrid," *IEEE Power Energy Mag.*, vol. 13, no. 3, pp. 35–43, 2015.
- [17] W. Rohouma, R. S. Balog, A. A. Peerzada, and M. M. Begovic, "D-STATCOM for harmonic mitigation in low voltage distribution network with high penetration of nonlinear loads," *Renew. Energy*, vol. 145, pp. 1449–1464, 2020.
- [18] V. M. Awasth and V. A. Huchche, "Reactive power compensation using D-STATCOM," *2016 Int. Conf. Energy Effic. Technol. Sustain. ICEETS 2016*, pp. 583–585, 2016.
- [19] "D-STATCOM: Compensador de potencia reactiva Descripción," p. 2198557, 1997.
- [20] P. Bapaiah, "Power Quality Improvement by using DSTATCOM," vol. 2, pp. 1–12, 2013.
- [21] L. Bruno, "Journal of Chemical Information and Modeling," *J. Chem. Inf. Model.*, vol. 53, no. 9, pp. 1689–1699, 2019.
- [22] "Tema: MEJORAMIENTO DE LOS PERFILES DE TENSIÓN EN SISTEMAS DE DISTRIBUCIÓN CON LA INCLUSIÓN DE UN COMPENSADOR ESTÁTICO DE POTENCIA REACTIVA (DSTATCOM)."
- [23] G. T. M. ÁVILA, "Universidad politecnica salesiana," p. 30204, 2013.
- [24] J. Bernardo and C. Quintero, "Compensación de potencia reactiva D-STATCOM : Innovación y Desarrollo."
- [25] C. Wang, X. Yin, M. Wen, J. Liu, Q. Xiong, and B. Zhang, "Structure and parameters design of output LC filter in D-STATCOM," *2010 Int. Conf. Power Syst. Technol. Technol. Innov. Mak. Power Grid Smarter, POWERCON2010*, pp. 1–6, 2010.
- [26] J. G. Prasad Reddy and K. R. Reddy, "Design and simulation of Cascaded H-bridge multilevel inverter based DSTATCOM for

- compensation of reactive power and harmonics,” *2012 1st Int. Conf. Recent Adv. Inf. Technol. RAIT-2012*, pp. 737–743, 2012.
- [27] A. Cetin and M. Ermis, “VSC-Based D-STATCOM With Selective Harmonic Elimination,” *IEEE Trans. Ind. Appl.*, vol. 45, no. 3, pp. 1000–1015, 2009.
- [28] U. Musa, A. A. Mati, and T. Yuvaraj, “Application of bacterial foraging algorithm in the allocation of DSTATCOM in 50-bus canteen feeder,” vol. 18, no. 1, pp. 26–35, 2019.
- [29] Y. Wang, J. Tang, and X. Qiu, “Analysis and control of D-STATCOM under unbalanced voltage condition,” *Proc. 2011 Int. Conf. Mechatron. Sci. Electr. Eng. Comput. MEC 2011*, pp. 1623–1625, 2011.
- [30] X. L. Yao, L. F. Luo, J. Z. Xu, and W. Di Liao, “LCL output filter design and the influence to the D-STATCOM compensation characteristic,” *2011 Int. Conf. Electron. Commun. Control. ICECC 2011 - Proc.*, pp. 313–316, 2011.
- [31] P. S. Sensarma, K. R. Padiyar, and V. Ramanarayanan, “Analysis and performance evaluation of a distribution STATCOM for compensating voltage fluctuations,” *IEEE Trans. Power Deliv.*, vol. 16, no. 2, pp. 259–264, 2001.
- [32] Manitoba, “IEEE 14 bus system,” *IEEE 14 Bus Syst. Tech. note*, vol. 0.00, pp. 0–5, 2014.
- [33] S. Elango and E. C. Sekaran, “Mitigation of voltage sag using Distribution Static Compensator (D-Statcom),” *Proc. 2011 Int. Conf. Process Autom. Control Comput. PACC 2011*, 2011.
- [34] W. Freitas, E. Asada, A. Morelato, and W. Xu, “Dynamic improvement of induction generators connected to distribution systems using a DSTATCOM,” *PowerCon 2002 - 2002 Int. Conf. Power Syst. Technol. Proc.*, vol. 1, pp. 173–177, 2002.
- [35] A. S. Fuentesfria, “Análisis preliminar del Límite de Potencia Eólica para grandes perturbaciones utilizando aerogeneradores de velocidad fija,” no. December 2013, 2016.

10 ESTADO DEL ARTE

MEJORAMIENTO DE LOS PERFILES DE TENSION EN UN SISTEMA DE DISTRIBUCIÓN DE UNA MICRO-RED USANDO COMPENSADORES EN SERIE D-STATCOM																					
DATOS				TEMÁTICA					FORMULACIÓN DEL PROBLEMA				RESTRICCIONES DEL PROBLEMA			PROPUESTAS PARA RESOLVER EL PROBLEMA			SOLUCIÓN		
ITEM	AÑO	NOMBRE DEL ARTICULO	CITAS	MICRO-RED	D-STATCOM	COMPENSACIÓN DE POTENCIA REACTIVA	ARMONICOS EN LA MICRO-RED	REDES DE DISTRIBUCIÓN	METODOS DE ACOUPLE DEL D-STATCOM	MEJORAMIENTO DE LOS PERFILES DE TENSION	COMPENSACIÓN REACTIVA	DISTORCIÓN DE DE ARMONICOS EN LA MICRO-RED	CAPACIDAD DE POTENCIA REACTIVA	ACOPLAMIENTO DEL D-STATCOM	NIVELES DE TENSION	IMPLEMENTACIÓN DEL D-STATCOM	METODOS DE ACOUPLE PARA EL D-STATCOM	SIMULACIONES	SIMULACIÓN DE LA MICRO-RED	INCORPORACIÓN DEL D-STATCOM	CAPACIDAD MAXIMA DEL D-STATCOM ANTE VARIACIONES DE CARGA
1	2020	D-STATCOM for harmonic mitigation in low voltage distribution network with high penetration of nonlinear loads	1				☒				☒	☒								☒	
2	2019	1. 1 Present Status of Grid Operation	1	☒				☒													
3	2019	1. Introduction	1	☒				☒											☒		
4	2019	MEJORAMIENTO DE LOS PERFILES DE TENSION EN SISTEMAS DE DISTRIBUCIÓN CON LA INCLUSIÓN DE UN COMPENSADOR ESTÁTICO DE POTENCIA REACTIVA (DSTATCOM)	2		☒	☒	☒	☒		☒		☒			☒			☒		☒	
5	2019	Compensación de potencia reactiva D-STATCOM : Innovación y Desarrollo	2		☒	☒		☒		☒	☒			☒						☒	
6	2019	Application of bacterial foraging algorithm in the allocation of DSTATCOM in 50-bus canteen feeder	1		☒	☒				☒						☒					☒
7	2019	Journal of Chemical Information and Modeling	1		☒	☒		☒	☒		☒				☒						☒
8	2018	Prototype Microgrid Design and Results	1	☒				☒		☒											
9	2018	Design Tradeoffs in Selection of the DC-Side Voltage for a D-STATCOM	1		☒				☒					☒							
10	2018	Capacitor-Less D-STATCOM for Reactive Power Compensation	1		☒	☒			☒		☒	☒	☒			☒	☒				☒
11	2018	Microgrids and Smart Grids	1	☒																	

30	2011	Mitigation of voltage sag using Distribution Static Compensator (D-Statcom)	1		☒	☒		☒			☒	☒									
31	2010	Structure and parameters design of output LC filter in D-STATCOM	1		☒	☒	☒		☒		☒	☒		☒			☒		☒		
32	2009	VSC-Based D-STATCOM With Selective Harmonic Elimination	2		☒		☒				☒	☒		☒	☒	☒		☒		☒	
33	2002	Dynamic improvement of induction generators connected to distribution systems using a DSTATCOM	1		☒				☒				☒	☒						☒	☒
34	2001	Analysis and performance evaluation of a distribution STATCOM for compensating voltage fluctuations [J], IEEE Trans	2		☒	☒		☒		☒			☒			☒					☒
35	1997	D-STATCOM: Compensador de potencia reactiva Descripción	1		☒	☒		☒			☒			☒	☒				☒	☒	
			CANTIDAD	10	22	14	7	14	6	7	15	8	5	11	9	8	6	7	7	11	6

11 RESUMEN DE INDICADORES

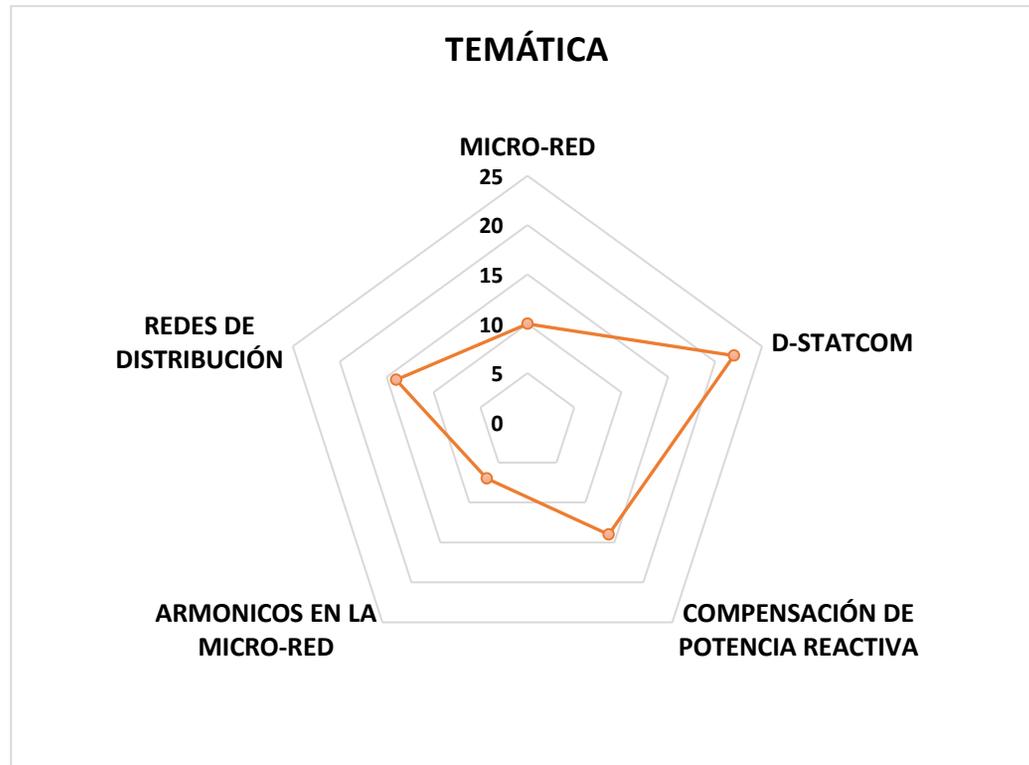


Figura 25. Resumen e indicador de la temática.

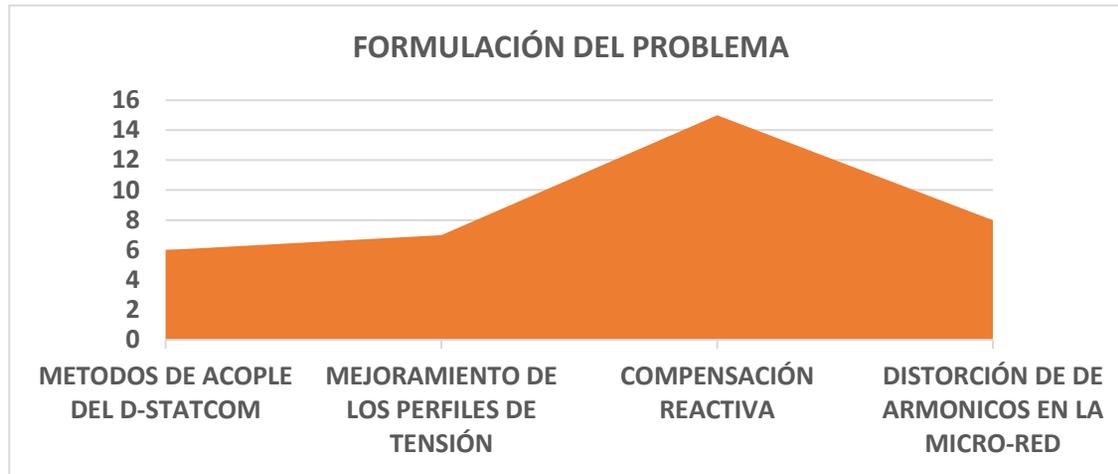


Figura 26. Indicador de formulación del problema.

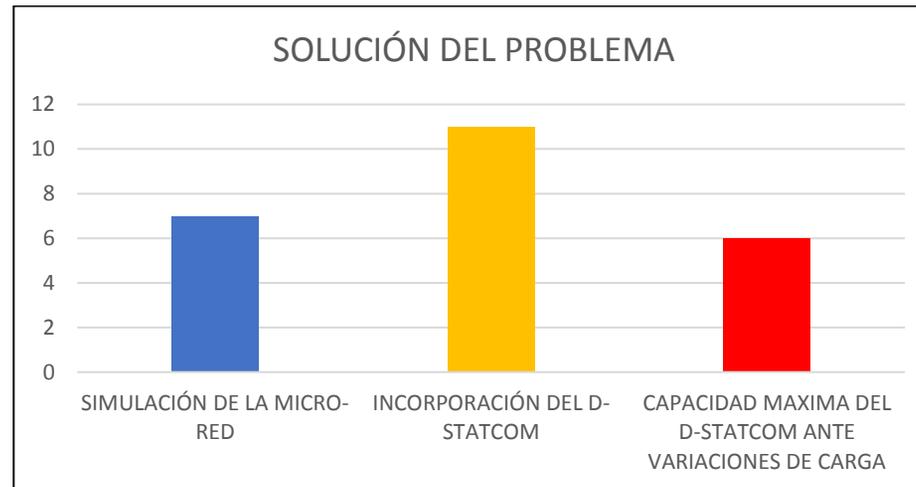


Figura 27. Indicador de solución.