

Tema:
**MEJORAMIENTO DE LOS PERFILES DE TENSIÓN EN SISTEMAS DE
DISTRIBUCIÓN CON LA INCLUSIÓN DE UN COMPENSADOR ESTÁTICO
DE POTENCIA REACTIVA (DSTATCOM)**

**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 SISTEMAS DE
DISTRIBUCIÓN CON LA INCLUSIÓN DE UN COMPENSADOR ESTÁTICO
DE POTENCIA REACTIVA (DSTATCOM)**

**AUTOR:
CRISTIAN FERNANDO EGÜEZ MENDOZA**

**DIRECTOR:
ROGELIO ALFREDO ORIZONDO MARTÍNEZ**

Quito, Enero 2019

Cristian Fernando Egüez Mendoza

MEJORAMIENTO DE LOS PERFILES DE TENSION EN SISTEMAS DE DISTRIBUCIÓN CON LA INCLUSIÓN DE UN COMPENSADOR ESTÁTICO DE POTENCIA REACTIVA (DSTATCOM)

Universidad Politécnica Salesiana

Ingeniería Eléctrica

Breve reseña de autores e información de contacto:



Cristian Fernando Egüez Mendoza (Y'1991-M'08).

Nació en Quito-Ecuador el 3 de agosto del 1991 realizo sus estudios de bachillerato en el Colegio Técnico Don Bosco con la especialidad Eléctrico-Electrónica. Egresado de la carrera de Ingeniería Eléctrica de la Universidad Politécnica Salesiana. Su trabajo se basa en Mejorar perfiles de Tensión en Sistemas de Distribución.

ceguez@est.ups.edu.ec

Dirigido por:

Rogelio Alfredo Orizondo Martínez (Y'1972).

Nació en Caracas, Venezuela. Recibió su título en Ingeniería Eléctrica por la Universidad Simón Bolívar en 1999 y el MSc. en la Universidad Simón Bolívar en 2006. Actualmente es docente en la Universidad Politécnica Salesiana.

Sus áreas de investigación incluyen electrónica de potencia, especialmente FACTS, sistemas de puesta a tierra y protección catódica.

rorizondo@ups.edu.ec



Todos los derechos reservados:

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

DERECHOS
RESERVADOS
©2019 Universidad
Politécnica Salesiana
QUITO-ECUADOR

DECLARATORIA DE COAUTORÍA DEL DOCENTE TUTOR

Yo, Rogelio Alfredo Orizondo Martínez declaro que bajo mi dirección y asesoría fue desarrollado el trabajo de titulación (*Mejoramiento de los Perfiles de Tensión en Sistemas de Distribución con la Inclusión de un Compensador Estático de Potencia Reactiva (DSTATCOM)*) realizado por (Cristian Fernando Egüez Mendoza), obteniendo un producto que cumple con todos los requisitos estipulados por la Universidad Politécnica Salesiana para ser considerados como trabajo final de titulación.

Quito, Enero 2019



.....
Rogelio Alfredo Orizondo Martínez

Cédula de identidad:175742419-5

CESIÓN DE DERECHOS DE AUTOR

Yo, Cristian Fernando Egüez Mendoza, con documento de identificación N° 172112750-2, manifiesto mi voluntad y cedo a la Universidad Politécnica Salesiana la titularidad sobre los derechos patrimoniales en virtud de que soy autor/es del trabajo de grado/titulación intitulado: “Mejoramiento de los Perfiles de Tensión en Sistemas de Distribución con la Inclusión de un Compensador Estático de Potencia Reactiva (DSTATCOM)”, 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 impreso y digital a la Biblioteca de la Universidad Politécnica Salesiana.

Firma



Nombre: Cristian Fernando Egüez Mendoza

Cédula: 172112750-2

Fecha: /01/2019

ÍNDICE GENERAL

INTRODUCCIÓN	2
MARCO TEÓRICO.....	2
2.1 Elementos y principio básico de operación del DSTATCOM	2
2.2 Modo de control por corriente	3
2.3 Modo de control por tensión.....	4
2.4 Estructura del DSTATCOM.....	4
PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA	4
3.1 Flujo de potencia con la inclusión del DSTATCOM.....	4
3.2 Método del barrido iterativo	4
3.2.1 Barrido de corriente.....	5
3.2.2 Barrido de voltaje.....	5
3.3 Optimización mediante GAMS	6
3.3.1 Modelo matemático.....	6
3.3.2 Función objetivo	6
3.3.3 Restricciones.....	6
3.3.4 Dimensionamiento del DSTATCOM.....	7
ANÁLISIS DE LOS RESULTADOS	7
4.1 Sistema de 5 nodos.....	7
4.2 Sistema de 13 nodos.....	8
4.3 Sistema de 33 nodos.....	9
CONCLUSIONES	10
5.1 Trabajos futuros	11
REFERENCIAS	11
6.1. Matriz de estado del arte.....	15
6.2 Resumen e indicadores del estado del arte.....	25

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1. Red de Distribución con un DSTATCOM implementado.	2
Figura 2. Diagrama esquemático de un DSTATCOM y su punto de conexión al sistema eléctrico de potencia.	3
Figura 3. Dibujo esquemático de la operación del DSTATCOM.	3
Figura 4. DSTATCOM operando en los modos capacitivo e inductivo.....	3
Figura 5. Algoritmo del método de barrido iterativo.....	5
Figura 6. Barrido de corrientes.	5
Figura 7. Barrido de voltajes.	6
Figura 8. Sistema de 5 nodos.....	8
Figura 9. Perfil de voltaje sistema de 5 nodos sin compensación.	8
Figura 10. Comparación de los perfiles de voltaje sistema de 5 nodos con y sin compensación.	8
Figura 11. Sistema de 13 nodos.....	8
Figura 12. Perfil de voltaje sistema de 13 nodos sin compensación.	9
Figura 13. Comparación de los perfiles de voltaje sistema de 13 nodos con y sin compensación.	9
Figura 14. Sistema de 33 nodos.....	9
Figura 15. Perfil de voltaje sistema de 33 nodos sin compensación.	10
Figura 16. Comparación de los perfiles de voltaje sistema de 33 nodos con y sin compensación.	10

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1: Modos de operación del DSTATCOM.	3
Tabla 2: Flujo de potencia sistema de 5 nodos.....	8
Tabla 3: Flujo de potencia sistema de 5 nodos con compensación.	8
Tabla 4: Flujo de potencia sistema de 13 nodos.....	8
Tabla 5: Flujo de potencia sistema de 13 nodos con compensación.	9
Tabla 6: Flujo de potencia sistema de 33 nodos.....	9
Tabla 7: Flujo de potencia sistema de 33 nodos con compensación.	10

MEJORAMIENTO DE LOS PERFILES DE TENSIÓN EN SISTEMAS DE DISTRIBUCIÓN CON LA INCLUSIÓN DE UN COMPENSADOR ESTÁTICO DE POTENCIA REACTIVA (DSTATCOM)

Resumen

Este trabajo presenta un modelo matemático optimizado para un compensador estático de potencia reactiva (DSTATCOM) en sistemas de distribución, con aplicación en estudios de régimen permanente.

Las ecuaciones matemáticas del DSTATCOM son introducidas en el programa General Algebraic Modeling System (conocido por su acrónimo GAMS) para el cálculo de un perfil de voltajes típico, con las restricciones propias de uno de los modos de operación del controlador estático.

Para poder disponer de resultados de flujos de carga en sistemas de distribución, se eligió el método de barrido iterativo en flujos de potencia, que fue programado en la plataforma MATLAB.

Posteriormente se presentan algunos resultados, con ensayos de sistemas normalizados IEEE y otros propuestos por el autor, para estudiar más en profundidad el efecto de la operación del equipo sobre los sistemas de distribución desde el punto de vista de la inyección de la potencia en relación a los perfiles de voltaje.

Palabras Clave: DSTATCOM, Perfil de voltajes, compensación de reactivos, sistemas radiales.

Abstract

In this article an optimizing mathematical model for a Static Var Compensator (DSTATCOM) in distribution systems is carried out with appliances focused on studies of permanent regime.

The mathematical equations of DSTATCOM are introduced in the General Algebraic Modeling System program (Known as its acronym GAMS) for the calculation of a typical voltage profile, due to inherent restrictions to one of the modes of operation of the static controller.

The iterative sweeping method in power flows was chosen in order to have the results of load flows in distribution systems, which was programmed in the MATLAB platform.

Later some results are presented with tests of IEEE standardized systems and others proposed by the author; to study in more depth the effect of the operation of the equipment on the distribution systems from the point of view of the injection of the power in relation to the voltage profiles.

Keywords: DSTATCOM, Voltage profile, reagent compensation, radial systems

1. Introducción

El DSTATCOM (compensador Estático de Potencia para Sistemas de Distribución, por sus siglas en inglés) es un dispositivo convertidor que se encuentra dentro de los denominados “Custom Power Devices” [1] [2] [3] [4] [5] [6] [7].

Los sistemas de distribución pueden llegar a presentar problemas que afectan la calidad de la energía, tanto para la compensación de carga como en la

regulación de tensión, además de otras muchas aplicaciones [1], [8]–[16]. El DSTATCOM es un dispositivo que mediante tecnología de electrónica de potencia puede inyectar o absorber potencia reactiva. De forma semejante a su similar en el mundo de los sistemas de transmisión, se conecta en paralelo al sistema de distribución o a una carga puntual.

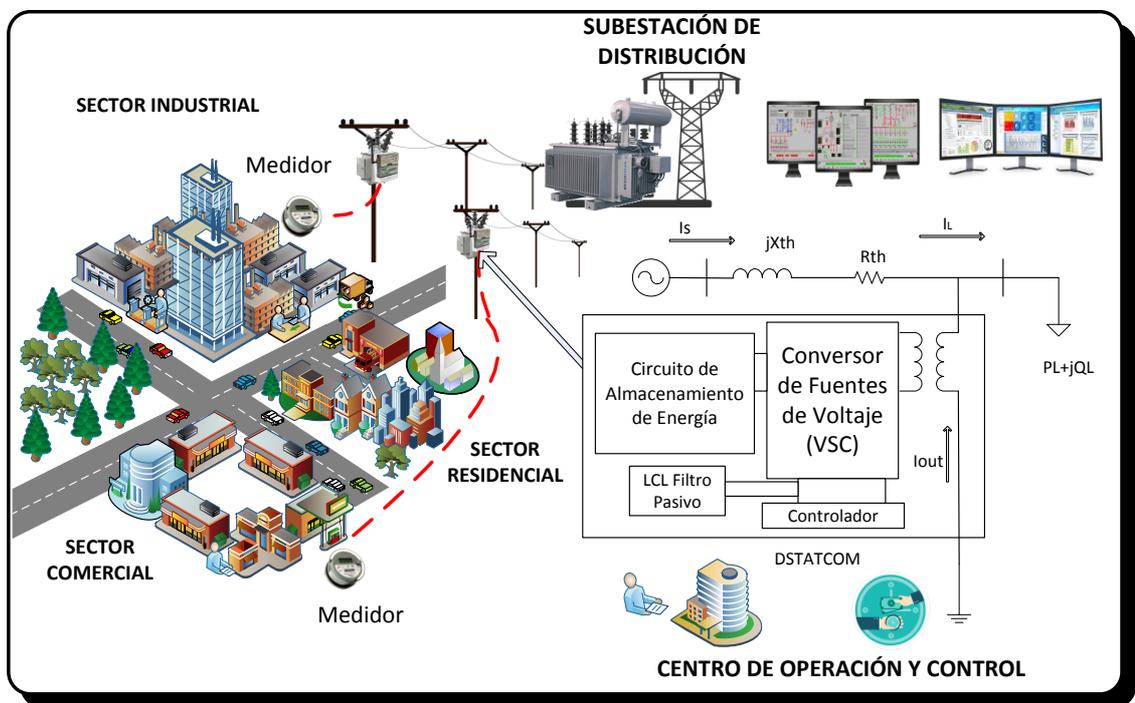


Figura 1. Red de Distribución con un DSTATCOM implementado.

2. Marco Teórico

2.1 Elementos y principio básico de operación del DSTATCOM

El DSTATCOM está basado en una topología ya conocida en la literatura de la electrónica de potencia de alta tensión y que se puede traducir con el nombre de Fuente Convertidora de voltaje (SVC) [17].

El DSTATCOM se conecta en paralelo a una barra del sistema de distribución y

tiene la capacidad de generar o absorber potencia reactiva, como lo haría un SVC.

El DSTATCOM como el STATCOM puede disponer de sensores capaces de medir tensiones en línea, puede calcular las señales de referencia con las cuales realizar la compensación, puede ayudar a mantener la tensión y la corriente en valores que aseguren la controlabilidad del compensador además de calcular las señales de disparo del inversor.

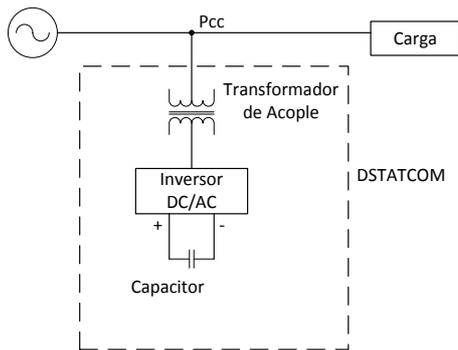


Figura 2. Diagrama esquemático de un DSTATCOM y su punto de conexión al sistema eléctrico de potencia.

Al momento de analizar el modo de operación del compensador se deben tener en cuenta las variables: el ángulo de fase de voltaje de la red de distribución y del convertidor (ángulo θ y ángulo ϕ respectivamente) y las magnitudes del voltaje de la red de distribución ($V1$) y del voltaje de salida del convertidor ($V2$).

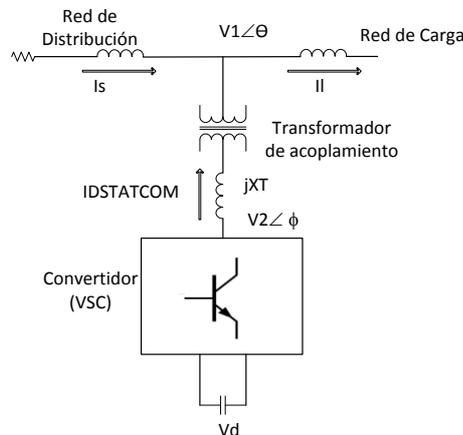


Figura 3. Dibujo esquemático de la operación del DSTATCOM.

Dependiendo del modo de operación en el cual el convertidor sea puesto a trabajar se puede llegar a tener flujos bidireccionales de potencia activa y reactiva.

Tabla 1: Modos de operación del DSTATCOM.

Funcionamiento	Acción sobre el Sistema Eléctrico de Potencia
$\angle\theta = \angle\phi$	Sólo intercambia potencia reactiva

$ V1 > V2 $	Absorbe potencia reactiva (inductiva)
$ V2 > V1 $	Genera potencia reactiva (capacitiva)
$\angle\theta < \angle\phi$	Absorbe potencia activa (eleva $V1$)
$\angle\theta > \angle\phi$	Inyecta potencia activa (reduce $V1$)

El DSTATCOM cuenta con dos modos de operación: modo de control por corriente y modo de control por tensión. Dependiendo de su ubicación en el sistema de distribución y el modo de operación con el cual vaya a funcionar, el DSTATCOM puede ser visto como un compensador. El DSTATCOM es capaz de compensar diferentes tipos de perturbaciones, ya sean relacionadas con la corriente que demanda la carga o con las tensiones del sistema de distribución.

El DSTATCOM está en modo capacitivo si entrega potencia reactiva (o inyecta reactivos al sistema) teniendo un comportamiento similar a una fuente de voltaje adicionada en el sistema. El modo inductivo del DSTATCOM absorbe potencia reactiva, consume reactivos que el sistema de distribución suministra, actuando como una carga adicional en el sistema [18].

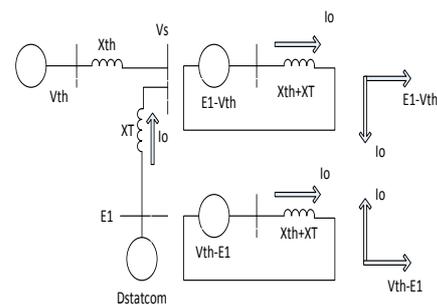


Figura 4. DSTATCOM operando en los modos capacitivo e inductivo

2.2 Modo de control por corriente

En este modo, el DSTATCOM es conectado en paralelo con la carga. Existen diversos modos de modelar matemáticamente el controlador-

compensador. Cuenta con funciones de compensación para las cargas tales como la corrección del factor de potencia y la modificación del perfil de voltajes de un sistema de distribución, [7],[12],[13],[15]–[21].

El sistema de control del equipo-compensador obliga a que la corriente en derivación esté en cuadratura con la tensión en el punto de acoplamiento común (PCC). El punto de acoplamiento en común es el nombre técnico que recibe la barra del sistema de distribución en donde se conecta el equipo compensador Figura 2.

2.3 Modo de control por tensión

En el modo de control por tensión el DSTATCOM es acoplado en la barra del sistema de distribución donde se requiere regular la tensión, el PCC. Para representarlo de manera ideal, se puede modelar como una fuente de tensión controlada. Con el objetivo de controlar la tensión del nodo de conexión, se realizan las siguientes acciones: la regulación de la tensión y la compensación de los descensos o elevaciones de tensión corta duración que podrían suscitarse en el sistema [10], [11], [25], [26], [27], entregar compensación que procure evitar que se haga presente un desbalance de tensión, mitigación de la distorsión de la forma de onda de tensión y compensación de fluctuaciones de tensión (flicker) [10][14][28].

2.4 Estructura del DSTATCOM

La estructura del DSTATCOM puede ser clasificada por medio de el número de fases y de hilos con que cuente el sistema además de la topología del convertidor de potencia [7], [29], [30].

3. Planteamiento del problema

Existen varios métodos para el mejoramiento de los perfiles de voltaje

en redes de distribución. El método basa su acción en la inyección o absorción de reactivos. La bibliografía también recoge métodos como la desconexión de carga y de generación distribuida cuando este sea factible [31][32][33].

Algunos factores importantes que se toman en cuenta al momento de realizar la compensación de reactivos son:

- a) Pérdidas de potencia en la red de distribución;
- b) Corrección y mejoramiento del factor de potencia;
- c) Mejoramiento de los perfiles de voltaje;
- d) Mitigación de Armónicos;
- e) Análisis de costos de los compensadores;
- f) Topologías de la red;
- g) Almacenamiento de energía en la red.

3.1 Flujo de potencia con la inclusión del DSTATCOM

El modelo con la inclusión de un DSTATCOM se hace más complejo pues se añaden variables de estado: la potencia reactiva en derivación y la restricción de la tensión en derivación. Esto implica la tensión y el ángulo del DSTATCOM (V_{dstat} y δ_{dstat}).

Al igual que en un flujo de carga sin compensación, la solución de flujo de carga con DSTATCOM implica un proceso iterativo que se verifica hasta que se cumpla la condición de que el error en la diferencia o disparidad de potencias (mismatch) sea menor al valor especificado en el algoritmo.

3.2 Método del barrido iterativo

Existen varios métodos de resolución de sistemas radiales de potencia investigados en la bibliografía especializada: Newton Raphson, Gauss-Seidel, Newton Raphson desacoplado, DC, entre otros. Para los sistemas de distribución radiales, el método seleccionado fue el método de barrido iterativo.

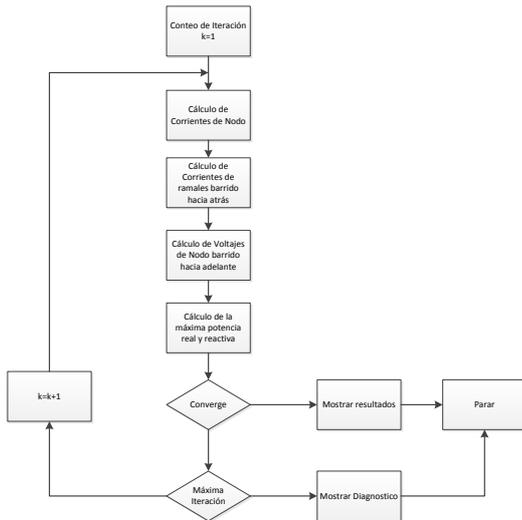


Figura 5. Algoritmo del método de barrido iterativo.

Los sistemas de distribución tienen características diferentes a los de transmisión. Estos cuentan con elementos dispuestos radialmente. Pueden presentar líneas trifásicas, líneas bifásicas y monofásicas. Por tanto, no están balanceados. Además, las líneas de distribución tienen la característica de que la relación entre la resistencia y la impedancia reactiva, conocida en la literatura técnica como factor X/R es cercana a 1 o en todo caso mucho menor que en líneas de subtransmisión y de transmisión.

Estas características hacen que los métodos como Newton-Raphson y Gauss-Seidel puedan ser ineficientes, limitados [34].

El método de barrido iterativo se basa en las leyes de Kirchhoff y toma en cuenta los voltajes nodales, diferentes modelos de cargas e impedancia de los transformadores [35]:

3.2.1 Barrido de corriente

Por medio de la primera ley de Kirchhoff desde nodo final hacia el nodo inicial (SLACK), se realiza la suma de corrientes (barrido de corrientes). Para calcular las corrientes nodales tomaremos el valor inicial del voltaje en la barra Slack con un valor

de 1 en p.u. En la ecuación (1) se muestra el barrido de corrientes :

$$(I_{ij})_{ABC} = (I_i)_{ABC} + \Sigma(I_{in})_{ABC} \quad (1)$$

Donde:

n: nodos que conecte a i deben tener mayor numeración a i.

j: es todo nodo que conecta a i, siendo j el nodo con menor numeración que i.

I_i : Corriente inyectada en i (corriente nodal).

I_{ij} :: Flujo de corriente por las líneas i-j (corriente de rama).

I_{in} ::Flujo de corriente por las líneas i-n.

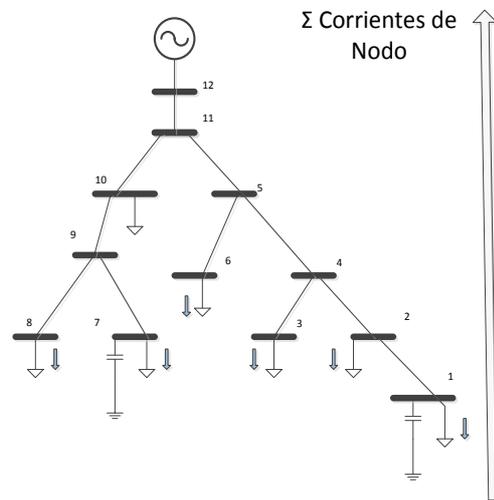


Figura 6. Barrido de corrientes.

3.2.2 Barrido de voltaje

Para este se aplica la segunda ley de Kirchhoff, con el fin de obtener las caídas de voltaje. Este proceso va desde el nodo inicial a cada uno de los nodos de la red.

Aquí son usados los valores de corrientes de la primera parte (barrido de corriente) calculando los valores de voltajes nodales. Una vez obtenidas las nuevas tensiones, se actualizan las corrientes nodales y empieza una nueva iteración. El barrido de voltajes se describe en la ecuación (2):

$$V_i = (V)_i + (Z)_{ij}(I)_{ij} \quad (2)$$

Donde:

V_j : Voltaje del nodo de recepción.
 V_i : Voltaje del nodo de envío.
 Z_{ij} : Impedancia entre i-j.
 I_{ij} : Flujo de corriente por i-j.

La actualización del voltaje de nodo fuente se describe con la ecuación (3):

$$V_{Slack} = (V)_{th} - (Z)_{th}(I)_{th} \quad (3)$$

Donde:

V_{Slack} : Voltaje del nodo Slack.
 V_{th} : Voltaje del nodo de envío.
 Z_{th} : Impedancia Thevenin.
 I_{th} : Corriente total en el nodo fuente.

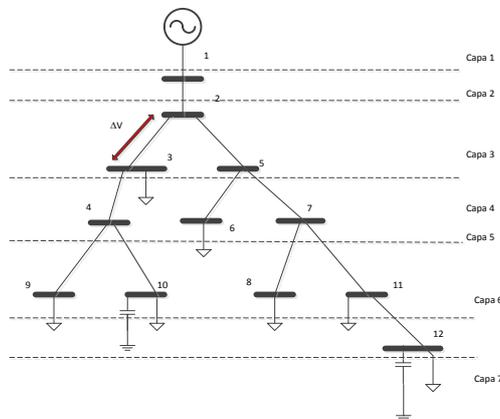


Figura 7. Barrido de voltajes.

La convergencia ocurre cuando la pérdida de potencia en cualquier línea entre dos iteraciones continuas es inferior a la tolerancia instaurada o si alcanza un número máximo de iteraciones definidas, lo que ocurra primero. Este es un procedimiento estándar utilizado para flujos de carga en transmisión.

3.3 Optimización mediante GAMS

El software GAMS (Sistema General de Modelaje Algebraico, por sus siglas en inglés) fue elegido ya que brinda un conjunto de herramientas de optimización para modelos lineales, no lineales y de optimización mixta. También permite manejar con mayor facilidad modelos matemáticos grandes y con mayor nivel de complejidad.

3.3.1 Modelo matemático

Se propone un modelo matemático que cuenta con una función objetivo la cual busca minimizar la diferencia entre el voltaje de referencia y los voltajes nodales. Esto significa minimizar las caídas de tensión, sujeta a restricciones técnico-operativas [36]. Las restricciones planteadas tienen el objetivo de mejorar el perfil de tensión de la red.

El solucionador (SOLVER) utilizado por el programa es COINBONMIN.

3.3.2 Función objetivo

Como se conoce de la literatura técnica y de las normas de las empresas de distribución consultadas, los sistemas de distribución presentan una caída de voltaje máxima admisible en un rango de más menos un 5% como se indica en la norma IEEE 519. Al momento de trabajar los modelos planteados se tiene como mínimo un voltaje de 0.95 en p.u. y como máximo un voltaje de 1.05 en p.u.

$$FO = \sum_{i=1}^n V_{ref} - V_i \quad (4)$$

Donde:

V_i : Voltaje del nodo i en p.u.
 V_{ref} : Voltaje de referencia (1.05 p.u.).
 n: Número de nodos del sistema de distribución.

3.3.3 Restricciones

Con este conjunto de ecuaciones se garantiza que toda la demanda del sistema sea atendida y que la potencia suministrada por las fuentes (subestación) no exceda la potencia requerida por el sistema.

Las restricciones a emplearse son:

a) *Restricción de balance de potencia:*
Las ecuaciones de balance nodal vienen dadas por las ecuaciones (5) y (6):

$$V_i \sum_{j=1}^n Y_{ij} V_j \cos(\theta_i - \theta_j) = PG_i - P_{di} \quad (5)$$

$$V_i \sum_{j=1}^n Y_{ij} V_j \sin(\theta_i - \theta_j) = QG_i - Q_{di} \quad (6)$$

Donde:

PG_i, QG_i : Potencia activa y reactiva generada en i .

PD_i, QD_i : Demanda de potencia activa y reactiva en i .

V_j : Magnitud del voltaje en el nodo j

Y_{ij} : Magnitud de la admitancia nodal de la matriz Y_{bus} .

θ_i : Ángulo de voltaje en el nodo i .

θ_j : Ángulo de voltaje en el nodo j .

b) *Límites de la magnitud de los voltajes nodales:*

Para mantener los niveles de voltaje óptimos en la operación del sistema (0.95 p.u. y 1.05 p.u.) se utiliza la ecuación (7):

$$V_{imin} \leq V_i \leq V_{imax} \quad (7)$$

c) *Límites de potencia del DSTATCOM:*

Para asegurar que el compensador actúe dentro de sus límites de capacidad se tiene la ecuación (8):

$$Q_{stati min} \leq Q_{stati} \leq Q_{stati max} \quad (8)$$

Donde:

Q_{stati} : Potencia reactiva generada por el DSTATCOM.

$Q_{stati min}$: Límite mínimo de potencia reactiva del DSTATCOM.

$Q_{stati max}$: Límite de potencia máxima del DSTATCOM.

d) *Límites de los ángulos de los voltajes nodales:*

Con la ecuación (9) se asegura que los ángulos estén dentro de los límites.

$$\theta_{imin} \leq \theta_i \leq \theta_{imax} \quad (9)$$

$$\theta_{ini} = 0$$

Donde:

θ_{ini} : Ángulo de la barra Slack.

3.3.4 Dimensionamiento del DSTATCOM

El modelo matemático es programado en GAMS. El resultado del optimizador es la ubicación óptima y la cantidad de potencia reactiva que el DSTATCOM inyecta al sistema logrando así niveles de los voltajes nodales con valores que se encuentren dentro de los límites que las empresas de distribución han establecido para garantizar la calidad de tensión en los sistemas de distribución.

4. Análisis de los Resultados

Se seleccionaron tres sistemas de pruebas para los ensayos: dos sistemas pequeños de 5 nodos y 13 nodos. Luego se aplicó al sistema IEEE de 33 nodos [37]. Una vez obtenido el resultado del flujo de carga, se verifica que existen varios nodos que presentan niveles de voltaje menores a los límites permitidos, por lo cual se procede a ingresar el perfil de voltajes en el optimizador para con el algoritmo de optimización obtener la ubicación y dimensionamiento del DSTATCOM. Este nuevo perfil de voltajes corregidos se debe encontrar dentro de los límites de funcionamiento citados anteriormente.

4.1 Sistema de 5 nodos

Para este caso se utiliza una potencia base de 100 MVA, un voltaje base de 23 kV y un DSTATCOM con una capacidad máxima de 20 MVAR.

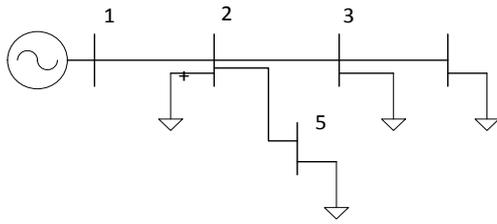


Figura 8. Sistema de 5 nodos.

Los resultados del flujo de potencia original fueron los siguientes:

Tabla 2: Flujo de potencia sistema de 5 nodos.

Nodo No.	Voltaje (p.u.)
1	1
2	0.9784
3	0.9532
4	0.9407
5	0.9367

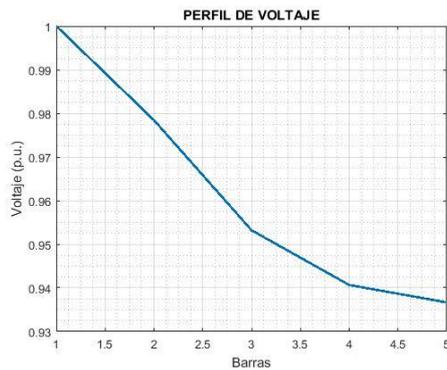


Figura 9. Perfil de voltaje sistema de 5 nodos sin compensación.

El resultado que nos arroja nuestro optimizador a determinado que el DSTATCOM debe ser colocado en la barra 4 y despachar 5 MVAR, con esta cantidad de potencia reactiva podremos mejorar el perfil de tensión.

Tabla 3: Flujo de potencia sistema de 5 nodos con compensación.

Nodo No.	Voltaje (p.u.)
1	1
2	0.9805
3	0.9655
4	0.9607
5	0.9767

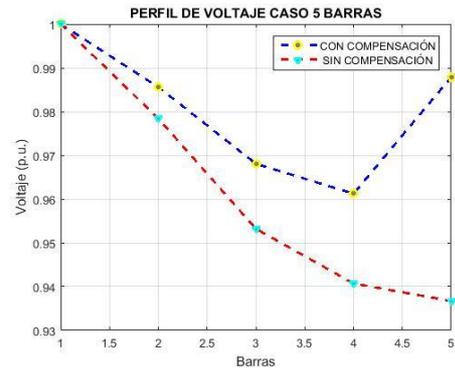


Figura 10. Comparación de los perfiles de voltaje sistema de 5 nodos con y sin compensación.

4.2 Sistema de 13 nodos

Para este ejemplo se utiliza una potencia base de 100 MVA, un voltaje base de 12.66 kV y un DSTATCOM con una capacidad máxima de 20 MVAR.

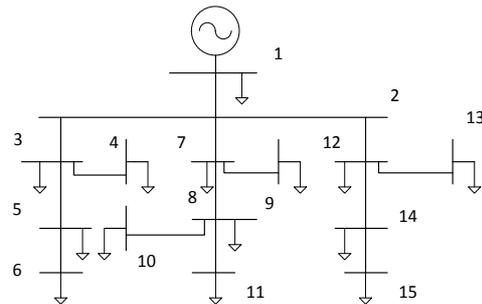


Figura 11. Sistema de 13 nodos.

Los resultados del flujo de potencia fueron los siguientes:

Tabla 4: Flujo de potencia sistema de 13 nodos.

Nodo No.	Voltaje (p.u.)
1	1
2	0.9113
3	0.9074
4	0.9074
5	0.9060
6	0.9042
7	0.8509
8	0.8509
9	0.8452
10	0.8485
11	0.8472
12	0.8464
13	0.8509

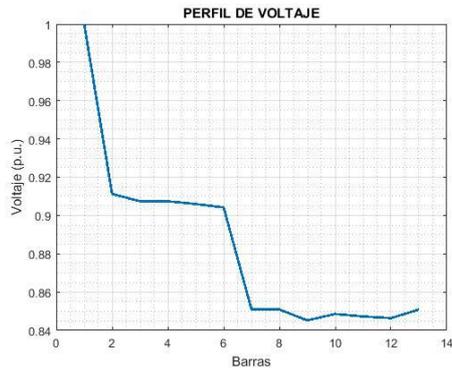


Figura 12. Perfil de voltaje sistema de 13 nodos sin compensación.

El optimizador da como resultado que el DSTATCOM debe ser colocado en la barra 8 y despachar 10 MVAR.

Tabla 5: Flujo de potencia sistema de 13 nodos con compensación.

Nodo No.	Voltaje (p.u.)
1	1
2	0.9888
3	0.9848
4	0.9848
5	0.9858
6	0.9847
7	1.0036
8	1.0036
9	1.0006
10	1.0019
11	1.0010
12	1.0008
13	1.0036

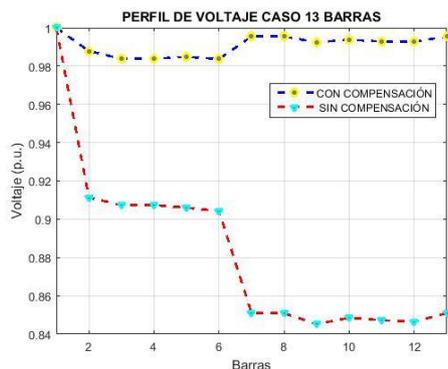


Figura 13. Comparación de los perfiles de voltaje sistema de 13 nodos con y sin compensación.

4.3 Sistema de 33 nodos

Esta red de 33 barras emplea una potencia base de 100 MVA, un voltaje base de 12.66 kV y un DSTATCOM con una capacidad máxima de 20 MVAR.

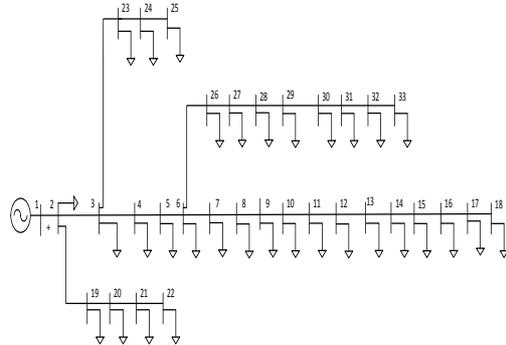


Figura 14. Sistema de 33 nodos.

Los resultados del flujo de potencia fueron los siguientes:

Tabla 6: Flujo de potencia sistema de 33 nodos.

Nodo No.	Voltaje (p.u.)
1	1
2	0.9970
3	0.9829
4	0.9754
5	0.9679
6	0.9495
7	0.9459
8	0.9323
9	0.9260
10	0.9201
11	0.9192
12	0.9177
13	0.9115
14	0.9092
15	0.9078
16	0.9064
17	0.9044
18	0.9038
19	0.9965
20	0.9929
21	0.9922
22	0.9916
23	0.9793
24	0.9726
25	0.9693
26	0.9475
27	0.9450

28	0.9335
29	0.9253
30	0.9218
31	0.9176
32	0.9167
33	0.9164

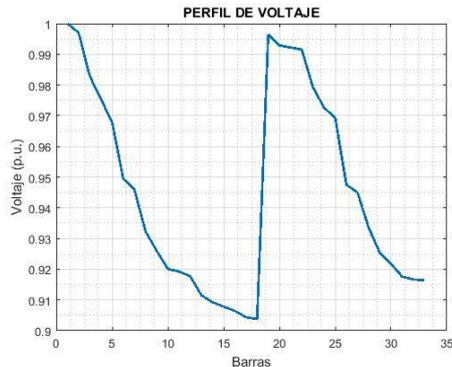


Figura 15. Perfil de voltaje sistema de 33 nodos sin compensación.

El optimizador da como resultado que el DSTATCOM debe ser colocado en la barra 6 y despachar 11.5 MVAR.

Tabla 7: Flujo de potencia sistema de 33 nodos con compensación.

Nodo No.	Voltaje (p.u.)
1	1
2	0.9984
3	0.9941
4	0.9975
5	1.0034
6	1.05
7	1.0448
8	1.0247
9	1.0154
10	1.0068
11	1.0055
12	1.0033
13	0.9942
14	0.9909
15	0.98879
16	0.9867
17	0.9837
18	0.9828
19	0.9975
20	0.9918
21	0.9906
22	0.9896
23	0.9884
24	0.9777
25	0.9724

26	1.0471
27	1.0434
28	1.0266
29	1.0146
30	1.0094
31	1.0033
32	1.0019
33	1.0015

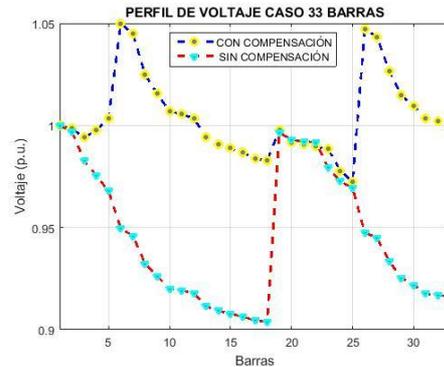


Figura 16. Comparación de los perfiles de voltaje sistema de 33 nodos con y sin compensación.

5. Conclusiones

El DSTATCOM pudo ser modelado y simulado efectivamente mediante GAMS en varias redes de distribución de tamaño modesto sin mayor dificultad.

En todos los casos presentados, se logró mediante la inyección de una cantidad de potencia reactiva determinada, el mejoramiento del perfil de voltajes.

Cada escenario nos arroja una ubicación distinta para colocar el DSTATCOM, debido a que el optimizador encuentra una respuesta apropiada que cubra con las necesidades de demanda cubrir en cada uno de los casos.

Comprando los escenarios es claramente visible la relación directa entre la cantidad de carga y el tamaño de los compensadores.

Mientras mayor el sistema de distribución, mayor la potencia reactiva entregada por el compensador.

La compensación de reactivos aplicada en los sistemas, mejoro los perfiles de tensión, lo cual implica una reducción en las perdidas del sistema, algo primordial para las empresas de

distribución al momento de buscar cumplir con parámetros de estabilidad, confiabilidad y seguridad en los sistemas de distribución.

5.1 Trabajos futuros

Con el fin de dejar propuestas para trabajos futuros se puede proponer robustecer el algoritmo de flujo de potencia y optimización, incluyendo restricciones adicionales que contemplen las distintas características de los elementos que conforman una red de distribución real.

Programar otros métodos de solución para flujos de carga en distribución.

Validar estos resultados con las simulaciones del DSTATCOM junto a un sistema de control que actúe rápido sobre las variables de control del sistema.

6. Referencias

- [1] Arindam Ghosh and Gerard Ledwich, *Power Quality Enhancement Using Custom Power Devices*, 1st ed. Springer Science+Business Media, LLC, 2002.
- [2] N. C. Yang and M. D. Le, “Optimal design of passive power filters based on multi-objective bat algorithm and pareto front,” *Appl. Soft Comput. J.*, vol. 35, pp. 257–266, 2015.
- [3] M. Torabian Esfahani, S. H. Hosseinian, and B. Vahidi, “A new optimal approach for improvement of active power filter using FPSO for enhancing power quality,” *Int. J. Electr. Power Energy Syst.*, vol. 69, pp. 188–199, 2015.
- [4] M. MacIązek, D. Grabowski, M. Pasko, and M. Lewandowski, “Compensation based on active power filters - The cost minimization,” *Appl. Math. Comput.*, vol. 267, pp. 648–654, 2015.
- [5] P. P. Biswas, P. N. Suganthan, and G. A. J. Amaratunga, “Minimizing harmonic distortion in power system with optimal design of hybrid active power filter using differential evolution,” *Appl. Soft Comput. J.*, vol. 61, pp. 486–496, 2017.
- [6] M. Moghbel, M. A. S. Masoum, A. Fereidouni, and S. Deilami, “Optimal Sizing, Siting and Operation of Custom Power Devices with STATCOM and APLC Functions for Real-Time Reactive Power and Network Voltage Quality Control of Smart Grid,” *IEEE Trans. Smart Grid*, vol. 3053, no. c, pp. 1–1, 2017.
- [7] S. B. Karanki, N. Geddada, M. K. Mishra, and B. K. Kumar, “A DSTATCOM topology with reduced DC-link voltage rating for load compensation with nonstiff source,” *IEEE Trans. Power Electron.*, vol. 27, no. 3, pp. 1201–1211, 2012.
- [8] P. Kumar, N. Kumar, and A. K. Akella, “A simulation based case study for control of DSTATCOM,” *ISA Trans.*, vol. 53, no. 3, pp. 767–775, 2014.
- [9] S. Singh, V. Rai, A. Kumar, and K. B. Sahay, “Simulation and comparison of DVR and D-STATCOM for voltage sag mitigation,” *2016 IEEE 6th Int. Conf. Power Syst. ICPS 2016*, 2016.
- [10] A. J. Rana, C. K. Vasoya, M. H. Pandya, and P. M. Saradva, “Application of Unit Template Algorithm for voltage sag mitigation in distribution line using D-STATCOM,” *2016 Int. Conf. Energy Effic. Technol.*

- Sustain. ICEETS 2016*, pp. 756–761, 2016.
- [11] P. Samal, S. Mohanty, and S. Ganguly, “Effect of DSTATCOM allocation on the performance of an unbalanced radial distribution systems,” *Proc. 2nd IEEE Int. Conf. Eng. Technol. ICETECH 2016*, no. March, pp. 927–931, 2016.
- [12] T. Zaveri, B. Bhalja, and N. Zaveri, “Comparison of control strategies for DSTATCOM in three-phase, four-wire distribution system for power quality improvement under various source voltage and load conditions,” *Int. J. Electr. Power Energy Syst.*, vol. 43, no. 1, pp. 582–594, 2012.
- [13] B. Singh and S. Raj Arya, “Composite observer-based control algorithm for distribution static compensator in four-wire supply system,” *IET Power Electron.*, vol. 6, no. 2, pp. 251–260, 2013.
- [14] K. Yang, X. Cheng, Y. Wang, L. Chen, and G. Chen, “PCC voltage stabilization by D-STATCOM with direct grid voltage control strategy,” *IEEE Int. Symp. Ind. Electron.*, pp. 442–446, 2012.
- [15] S. P. Gawande and M. R. Ramteke, “Three-level NPC inverter based new DSTATCOM topologies and their performance evaluation for load compensation,” *Int. J. Electr. Power Energy Syst.*, vol. 61, pp. 576–584, 2014.
- [16] M. V. M. Kumar and M. K. Mishra, “Three-leg inverter-based distribution static compensator topology for compensating unbalanced and non-linear loads,” *IET Power Electron.*, vol. 8, no. 11, pp. 2076–2084, 2015.
- [17] E. Barrios-Martínez and C. Ángeles-Camacho, “Technical comparison of FACTS controllers in parallel connection,” *J. Appl. Res. Technol.*, vol. 15, no. 1, pp. 36–44, 2017.
- [18] H. Ma, K. Guan, W. Wei, and S. Yan, “Research on the predictive voltage control method for the distribution static compensator,” pp. 0–4, 2017.
- [19] P. Kumar, N. Kumar, and A. K. Akella, “Modeling and Simulation of Different System Topologies for DSTATCOM,” *AASRI Procedia*, vol. 5, pp. 249–261, 2013.
- [20] B. Singh and S. R. Arya, “Adaptive theory-based improved linear sinusoidal tracer control algorithm for DSTATCOM,” *IEEE Trans. Power Electron.*, vol. 28, no. 8, pp. 3768–3778, 2013.
- [21] T. Zaveri, B. R. Bhalja, and N. Zaveri, “Load compensation using DSTATCOM in three-phase, three-wire distribution system under various source voltage and delta connected load conditions,” *Int. J. Electr. Power Energy Syst.*, vol. 41, no. 1, pp. 34–43, 2012.
- [22] A. Águila Tellez, D. C. Carrión, and L. Ortiz Matos, “Analysis of power losses in the asymmetric construction of electric distribution systems,” *IEEE Lat. Am. Trans.*, vol. 13, no. 7, pp. 2190–2194, 2015.
- [23] M. Haddad, S. Rahmani, F. Fnaiech, and K. Al-Haddad, “A Lyapunov-based current control strategy of three phase Shunt Active Power Filter for harmonic elimination, power-factor correction, and load unbalance compensation,”

- IECON Proc. (Industrial Electron. Conf.*, no. 2, pp. 3340–3345, 2012.
- [24] D. Jacome and A. Águila, “Localización y dimensionamiento óptimo de dispositivos SVC para la compensación de potencia reactiva en SEP,” pp. 1–17, 2017.
- [25] R. Madhusudan, G. Ramamohan Rao, I. Scholar, and E. Engineering, “Modeling and Simulation of a Distribution STATCOM (D-STATCOM) for Power Quality Problems- Voltage Sag and Swell Based on Sinusoidal Pulse Width Modulation (SPWM),” pp. 436–441, 2012.
- [26] J. G. P. Reddy and E. Engineering, “Design and Simulation of Cascaded H-Bridge Multilevel Inverter Based DSTATCOM for Compensation of Reactive Power and Harmonics,” *Recent Adv. Inf. Technol. (RAIT)*, 2012 1st Int. Conf., pp. 737–743, 2012.
- [27] B. Varma and G. Vineesha, “Simulated control system design of a multilevel STATCOM for reactive power compensation,” *Adv. ...*, pp. 257–263, 2012.
- [28] P. Sen and K. P. Panda, “Enhancement of Power Quality and Voltage Flicker Mitigation Using New PWM Based DSTATCOM,” *Int. Conf. Intell. Comput. Control Syst.*, pp. 350–355, 2017.
- [29] S. El Hani, H. Mediouni, and A. Echchaachouai, “Comparative Analysis on Current Control Methods Grid Energy Quality,” 2017.
- [30] J. G. Pinto, B. Exposto, L. F. C. Monteiro, C. Couto, and J. L. Afonso, “Comparison of Current-Source and Voltaje-Souerce Shunt Active Filters for Harmonic Compensation and Reactive Power Control,” no. 4, pp. 5161–5166, 2012.
- [31] F. A. Castillo Munoz, A. Aguila Tellez, and J. W. Gonzalez Sanchez, “Analysis of Stability of Tension and Losses of Electric Power in Distribution Networks with Distributed Generation,” *IEEE Lat. Am. Trans.*, vol. 14, no. 11, pp. 4491–4498, 2016.
- [32] J. A. A. Trujillo, “Optimización multiobjetivo de los flujos de potencia en redes de distribución basado en el control VOLT-VAR,” 2017.
- [33] A. Águila Téllez, G. López, I. Isaac, and J. W. González, “Optimal reactive power compensation in electrical distribution systems with distributed resources. Review,” *Heliyon*, vol. 4, no. 8, 2018.
- [34] P. Arboleya, C. Gonzalez-Moran, and M. Coto, “Unbalanced Power Flow in Distribution Systems With Embedded Transformers Using the Complex Theory in a,b,0 Stationary Reference Frame,” *IEEE Trans. Power Syst.*, vol. 29, no. 3, pp. 1012–1022, 2014.
- [35] Z. Wang, F. Chen, and J. Li, “Implementing transformer nodal admittance matrices into backward/forward sweep-based power flow analysis for unbalanced radial distribution systems,” *IEEE Trans. Power Syst.*, vol. 19, no. 4, pp. 1831–1836, 2004.
- [36] I. Jacobo and R. Ramos, “FLUJOS ÓPTIMOS DE POTENCIA REACTIVA BASADO EN ÓPTIMO DESPACHO DE CARGA

- USANDO GAMS,” 2017.
- [37] M. M. Aman, G. B. Jasmon, A. H. A. Bakar, and H. Mokhlis, “A new approach for optimum simultaneous multi-DG distributed generation Units placement and sizing based on maximization of system loadability using HPSO (hybrid particle swarm optimization) algorithm,” *Energy*, vol. 66, pp. 202–215, 2014.

6.2 Resumen e indicadores del estado del arte.

