

**ANÁLISIS DEL MÉTODO DE CONTROL DE VOLTAJE “DROOP CONTROL”
EN UNA MICRO-RED DC PARA EL CONTROL DE POTENCIA ACTIVA Y
DISTRIBUCIÓN DE CARGA ENTRE DIFERENTES FUENTES DE
GENERACIÓN, USANDO CONVERTORES DE POTENCIA.**

**UNIVERSIDAD POLITÉCNICA SALESIANA
SEDE QUITO**

**CARRERA:
INGENIERÍA ELÉCTRICA**

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

**TEMA:
ANÁLISIS DEL MÉTODO DE CONTROL DE VOLTAJE “DROOP CONTROL”
EN UNA MICRO-RED DC PARA EL CONTROL DE POTENCIA ACTIVA Y
DISTRIBUCIÓN DE CARGA ENTRE DIFERENTES FUENTES DE
GENERACIÓN, USANDO CONVERTORES DE POTENCIA.**

**AUTOR:
LUIS FERNANDO HIDALGO LOPEZ**

**DIRECTOR:
MANUEL DARIO JARAMILLO MONGE**

Quito, Julio 2020

Luis Fernando Hidalgo López

ANÁLISIS DEL MÉTODO DE CONTROL DE VOLTAJE “DROOP CONTROL” EN UNA MICRO-RED DC PARA EL CONTROL DE POTENCIA ACTIVA Y DISTRIBUCIÓN DE CARGA ENTRE DIFERENTES FUENTES DE GENERACIÓN, USADANDO CONVERTORES DE POTENCIA.

Universidad Politécnica Salesiana, Quito-Ecuador 2020

Ingeniería Eléctrica

Breve reseña historia e información de contacto:



Luis Fernando Hidalgo López (Y'1996). Realizó sus estudios de secundaria en el “Colegio Diocesano San Pio “X”” de la ciudad de Ambato. Egresado de Ingeniería Eléctrica de la Universidad Politécnica Salesiana. Su trabajo se basa en el análisis del método de control de voltaje “Droop control” en una micro-red dc para el control de potencia activa y distribución de carga entre diferentes fuentes de generación, usando convertidores de potencia.

lhidalgol1@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

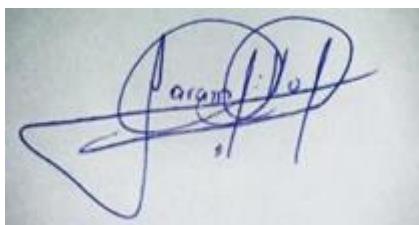
©2020 Universidad Politécnica Salesiana

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 “ANÁLISIS DEL MÉTODO DE CONTROL DE VOLTAJE “DROOP CONTROL” EN UNA MICRO-RED DC PARA EL CONTROL DE POTENCIA ACTIVA Y DISTRIBUCIÓN DE CARGA ENTRE DIFERENTES FUENTES DE GENERACIÓN, USANDO CONVERTORES DE POTENCIA” realizado por LUIS FERNANDO HIDALGO LOPEZ, obteniendo un producto que cumple con todos los requisitos estipulados por la Universidad Politécnica Salesiana para ser considerados como trabajo final de titulación.

Quito D.M, julio 2020



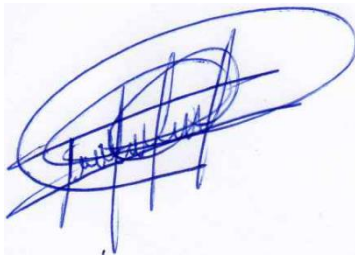
MANUEL DARÍO JARAMILLO MONGE
C.C.:1714298005

CESIÓN DE DERECHOS DE AUTOR

Yo, Luis Fernando Hidalgo López, con documento de identificación N° 1850011873, manifiesto mi voluntad y cedo a la Universidad Politécnica Salesiana la titularidad sobre los derechos patrimoniales en virtud de que soy/somos autor/es del trabajo de grado/titulación intitulado: “ANÁLISIS DEL MÉTODO DE CONTROL DE VOLTAJE “DROOP CONTROL” EN UNA MICRO-RED DC PARA EL CONTROL DE POTENCIA ACTIVA Y DISTRIBUCIÓN DE CARGA ENTRE DIFERENTES FUENTES DE GENERACIÓN, USANDO CONVERTORES DE POTENCIA”, 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/es me/nos reservo/reservamos 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 D.M, Julio 2020



.....
LUIS FERNANDO HIDALGO LÓPEZ
C.C.: 1850011873

ÍNDICE GENERAL

1	Introducción.....	2
2	Marco Teórico.....	3
2.1	MG y energía renovable.....	3
2.1.1	Generación fotovoltaica.....	4
2.1.2	Generación eólica.....	4
2.1.3	Banco de baterías.....	5
2.2	Descripción del método de Droop control tradicional.....	5
2.2.1	Control primario Droop.....	6
2.2.2	Control secundario Droop.....	7
2.2.3	Control terciario Droop.....	7
2.3	Uso del control Droop en MG de corriente continua.....	8
2.3.1	Convertidores de potencia.....	8
2.4	Métodos para control de convertidores de potencia en paralelo.....	9
2.4.1	Método de control maestro esclavo.....	9
2.4.2	Método de control voltaje Droop.....	9
3	Planteamiento del problema.....	10
4	Casos de estudio.....	11
4.1	Escenarios: Análisis de perfiles de voltaje.....	11
5	Conclusiones.....	14
6	Trabajos futuros.....	15
7	Referencias.....	15
8	Anexos.....	19

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1. Esquema general Micro-Red.	3
Figura 2. Topología de una Micro-Red DC.	4
Figura 3. Circuito equivalente de una Micro-Red DC usando control Droop.	5
Figura 4. Mapa conceptual jerárquico de control de voltaje Droop.	6
Figura 5. Control primario Droop de tensión y frecuencia.	7
Figura 6. Control secundario Droop de tensión y frecuencia.	7
Figura 7. Control terciario Droop de tensión y frecuencia.	8
Figura 8. Convertidor elevador bidireccional de corriente DC/DC.	8
Figura 9. Diagrama del método control maestro-esclavo para convertidores en paralelo.	9
Figura 10. Funciones control Droop P/Q.	9
Figura 11. Diagrama de flujo método de voltaje "Droop"	10
Figura 12. Topología sistema de distribución 10 barras.	11
Figura 13. Incrementando carga en barra 6 sin control -compensación de potencia activa.	11
Figura 14. Incrementando carga en barra 8.	12
Figura 15. Análisis en perfiles de voltaje p.u en cada barra, escenario 1.	12
Figura 16. Análisis en perfiles de voltaje p.u en cada barra, escenario 2.	12
Figura 17. Sistema de distribución 10 barras incluyendo control Droop y compensación en barra 6.	12
Figura 18. Incrementando carga en barra 6 incluyendo control -compensación de potencia activa.	13
Figura 19. Sistema de distribución 10 barras incluyendo control Droop y compensación en barra 8.	13
Figura 20. Incrementando carga en barra 8 incluyendo control -compensación de potencia activa.	13
Figura 21. Análisis en perfiles de voltaje p.u en cada barra, escenario 3.	13
Figura 22. Análisis en perfiles de voltaje p.u en cada barra, escenario 4.	14
Figura 23. Sistema de distribución 10 barras incluyendo control Droop y compensación en barra 6 y 8.	14
Figura 24. Incrementando carga en barra 6 y 8 incluyendo control -compensación de potencia activa.	14
Figura 25. Análisis en perfiles de voltaje p.u en cada barra, escenario 5.	14

ÍNDICE DE TABLA

Tabla 1. Datos de líneas de red y demanda pico	11
Tabla 2. Datos de almacenadores de energía	11
Tabla 3. Aumento de carga del 25% y 50%	19
Tabla 4. Aumento de carga del 25% y 50%	20
Tabla 5. Aumento de carga del 25% y 50%	20
Tabla 6. Aumento de carga del 25% y 50%	20
Tabla 7. Valores de tensión sin compensación p.u, escenario 1 y 2	20
Tabla 8. Valores de tensión p.u al incluir compensación, escenario 3 y 4.....	20
Tabla 9. Valores de tensión p.u al incluir compensación, escenario 5.....	20

ANÁLISIS DEL MÉTODO DE CONTROL DE VOLTAJE “DROOP CONTROL” EN UNA MICRO-RED DC PARA EL CONTROL DE POTENCIA ACTIVA Y DISTRIBUCIÓN DE CARGA ENTRE DIFERENTES FUENTES DE GENERACIÓN, USANDO CONVERTIDORES DE POTENCIA.

Resumen

Las micro-redes han tenido gran aceptación durante los últimos años. Debido a sus características estas permiten tener sistemas con mejor confiabilidad, son capaces de reducir las pérdidas por transmisión, perfeccionan el uso de energía eléctrica renovable. Entre las principales funciones de desempeño de una micro-red, en el ámbito del comercio es manejar perfiles de voltaje adecuados a fin de no afectar al consumidor final, los niveles óptimos de funcionamiento en este modelo son de 0.38kV y 10kV las cuales son afectadas ante un aumento de carga provocando caídas de tensión menores al 1 p.u., la alternativa planteada para mejorar los perfiles del voltaje afectados en una micro-red es la aplicación de la técnica control droop la cual se basa en la configuración de potencia activa y reactiva respecto al voltaje y frecuencia e intercambiado corriente entre los convertidores de potencia manteniendo los perfiles de voltaje estables, la implantación de este control es el sistema de distribución “IEEE AMERICAN LATINA” de 10 nodos, el cual se sujeta a diversos escenarios para comprobar su validez.

Palabras Clave: Baterías, compensación bidireccional, control de voltaje, generación eléctrica, micro-red.

Abstract

Micro-grids have been widely accepted in recent years, due to their characteristics they allow to have systems with better reliability while being able of reducing transmission losses and they improve the use of renewable electrical energy. One of the main performance functions of a micro-network is found in the field of trade where adequate voltage profiles are managed to avoid affecting the end-user, the optimum levels of operation in this model are 0.38kV and 10kV which are affected by an increase in load causing voltage drops less than 1 pu, the alternative proposed to improve the affected voltage profiles in a micro-network is the application of the droop control technique, This is based on the configuration of active and reactive power with respect to voltage and frequency and exchanging current between the power converters, keeping the voltage profiles stable. The implementation of this control is the 10-node "IEEE AMERICAN LATINA" distribution system, which is subject to various scenarios to check its validity.

Keywords: Batteries, bidirectional compensation, electricity generation, micro-grid, voltage control

1 Introducción.

Al paso del tiempo los Sistemas Eléctricos de Potencia (SEP), han cumplido una labor fundamental en el desarrollo social y económico de los países avanzados al tener un incremento potencial, causas por lo cual surgió un aumento en demanda, por tanto, fueron exigidos a elevar generación[1][2]. Varios países del mundo optaron por utilizar energía eléctrica renovable, debido a que al descubrirse dicha energía cumplió un papel fundamental en aspectos económicos de varios países gracias a que los costos de generación están por muy debajo a otras como diésel. Además de tener problemas económicos en generación eléctrica otra dificultad común en un SEP son grandes distancias entre la red principal y el consumidor final ocasionando cortes de energía constantes. Para contrarrestar estos problemas se ha optado por una solución más viable y efectiva, la cual fue hacer un sistema eléctrico distribuido llamado Micro-Red (MG) y así obtener fiabilidad en el consumo de la energía eléctrica[3][4].

La Micro-Red (MG) es un sistema de distribución a pequeña escala como se muestra en la figura 1 que puede ser operado ya sea de modo “conectado a la red” o en modo isla[5]. Por lo general cuando la Micro-Red (MG) se encuentre en modo “conectado a la red”, las fuentes de generación a pequeña escala actúan como fuentes de energía de compensación automática, esto quiere decir que son encargadas de inyectar potencia demandada a la red. Otra forma de conexión de Micro-Red es “Modo Isla “de esta forma cumple con la desconexión a la red principal.

Al implementar una Micro-Red, la generación utilizada es renovable y no renovable, al ser en gran porcentaje renovable el impacto al medio ambiente es menor teniendo respuestas

positivas a posibles impactos; como ejemplo de generación eléctrica renovable tenemos las siguientes: eólica, paneles fotovoltaicos (PV), mareomotriz [1][6], etc. Así como varios dispositivos de unidades de almacenamiento de energía(EUSs) donde encontramos baterías, supercapacitores y Sistemas de Almacenamiento de Energía Magnética (EUSs), que cumplen con la función de almacenar y generar energía en corriente continua[7][8].

El método de control Droop fue desarrollado en inicio para sistemas desconectados a la red o en otras palabras modo isla, posteriormente viendo la necesidad por implementar al modo conectado a la red propusieron inversores de potencia cumpliendo la misma función del control Droop para agilizar las transiciones del modo en funcionamiento, debido a que la estructura del control no cambia durante las transiciones de modo isla a modo conectado a la red o viceversa[9][10].

La MG DC investigada es un modelo de la “IEEE AMERICAN LATINA TRANSACTIONS” de 10 barras su característica es el uso de generación fotovoltaica, eólica, diésel y unidades de almacenamiento de energía (EUSs) etc. Este sistema de generación de corriente continua se encuentran conectado a una barra DC/DC a través de convertidores de potencia, puede considerarse un acoplamiento con turbinas de viento AC pasando por una conversión a DC y subsiguiente ser conectadas a una barra de corriente continua[11].

Los convertidores de potencia adaptados en la MG DC es capaz de establecer un nivel de tensión de 10kV en la red y mantener el sistema eléctrico de potencia estable, entre otra de sus funciones puede elevar niveles de tensión como en el caso del fotovoltaico que genera valores

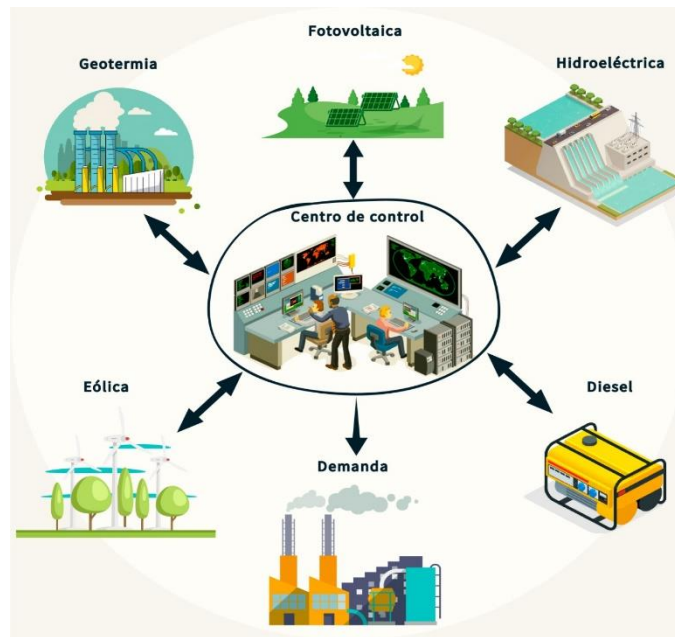


Figura 1. Esquema general Micro-Red.

inferiores a 10kV posteriormente se conecta un convertidor de potencia elevador DC/DC con el propósito de llegar al nivel de voltaje base, sin presencia de generadores síncronos adicionales [12][13].

El método de “Control Droop” analiza la potencia transferida por los convertidores en modelo investigado promoviendo el intercambio de corriente entre convertidores de potencia en paralelo conectados a la MG DC sin la necesidad de un control central, el propósito del control es mantener niveles de voltaje estables[9][10].

2 Marco Teórico.

2.1 MG y energía renovable.

Los sistemas de distribución eléctrica llamados MG como se muestra en la figura 2 tienen como objetivo otorgar un servicio continuo y de calidad de tal forma que no exista interrupción del suministro energético[14]. El manejo de la energía eléctrica brinda muchas ventajas ya que es fácil y eficiente su transporte, al igual que es accesible a

lugares lejanos y subdividirse en niveles de tensión para el consumidor final.

Al existir un aumento del consumo de energía eléctrica y la gran dependencia de países en utilizar combustibles fósiles, han surgido nuevos estudios en generar energía eléctrica sin contaminación[15] [7]. Como resultado las fuentes de energía renovable tienen gran impulso debido a que su impacto en el ambiente es mucho menor, varios países han apostado al desarrollo de tecnologías en el ámbito de generación eólica y fotovoltaica[15][16]. El concepto de generación distribuida se define como un grupo de generadores de energía renovable o no renovable, líneas de transmisión, cargas y sistemas de almacenamiento de energía. Optar por utilizar MG tiene algunas ventajas como el reducir pérdidas en la red, aliviar el transporte de energía eléctrica y disminución del impacto ambiental del sistema eléctrico.

Las aplicaciones de MG se pueden utilizar en diferentes sectores como son el sector doméstico, sector industrial y a la vez directamente proporcional al sector económico. Al actuar en el sector doméstico comprende en abastecer de

energía eléctrica a viviendas comunes que hoy en día abarcan el nivel de viviendas Smart Home más conocidas como viviendas de consumo energético es muy bajo[17].

En la figura 2 se expone una MG de corriente continua que consta de generación fotovoltaica, eólica, diésel y unidades de almacenamiento al igual de cargas DC conectadas a una barra DC, para esto es necesario el uso de convertidores de potencia para la transformación de potencia AC/DC en el caso de generación eólica y diésel[18].

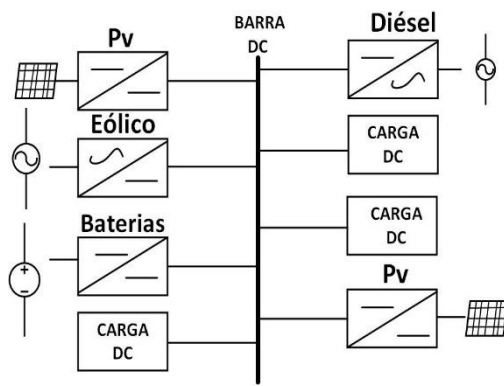


Figura 2. Topología de una Micro-Red DC.

2.1.1 Generación fotovoltaica.

La energía solar fotovoltaica [19] se obtiene de la conversión directa de energía emitida por la radiación solar en energía eléctrica.

Los módulos o colectores de celdas fotovoltaicas está formado por dispositivos semiconductores tipo diodos que tienen la función de tomar la radiación solar mediante un proceso químico, provocando una agitación entre los electrones obteniendo corriente eléctrica continua que posterior puede ser aprovechada y transformada en corriente alterna y así ser sincronizada a la red principal o a un sistema de distribución eléctrica[6]. Las tecnologías fotovoltaicas[20] tiene varias ventajas al tratarse de ser equipos limpios, silenciosos y confiables, de la misma manera al tener un impacto al ambiente

muy bajo, una duración de varios años sin la necesidad de mantenimientos frecuentes.

La potencia generada por los colectores fotovoltaicos[21] se puede expresar mediante las ecuaciones (1) y (2).

$$T_{cell} = T_{amb} + \frac{(NOCT - 20)}{800} * G \quad (1)$$

$$P_{ph} = P_{stc} = \left\{ \frac{G}{1000} [1 + \alpha(T_{cell} - 25)] \right\} \quad (2)$$

Donde

- G : Irradiación solar [W/m^2]
- T_{amb} : Temperatura ambiente [$^{\circ}C$]
- $NOCT$: Condición de temperatura nominal [$^{\circ}C$]
- α : Coeficiente de potencia-temperatura [$\%/^{\circ}C$]
- T_{cell} : Temperatura de la celda [$^{\circ}C$]
- P_{stc} : Potencia bajo condiciones estándar de prueba [W]
- P_{ph} : Potencia de salida de la celda

2.1.2 Generación eólica.

Es la energía que se obtiene del viento, al utilizar la energía cinética dada por masas del aire, las máquinas encargadas de hacer esta transformación de energías se las conoce como aerogeneradores, aeroturbinas o turbinas eólicas[22].

El principio de funcionamiento es el viento que impacta [23] sobre las paletas del aerogenerador y lo hace girar a grandes velocidades, este movimiento de rotación es acoplado al generador a través de un sistema multiplicador de varias velocidades[23]. El generador producirá corriente eléctrica alterna que será enviada por líneas de transmisión a una subestación y posterior al consumidor final[24].

La potencia generada por los aerogeneradores es expresada en la ecuación (3).

$$P = 1/2 (\rho * A * u^3) \quad (3)$$

Donde

- ρ : Densidad del aire
- A : Área de barrido por el viento
- u : Velocidad del viento

2.1.3 Banco de baterías.

En un sistema eléctrico de potencia el uso de la batería es indispensable por su almacenamiento de energía constantes[25]. Por consiguiente, en sistemas distribuidos fotovoltaicos son un elemento necesario ya que ante caídas de tensiones las baterías son las encargadas de compensar tensiones requeridas. Las baterías cumplen con tres funciones primordiales:

- Almacenamiento de energía otorgada por elementos de generación tales como fotovoltaico en la mayor parte.
- Elevador de potencia requerida en la MG.
- Estabilidad de tensión de trabajo de la instalación.

El cálculo del voltaje de la batería[26] durante el periodo de carga y descarga se expresa durante la ecuación (4).

$$V_b(t) = V_{oc}(t) + I_b(t)R_{cell}(t) \quad (4)$$

Donde

- $V_b(t)$: Voltaje de la celda de batería [V(t)]
- $V_{oc}(t)$: Voltaje de la celda de batería en circuito abierto [V(t)]
- $R_{cell}(t)$ Resistencia interna de la celda de batería [$\Omega(t)$]
- $I_b(t)$: Corriente de la celda de batería, valor (+) durante la carga y

2.2 Descripción del método de Droop control tradicional.

Para poder comprender el estudio del método de control Droop deberíamos partir por el concepto del mismo, una de

sus traducciones en español es “caída” o “decaimiento “se lo conoce como “control de caída”[27] [28].

Dicha caída se refiere a la velocidad de los generadores sincrónicos conectados a la red eléctrica, lo que provoca un decaimiento tanto en frecuencia como en voltaje[29]. El método de control Droop puede ser expresado en la ecuación (5).

$$v_{dci} = v^*_i - i_{dci}r_i \quad (5)$$

Donde

- v_{dci} : Voltaje de salida [V].
- v^*_i : Voltaje de referencia Droop [V].
- i_{dci} : Corriente de salida Droop [A].
- r_i : Resistencia virtual del sistema [Ω].

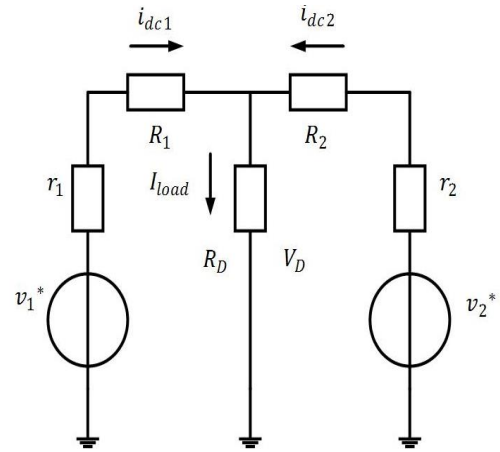


Figura 3. Circuito equivalente de una Micro-Red DC usando control Droop.

La figura 3 muestra el circuito simplificado de una MG DC utilizando en varios sistemas de distribución con la finalidad de operar con el método de control Droop por lo cual asumiendo cargas puramente resistivas es decir con carga en W y con valores reactivos muy pequeños manteniendo la red estable[30]. Al ser puramente resistiva las pérdidas son mucho menores desde generación hasta distribución, los sistemas eléctricos de potencia no deben tener pérdidas, por tanto, el uso

del Droop mejoraría sustentablemente el funcionamiento y aumentaría la fiabilidad del sistema.

En primera instancia el control Droop fue creado para sistemas convencionales a pequeña escala a consecuencia de esto no opera con sistemas de comunicación extensos, por lo contrario su comunicación es de pocos elementos de muestreo lo que incrementa su confiabilidad[31][32]. El voltaje de la barra DC, puede ser expresado en las siguientes ecuaciones (6) (7):

$$V_d = v_1^* - i_{dc1}(r_1 - R_1) \quad (6)$$

$$V_d = v_2^* - i_{dc2}(r_2 - R_2) \quad (7)$$

Donde

V_d : Voltaje DC en la barra [V].

v_1^* : Voltaje de generación 1 [V].

v_2^* : Voltaje de generación 2 [V].

r_1, r_2 : Resistencias virtuales del sistema [Ω].

R_1, R_2 : Resistencias virtuales del sistema [Ω].

i_{dc1}, i_{dc2} : Corrientes a la salida de generación [A].

Una de sus principales desventajas es acoplar un esquema de conexión en paralelo, consiste en extraer partes proporcionales de potencias P y Q[33], utilizando lazos de control, que son las desviaciones de P- ω y Q- E. Por lo dicho, el control basado en el concepto Droop tiene sus propias estrategias como se observa en la figura 4, para cada nivel de estructura jerárquica cada nivel consta de lo siguiente:

- **Control Primario:** Su función es utilizar mediciones locales de voltaje y corriente de salida, necesarias posteriormente para

el cálculo de señales P y Q para el método de control Droop.

- **Control Secundario:** Su funcionamiento es enlazar un controlador externo centralizado que usa ecuaciones para reestablecer las desviaciones proporcionadas por el control primario.
- **Control Terciario:** Es utilizado para mejorar la calidad de energía en el PCC.

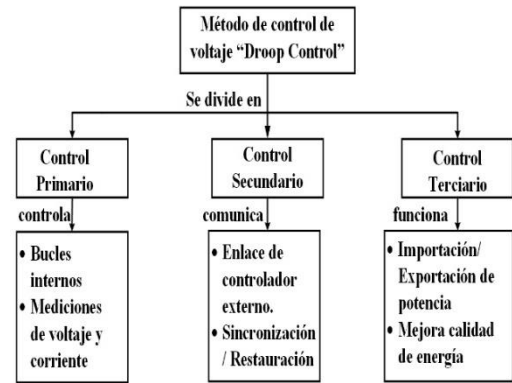


Figura 4. Mapa conceptual jerárquico de control de voltaje Droop.

2.2.1 Control primario Droop.

Mediante el uso del método de control Droop es obtener frecuencia y tensión de referencia[34], que posteriormente actúen como restricciones de control por los convertidores como se muestra en la figura 5 [35]. Las ecuaciones principales del método de control Droop se expresa por las ecuaciones (8) y (9).

La ecuación (8) enlaza la potencia activa con la frecuencia, sabiendo que ambos parámetros tienen un comportamiento en general en la MG. De la misma manera en la ecuación (9) enlaza el voltaje con la potencia reactiva, dichas variables actúan en la MG.

$$f = f_{ref} - m * (P - P_o) \quad (8)$$

$$v = v_{ref} - n * (Q - Q_o) \quad (9)$$

Donde

- f : Frecuencia MG [Hz].
- v Voltaje de salida control primario Droop [V].
- f_{ref} : Frecuencia de referencia para el control Droop [Hz].
- m : Variables propias de control Droop.
- n : Variables propias de control Droop.
- P_o Potencia activa inicial [W].
- Q_o : Potencia reactiva inicial [VAr].

- P : Potencia activa MG [W].
- Q : Potencia reactiva inicial [VAr].
- PI Compensador de potencia activa y reactiva en la MG [W-VAr].

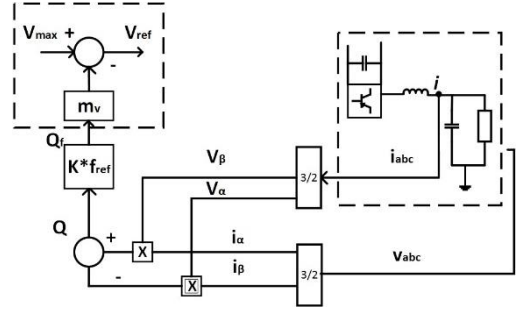


Figura 5. Control primario Droop de tensión y frecuencia.

2.2.2 Control secundario Droop.

El control secundario Droop[36][3] su principal característica es utilizar en la MG un controlador externo no muy extenso que se usa para restaurar las desviaciones de voltaje y frecuencia causados por el control primario[37] como se observa en la figura 6. La frecuencia y el voltaje serán controladas y comparadas con los valores nominales. Posterior un compensador PI acoplara la acción de control para que el error tienda a 0[38].

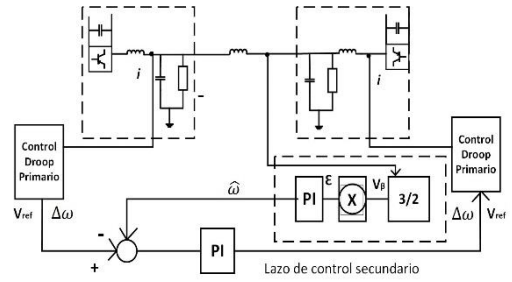


Figura 6. Control secundario Droop de tensión y frecuencia.

Por último, como se expresa en las ecuaciones (10) y (11) la acción será implementada al control Droop primario[39].

$$f = f_{ref} - m * P + PI(f_{ref2} - f_2) \quad (10)$$

$$v = v_{ref} - n * Q + PI(v_{ref2} - v_2) \quad (11)$$

Donde

- f : Frecuencia MG [Hz].
- f_{ref} : Frecuencia de referencia para el control Droop [Hz].
- m : Variables propias de control Droop.
- n : Variables propias de control Droop.

2.2.3 Control terciario Droop.

Cuando la red opera en modo conectado a la red, el flujo de potencia se puede controlar variando la frecuencia y voltaje dentro de la MG[32] como en la figura 7. En este nivel de control Droop cumple con la función de medir la potencia activa y reactiva en las ecuaciones (12) y (13) P_G y Q_G son comparadas con las potencias deseadas P_G^* y Q_G^*

$$\omega^*_{MG} = k_{pP}(P_G^* - P_G) + k_{iP} \int (P_G^* - P_G) dt \quad (12)$$

$$v = v_{ref} - n * Q + PI(v_{ref2} - v_2) \quad (13)$$

Donde

- ω^*_{MG} : Variables controladas por del control droop.
- E^*_{MG} : Variables controladas por el control Droop.
- k_{pP}, k_{iP} : Parámetros de compensación del control Droop.
- k_{pQ}, k_{iQ} : Parámetros de compensación del control Droop.
- P_G : Potencia activa MG[W].
- Q_G : Potencia reactiva inicial [VAr].
- P^*_G : Potencia activa de referencia Droop en la MG [W].
- Q^*_G : Potencia reactiva de referencia Droop en la MG [VAr].

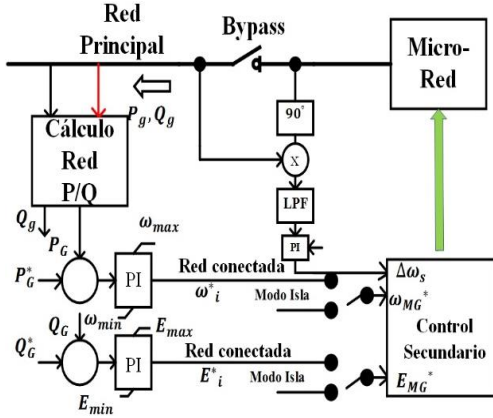


Figura 7. Control terciario Droop de tensión y frecuencia.

2.3 Uso del control Droop en MG de corriente continua.

Al hablar del método “Control Droop” su principio de funcionamiento es poseer una impedancia virtual[30][7]la cual detecta la salida de corrientes, la finalidad es acoplar convertidores de tensión AC/DC en el caso de generación eólica, diésel y en el caso de generación DC/DC como paneles solares fotovoltaicos (PV) y baterías[40][17]. El método control Droop mejorado reduce de manera significativa sensores de corriente y voltaje, es expresado en la ecuación (14).

$$v^*_{dci} = vi^* - ri^* * f(x_i)_{dci} \quad (14)$$

Donde

- $f(x_i)$: Función del convertidor de tensión.
- vi : Variable del convertidor de voltaje[V].
- ri : Resistencia interna del convertidor [Ω].

2.3.1 Convertidores de potencia.

Para utilizar el método de “Control Droop” [41] se implementa convertidores de potencia como, por ejemplo: Boost, Buck, Buck-Boost que son los mas utilizados en una MG de corriente continua. Como se muestra en la figura 8 el convertidor elevador de corriente continua es utilizado por su alto rango de operación y su alta densidad de potencia[10].

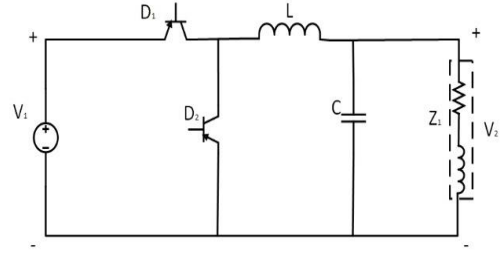


Figura 8. Convertidor elevador bidireccional de corriente DC/DC.

Por el desfase entre el lado primario del transformador de potencia y el lado secundario, la onda no deberá tener armónicos, por tanto, el uso de filtros ayudará a mejorar la forma de onda.

Al aplicar el convertidor bidireccional elevador DC/DC tienen una gran semejanza con los convertidores, por tanto, para la aplicación del método de “Control Droop”[42] es fundamental y al disminuir sensores de corriente, la potencia de salida puede ser calculado indirectamente como se expresa en la ecuación (15).

$$P_B = V_2 I_2 \quad (15)$$

Por tanto V_2 , I_2 son voltaje y corriente de salida DC de los convertidores.

2.4 Métodos para control de convertidores de potencia en paralelo.

Al utilizar fuentes de energía en paralelo en aplicaciones de MG AC,DC mediante el uso de módulos de electrónica de potencia tiene varias ventajas[43][44]. Existe métodos para control de convertidores de potencia en paralelo en una MG que son: maestro-esclavo y “control de caída de voltaje”, en está sección se presentará algunas particularidades de cada método[35][45].

2.4.1 Método de control maestro esclavo.

La figura 9 muestra un diagrama de control maestro-esclavo en donde cada bloque contiene fuentes de corriente continua y corriente alterna, un convertidor de potencia estático y su control[46][47]. El primer bloque contiene un módulo maestro encargado del control de tensión de la barra de corriente continua, los otros módulos son esclavos controlados por corriente.

Este esquema de control maestro-esclavo tiene la desventaja de necesitar un canal de comunicación eficiente y veloz debido a que las corrientes de referencia para convertidores esclavos son dados por el bloque maestro[48].

La falta de comunicación del bloque maestro puede apagar todo el sistema por está razón, para evitar la probabilidad de fallo este sistema debe ser diseñado con mucha rigurosidad[18].

2.4.2 Método de control voltaje Droop.

Al utilizar control droop de voltaje[45], la tensión disminuye considerablemente a medida que la corriente de salida o en algunos parámetros la potencia del convertidor

aumente, como se muestra la figura 10 para dar operación mas estable[49][50].

Está estrategia de control genera un intercambio de corriente entre los convertidores de potencia en paralelo[4] conectados a la red de corriente continua sin la necesidad de implementar un control central.

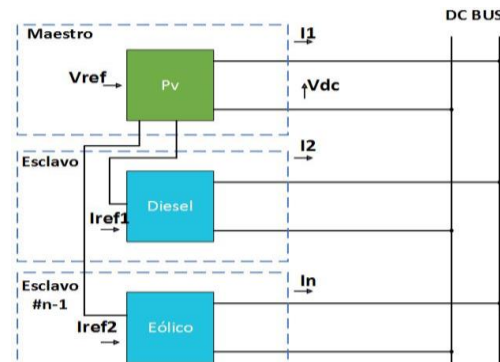


Figura 9. Diagrama del método control maestro-esclavo para convertidores en paralelo.

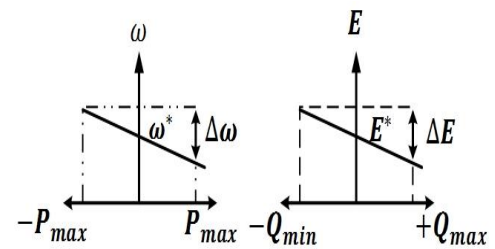


Figura 10. Funciones control Droop P/Q.

Para el cálculo de potencia de referencia se expresa en la siguiente ecuación (16):

$$P_{ref} = G(s) [V_{ref} - (\omega_{LP}/(s + \omega_{LP})) V_{dc}] V_{dc} \quad (16)$$

Donde

$G(s)$: Función de transferencia del sistema de compensación.

V_{ref} : Voltaje de transferencia control droop [V].

ω_{LP} : Frecuencia del filtro pasa bajo [Hz].

- V_{dc} : Tensión de red a la salida del convertidor [V].
- s : Variables propias de control droop.

Cada convertidor de potencia deberá tener su propia protección puesto la urgencia del dimensionamiento de protección del transformador para dicho calculo es necesario encontrar la corriente a que esta expuesta el sistema y será expresada en la siguiente ecuación (17).

$$I_{ref} = \frac{P_{ref}}{V_s} \quad (17)$$

Donde

- I_{ref} : Corriente de referencia del control Droop [A].
- V_s : Voltaje de salida control Droop [V].

3 Planteamiento del problema.

Para el presente estudio se formula el análisis de control Droop de voltaje para modificar potencia activa ante diferentes cargas, con el fin de mejorar perfiles de tensión en cada barra expuestos por un aumento de carga, para solucionar niveles de caídas en tensión, el método de control de voltaje Droop opera de manera constante en todo la MG en forma automática comparando valores de tensión y frecuencia a la entrada de control y suministrando a la salida del control potencia activa y reactiva, puesto que ante un valor de tensión menor al 1 p.u. genera pulsos de frecuencia mayores a IGBTs, estos dan paso a inyección de voltaje y corriente a convertidores de potencia aumentando potencia en cada punto en donde exista falla de esta manera existirá un sintonización de frecuencia correcta entre convertidores ubicados en la MG, todo esto solucionando el problema de caídas de tensión con la finalidad de mantener estable la MG, al simular en un modelo

expuesto por "IEEE AMERICAN LATINA TRANSACTIONS" de 10 nodos al utilizar bloques propios en Matlab Simulink de generación eólica y fotovoltaica conectadas en paralelo, como se observa en la figura 12 este modelo de distribución, cumple con las especificaciones de ser una MG DC.

Del lado de baja tensión con 0.38kV en DC y la parte de alto voltaje con tensión de 10kV DC, las barras 1 y 9 existen generadores fotovoltaicos con capacidad nominal 950kW y 50kW respectivamente, de la misma manera la barra 1 existe generación eólica con 1MW, los datos de demanda pico son presentados en la tabla 1 de la misma manera valores de energía de unidades de almacenamiento que trabajan en forma conjunta con los paneles fotovoltaicos.

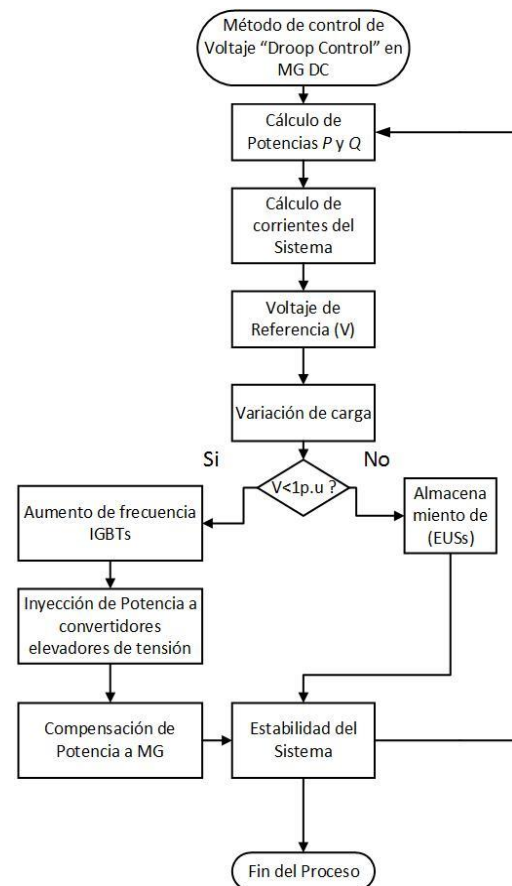


Figura 11. Diagrama de flujo método de voltaje "Droop"

4 Casos de estudio.

En esta sección se interpretan las variaciones que la MG expuesta en la figura 12, al mencionar que se han estructurado escenarios y análisis de resultados para cada simulación.

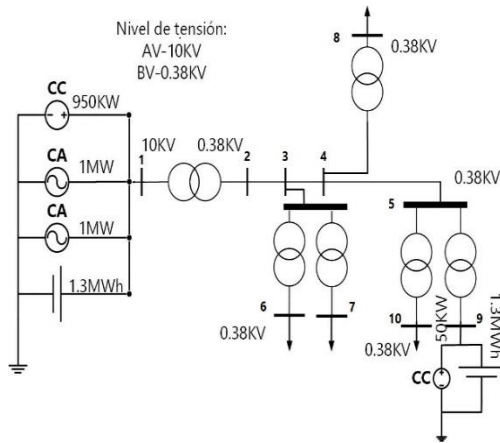


Figura 12. Topología sistema de distribución 10 barras.

Tabla 1. Datos de líneas de red y demanda pico

L	R (p.u)	X (p.u)	P (p.u)	Q (p.u)
L1_2	0.00	0.050	0.00	0.00
L2_3	0.018	0.00495	0.00	0.00
L3_4	0.024	0.00660	0.00	0.00
L4_5	0.036	0.00990	0.00	0.00
L3_6	0.00	0.040	0.30	0.00
L3_7	0.00	0.040	0.20	0.00
L4_8	0.00	0.040	0.15	0.00
L5_9	0.00	0.040	0.00	0.00
L5_10	0.00	0.040	0.15	0.00

Tabla 2. Datos de almacenadores de energía

AE	Nodo	Energía [MWh]	Potencia de Carga [MW]	Potencia de Descarga [MW]
1	1	1.3	0.325	0.325
2	9	0.5	0.100	0.125

4.1 Escenarios: Análisis de perfiles de voltaje.

En el escenario 1 se simulará un aumento de carga del 25% y 50% en barra 6 en la MG original figura 12, como se explica en la tabla 3, sin utilizar compensador y controlador del sistema, se obtuvieron caídas de tensión como se expone en la figura 13.

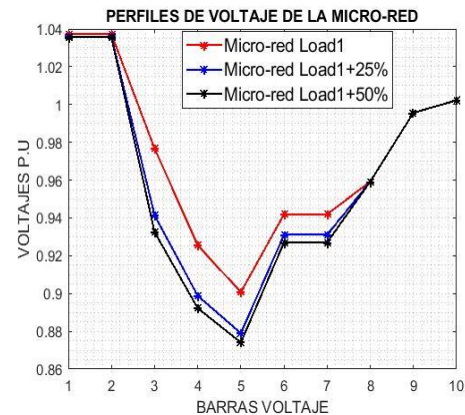


Figura 13. Incrementando carga en barra 6 sin control -compensación de potencia activa.

La gráfica de color azul y negro expone una caída de tensión del valor de la grid por lo ya explicado, la gráfica de color rojo se muestra el valor de tensión en operaciones normales.

Con lo ya expuesto en el escenario 1 y bajo las mismas características, se simulará un aumento de carga en barra 8 como se expone en la tabla 4 provocando caídas de tensión de la misma manera al escenario anterior como se muestra en la figura 14.

Este cambio en la simulación significaría que la red de distribución no estaría en un óptimo funcionamiento. En las figuras 15, 16 las barras 1,2,9,10 no tienen caídas de tensión, debido a ser barras conectadas a la generación, mantienen un valor de 1p.u.

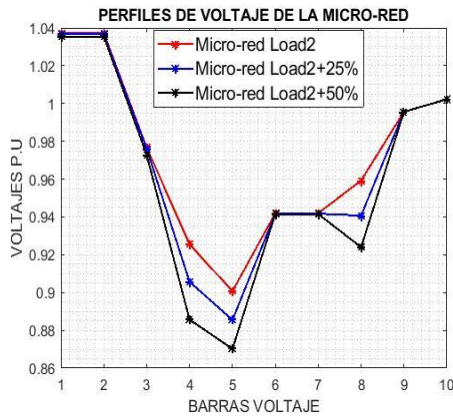


Figura 14. Incrementando carga en barra 8.

Las barras 3,4,5,6,7,8 son barras afectadas al no tener compensación por lo expuesto en escenario 1 y 2, un aumento de carga como se muestra en tablas 3 y 4 respectivo en cada barra, por tanto, provoca que los valores de tensión sean menores al 1 p.u lo que desestabiliza la red de distribución de potencia.

Como se expone en figuras 15, 16 el valor de tensión en la MG representada por la barra roja, así como la barra azul es el incremento de carga en un 25% y la barra amarilla es un aumento del 50% de carga en la MG. Esto quiere decir que debe existir una compensación funcional dentro del sistema capaz de operar ante un aumento de demanda, los valores por unidad en cada barra de tensión se muestran en la tabla 7.

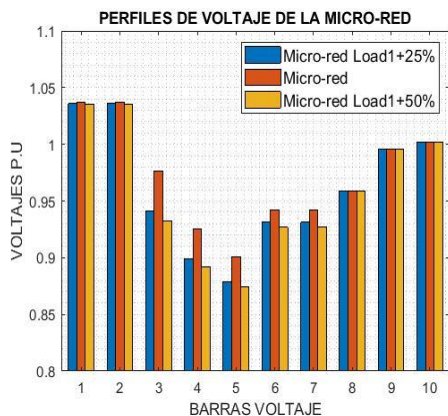


Figura 15. Análisis en perfiles de voltaje p.u en cada barra, escenario 1.

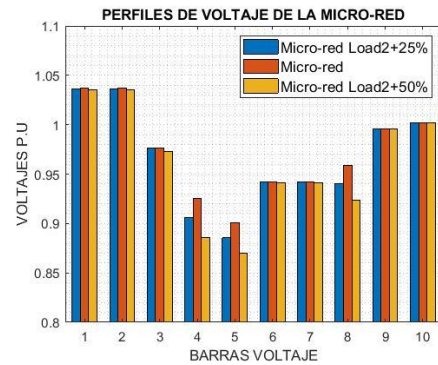


Figura 16. Análisis en perfiles de voltaje p.u en cada barra, escenario 2.

En el escenario 3 se simulará un aumento de carga al igual de escenarios anteriores como se muestra en la tabla 3, teniendo una variación, ya que en este se pondrá en funcionamiento la compensación y control Droop como se muestra en la figura 17 de la barra 6 implantado en el sistema de distribución eléctrico.

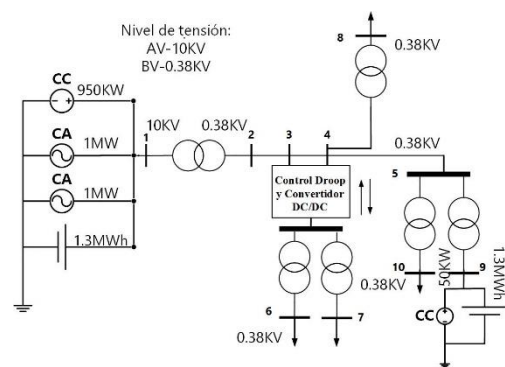


Figura 17. Sistema de distribución 10 barras incluyendo control Droop y compensación en barra 6.

Como se muestra en la figura 18, los valores de tensión compensados serán superiores al valor de la grid, y así obtener un sistema funcional, no se observa que haya una diferencia entre el aumento de las dos cargas por la razón que el compensador actúa de manera conjunta y mantendrá mismos valores de tensión sin importar a cuanto carga sean expuesta el sistema.

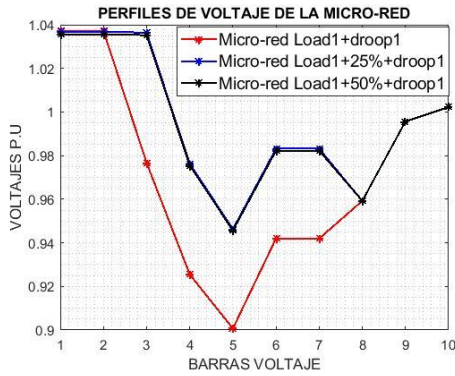


Figura 18. Incrementando carga en barra 6 incluyendo control -compensación de potencia activa.

Por lo planteado en el escenario 3 y con las mismas características de simulación y el aumento de carga como se expone en la tabla 5, la compensación de la barra 8 como se muestra en la figura 19.

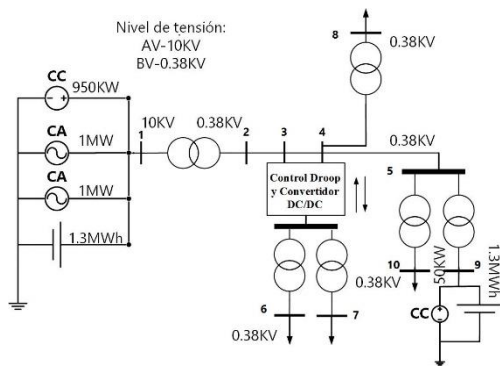


Figura 19. Sistema de distribución 10 barras incluyendo control Droop y compensación en barra 8.

Con lo expuesto en la figura 20, se obtuvo que las gráficas de color azul y negro son valores de tensión compensados en relación al valor de la grid de la misma manera que el escenario anterior no existe una diferencia marcada entre los aumentos de carga. En las figuras 21, 22, se observa que las barras de generación no tendrán una caída de tensión por lo ya expuesto.

Las barras 3,4,5,6,7,8 al entrar en funcionamiento los compensadores en la barra 6 y 8, no existe una caída de tensión manteniendo valores estables cercanos al 1 p.u. como se expone en

tabla 8. Sin importar el aumento de carga, este control puede compensar de forma óptima aumentados valores de carga hasta un 100% de la planteada, sin poner en riesgo la estabilidad del sistema.

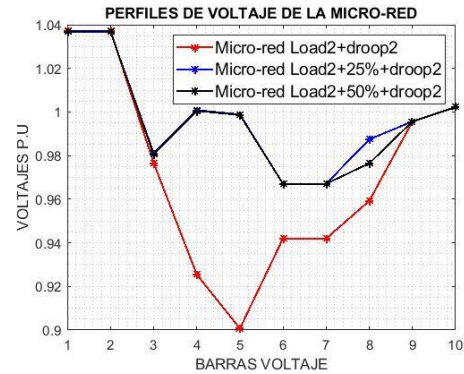


Figura 20. Incrementando carga en barra 8 incluyendo control -compensación de potencia activa.

Como se expone en las figuras 21, 22, las barras de color azul y amarillo son valores de tensión superiores al de la grid por lo ya planteado, además que existe un igbt encargado de entrar en funcionamiento e inyectar potencia por un banco de baterías, para mantener valores de tensión aceptables.

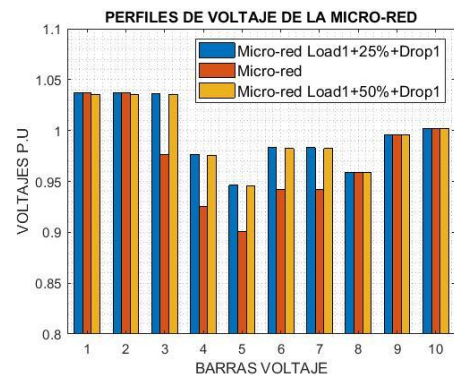


Figura 21. Análisis en perfiles de voltaje p.u en cada barra, escenario 3.

Al terminar el proceso de compensación la MG tiende a tener una estabilidad en todo el sistema manteniendo los convertidores de potencia, trabajando en una en misma frecuencia como se muestra en figura 12 sin la necesidad de amentar pulsos

en cada convertidor con la finalidad de aumentar generación.

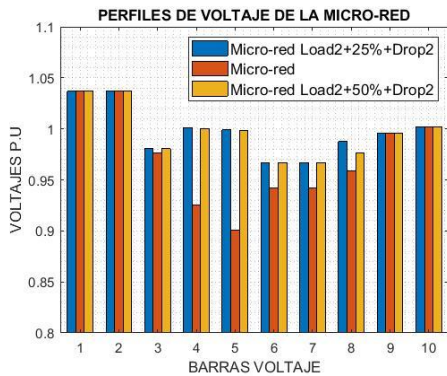


Figura 23. Análisis en perfiles de voltaje p.u en cada barra, escenario 4.

En este escenario 5 se simulará aumento de carga a los valores iniciales del sistema de la misma manera a escenarios anteriores como se muestra en tabla 6, con la diferencia que en esta simulación estará en funcionamiento las compensaciones y control como se expone en las figuras 23, las barras 6 y 8 tienen valores de tensión compensados como se muestra en figura 24.

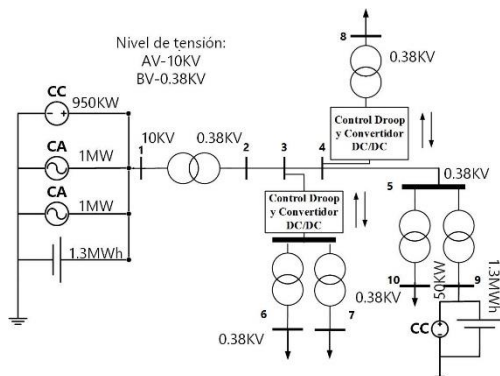


Figura 25. Sistema de distribución 10 barras incluyendo control Droop y compensación en barra 6 y 8.

En la figura 25, al tener un aumento simultaneo de 25% y 50% de carga en barras PV 6 y 8 como se expone en la tabla 5. La compensación opera de una manera optima por lo cual los valores de tensión en carga están en valores aceptables no bajan de 0.9 p.u. en tensión como se expone en la tabla 9 y en este escenario existe un aumento de

carga representativo. Los igbts están inyectando de manera constante potencia almacenada en el banco de baterías.

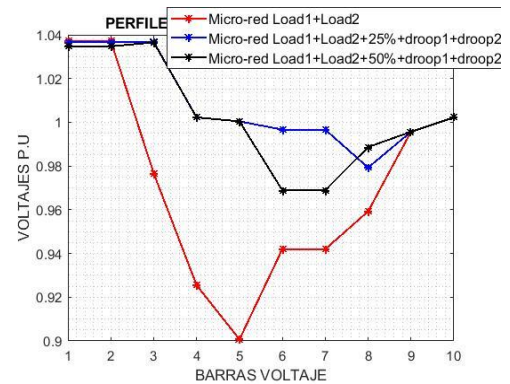


Figura 22. Incrementando carga en barra 6 y 8 incluyendo control -compensación de potencia activa

Por tanto, al tener un sistema completo es decir incluyendo el convertidor bidireccional y control “Droop” los valores de tensión son estables.

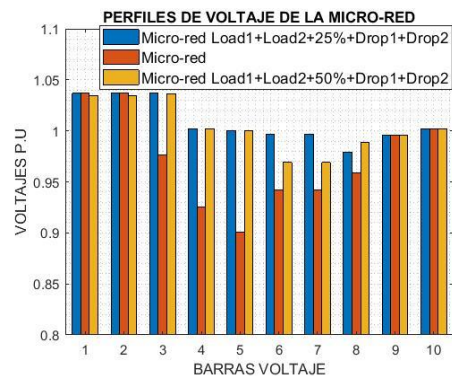


Figura 24. Análisis en perfiles de voltaje p.u en cada barra, escenario 5.

5 Conclusiones.

El aumento de carga del 75 kW y 150 kW en barras 6 y 8 sin el uso del control Droop y convertidor bidireccional DC/DC, provocó caídas de tensión menores a 0.94 p.u. en barras de distribución.

Un aumento en demanda del 75 kW y 150 kW en las barras planteadas, operando con un solo convertidor bidireccional DC/DC y control se

obtuvo niveles de tensión de 0.98 p. u hasta 1 p.u, mejorando la estabilidad del sistema.

Ante aumento de carga del 25% y 50% en la MG, con el uso del control Droop y convertidor bidireccional DC/DC, lo niveles de tensión tendrán valores desde 1 p.u. hasta 1.04 p. u, manteniendo la estabilidad en el sistema.

El uso del control Droop y convertidor bidireccional DC/DC en la MG DC muestra mejoras en barra 3 del 0.94 p. u a 1.04 p. u en voltaje manteniendo una mejora del 10%.

Sin el uso del control Droop y con un solo convertidor bidireccional DC/DC, ante el incremento de carga las barras 6 y 7 tienen una caída en tensión del 0.98 a 0.93 p.u. es un decremento del 5% en voltaje provocando fallas.

El caso más significativo al aplicar el control Droop es en barra 5 al tener un mejoramiento del 15% en voltaje de 0.89 a 1.04. p. u, por consecuencia de elevar el 50% de carga en barra 6.

Al aplicar el control Droop y controlador bidireccional DC/DC, ante un aumento del 25% de carga, la barra 4 es afectada, por tanto, tiende a mejorar de 0.90 p. u a 1 p.u incrementando un 10% en voltaje.

Los resultados demuestran la eficiencia en aplicar el control Droop al compensar valores de tensión desde el 5% hasta 15% p.u, que al no tener operando el control y compensación la MG tendrá caídas de tensión frecuentes.

6 Trabajos futuros.

Para trabajos futuros se propone simular un sistema de distribución eléctrico AC incluyendo energías renovables como la geotermia, bio masa entre otras. Pasando de un sistema de modo isla planteado en este trabajo a un sistema conectado a una red principal y así compensar cargas

activas y reactivas en un mismo instante, de la misma manera la inclusión de banco de baterías en sitios estratégicos para mantener la estabilidad del sistema.

De igual se propone trabajar en varios convertidores bidireccional DC/DC en distintas barras tanto de generación como distribución, acoplar un control central capaz de abarcar la necesidad de un sistema eléctrico de potencia.

7 Referencias.

- [1] C. Wang *et al.*, “A highly integrated and reconfigurable microgrid testbed with hybrid distributed energy sources,” *iee trans. smart grid*, vol. 7, no. 1, pp. 451–459, 2016, doi: 10.1109/tsg.2014.2360877.
- [2] A. G. Sanchez and M. G. Molina, “Desarrollo e implementación de micro-redes eléctricas de corriente continua con integración de recursos energéticos distribuidos,” *xvi eriac*, no. may, 2015.
- [3] C. Jin, J. Wang, . L. Hai, and p. Wang, “Coordination secondary control for autonomous hybrid ac / dc microgrids with global power sharing operation,” pp. 4066–4071, 2016.
- [4] Y. Han *et al.*, “Reduced-order model for dynamic stability analysis of single-phase islanded microgrid with bpf-based droop control scheme,” *iee access*, vol. 7, pp. 157859–157872, 2019, doi: 10.1109/access.2019.2950069.
- [5] Z. Shi, J. Li, H. i. nurdin, and J. e. fletcher, “Comparison of virtual oscillator and droop controlled islanded three-phase microgrids,” *iee trans. energy convers.*, vol. 34, no. 4, pp. 1769–1780, 2019, doi: 10.1109/tec.2019.2922447.

- [6] S. M. Malik, Y. Sun, X. Ai, Z. Chen, and K. Wang, "Small-signal analysis of a hybrid microgrid with high pv penetration," *iee access*, vol. 7, pp. 119631–119643, 2019, doi: 10.1109/access.2019.2937123.
- [7] J. Mohammadi and F. Badrkhani ajaei, "Improved mode-adaptive droop control strategy for the dc microgrid," *iee access*, vol. 7, pp. 86421–86435, 2019, doi: 10.1109/access.2019.2924994.
- [8] R. Shi, X. Zhang, C. Hu, H. Xu, J. Gu, and W. Cao, "Self-tuning virtual synchronous generator control for improving frequency stability in autonomous photovoltaic-diesel microgrids," *j. mod. power syst. clean energy*, vol. 6, no. 3, pp. 482–494, 2018, doi: 10.1007/s40565-017-0347-3.
- [9] N. Science, Q. I. Ziyi, and C. Engineering, "An improved droop control method in microgrid," vol. 34, no. 9, 2015, doi: 10.11956/j.issn.1008-0562.2015.09.012.
- [10] T. Liu, W. Pan, R. Quan, and M. Liu, "A variable droop frequency control strategy for wind farms that considers optimal rotor kinetic energy," *iee access*, vol. 7, pp. 68636–68645, 2019, doi: 10.1109/access.2019.2914496.
- [11] Y. Han, H. Li, P. Shen, E. A. A. Coelho, and J. M. Guerrero, "Review of active and reactive power sharing strategies in hierarchical controlled microgrids," *iee trans. power electron.*, vol. 32, no. 3, pp. 2427–2451, 2017, doi: 10.1109/tpel.2016.2569597.
- [12] S. D. Arco and S. D. Arcosintefno, "Virtual synchronous machines – classification of implementations and analysis of equivalence to droop controllers for microgrids."
- [13] L. Ruiming and W. Shengtie, "Power distribution of parallel converters in islanded microgrid using virtual resistance droop control," *proc. 13th iee conf. ind. electron. appl. iciea 2018*, pp. 1671–1675, 2018, doi: 10.1109/iciea.2018.8397978.
- [14] H. Chen, H. Leng, H. Tang, J. Zhu, H. Gong, and H. Zhong, "Research on model management method for microgrid," *proc. 2017 iee 2nd inf. technol. networking, electron. autom. control conf. itnec 2017*, vol. 2018-janua, pp. 163–166, 2018, doi: 10.1109/itnec.2017.8284930.
- [15] L. Che, M. Shahidehpour, A. Alabdulwahab, and Y. Al-turki, "Hierarchical coordination of a community microgrid with ac and dc microgrids," *iee trans. smart grid*, vol. 6, no. 6, pp. 3042–3051, 2015, doi: 10.1109/tsg.2015.2398853.
- [16] M. Eskandari, L. Li, and M. H. Moradi, "Decentralized optimal servo control system for implementing instantaneous reactive power sharing in microgrids," *iee trans. sustain. energy*, vol. 9, no. 2, pp. 525–537, 2018, doi: 10.1109/tste.2017.2747515.
- [17] L. Jia, C. Du, C. Zhang, and A. Chen, "An improved droop control method for reducing current sensors in dc microgrid," *proc. - 2017 chinese autom. Congr. cac 2017*, vol. 2017-janua, pp. 4645–4649, 2017, doi: 10.1109/cac.2017.8243599.

- [18] C. Li, F. de bosio, S. K. chaudhary, M. Graells, J. C. Vasquez, and J. M. Guerrero, "Operation cost minimization of droop-controlled dc microgrids based on real-time pricing and optimal power flow," *iecon 2015 - 41st annu. conf. ieee ind. electron. soc.*, pp. 3905–3909, 2015, doi: 10.1109/iecon.2015.7392709.
- [19] Y. Yongjian *et al.*, "Research on dynamic adaptive droop control strategy for microgrid," *2nd ieee conf. energy internet energy syst. integr. ei2 2018 - proc.*, no. 1, pp. 1–4, 2018, doi: 10.1109/ei2.2018.8582401.
- [20] L. Xijun, R. Jiayu, Y. Libin, and H. Wei, "Research on output controllability of photovoltaic grid connected generation system with hybrid energy storage," *proc. - 2017 int. conf. smart grid electr. autom. icsgea 2017*, vol. 2017-janua, pp. 92–95, 2017, doi: 10.1109/icsgea.2017.44.
- [21] S. Eftekharnejad, G. T. Heydt, and V. Vittal, "Optimal generation dispatch with high penetration of photovoltaic generation," *ieee trans. sustain. energy*, vol. 6, no. 3, pp. 1013–1020, 2015, doi: 10.1109/tste.2014.2327122.
- [22] H. Xu and Z. Pan, "An adaptive droop control strategy of energy storage control for microgrid with wind power and energy storage systems," *2017 20th int. conf. electr. mach. syst. icems 2017*, 2017, doi: 10.1109/icems.2017.8056217.
- [23] C. X. Rosero, M. Velasco, P. Martí, A. Camacho, J. Miret, and M. Castilla, "Active power sharing and frequency regulation in droop-free control for islanded microgrids under electrical and communication failures," *ieee trans. ind. electron.*, vol. 67, no. 8, pp. 6461–6472, 2020, doi: 10.1109/tie.2019.2939959.
- [24] J. Zhang, J. Chen, X. Chen, and C. Gong, "Modelling, analysis and design of droop-controlled parallel three phase voltage source inverter using dynamic phasors method," *ieee transp. electrif. conf. expo, itec asia-pacific 2015 - conf. proc.*, pp. 1–6, 2017, doi: 10.1109/itec-ap.2015.6941006.
- [25] G. A. Pavón Narváez, "Cálculo del rendimiento de baterías en sistemas fotovoltaicos usando criterios de eficiencia energética," 2018.
- [26] M. Alramlawi, Y. Souidi, and P. li, "Optimal design of pv-battery microgrid incorporating lead-acid battery aging model," *proc. - 2019 ieee int. conf. environ. electr. eng. 2019 ieee ind. commer. power syst. eur. eeeic/cps eur. 2019*, 2019, doi: 10.1109/eeeic.2019.8783927.
- [27] "Esquemas de control para micro-redes de potencia," 2018.
- [28] A. Maknouninejad, Z. Qu, F. L. Lewis, and A. Davoudi, "Optimal, nonlinear, and distributed designs of droop controls for dc microgrids," *ieee trans. smart grid*, vol. 5, no. 5, pp. 2508–2516, 2014, doi: 10.1109/tsg.2014.2325855.
- [29] P. Toma, P. Dorin, E. Radu, and L. Eniko, "Small signal induction generator model connected in a frequency-droop controlled renewable energy microgrid," *proc. int. spring semin. electron. technol.*, vol. 2016-septe, pp. 296–300, 2016,

- doi:
10.1109/isse.2016.7563208.
- [30] F. Gao, S. Bozhko, G. Asher, and P. Wheeler, "An improved voltage compensation method for droop-controlled system in dc microgrid," *iecon proc. (industrial electron. conf.)*, pp. 1240–1246, 2014, doi: 10.1109/iecon.2014.7048661.
- [31] C. Christensen, J. W. Lee, S. Liu, P. T. Bremer, G. Scorzelli, and V. Pascucci, "Embedded domain-specific language and runtime system for progressive spatiotemporal data analysis and visualization," *iee symp. large data anal. vis. 2016, ldav 2016 - proc.*, no. c, pp. 1–10, 2017, doi: 10.1109/ldav.2016.7874304.
- [32] L. Zhang, H. Zheng, Q. Hu, B. su, and L. Lyu, "An adaptive droop control strategy for islanded microgrid based on improved particle swarm optimization," *iee access*, vol. 8, pp. 3579–3593, 2020, doi: 10.1109/access.2019.2960871.
- [33] S. Nandkeolyar and P. K. Ray, "Enhancement of power flow and frequency response using droop-controlled inverters in microgrid operation," *proc. - 2019 int. conf. inf. technol. icit 2019*, pp. 99–102, 2019, doi: 10.1109/icit48102.2019.00024.
- [34] W. Jiang, C. Yang, Z. Liu, M. liang, P. Li, and G. Zhou, "A hierarchical control structure for distributed energy storage system in dc micro-grid," *iee access*, vol. 7, pp. 128787–128795, 2019, doi: 10.1109/access.2019.2939626.
- [35] H. Liu, Y. Chen, S. Li, and Y. Hou, "Improved droop control of isolated microgrid with virtual impedance," *iee power energy soc. gen. meet.*, no. 51207044, pp. 0–4, 2016, doi: 10.1109/pesmg.2013.6672849.
- [36] W. Liu, W. Gu, J. Chen, Z. Zhu, and W. Xie, "Distributed secondary control of droop-controlled microgrid using averaged feedback reward pinning," *iee access*, vol. 7, pp. 183940–183947, 2019, doi: 10.1109/access.2019.2958860.
- [37] L. Jun, Y. Zhichao, H. Sipeng, L. Haitao, C. Fan, and C. Guilin, "An improved droop control method with ability of secondary frequency control for micro-grid inverters," *china int. conf. electr. distrib. ciced*, vol. 2015-decem, no. ciced, pp. 452–455, 2015, doi: 10.1109/ciced.2015.6991748.
- [38] Z. Shuai, S. Mo, J. Wang, Z. J. Shen, W. Tian, and Y. Feng, "Droop control method for load share and voltage regulation in high-voltage microgrids," *j. mod. power syst. clean energy*, vol. 4, no. 1, pp. 76–86, 2016, doi: 10.1007/s40565-015-0176-1.
- [39] T. Wu, Z. Liu, J. Liu, B. Liu, and S. Wang, "Small ac signal droop based secondary control for microgrids," no. 1, pp. 3370–3375, 2016.
- [40] Q. C. Zhong and G. C. Konstantopoulos, "Current-limiting droop control of grid-connected inverters," *iee trans. ind. electron.*, vol. 64, no. 7, pp. 5963–5973, 2017, doi: 10.1109/tie.2016.2622402.
- [41] J. Yu, W. Ming, L. Haitao, L. Yang, and Z. Ying, "Bidirectional droop control of interlinking converter in ac/dc hybrid micro-grid," *proc. - 2016 3rd int. conf. inf. sci. control*

- eng. icisce 2016*, pp. 879–883, 2016, doi: 10.1109/icisce.2016.192.
- [42] F. C. Microgrids, S. D. Arco, and J. A. Suul, “Equivalence of virtual synchronous machines and,” vol. 5, no. 1, pp. 394–395, 2014.
- [43] K. R. Bharath, A. D. Student, and P. Kanakasabapathy, “A simulation study on modified droop control for improved voltage regulation in dc microgrid,” *2017 int. conf. intell. comput. instrum. control technol. icicict 2017*, vol. 2018-janua, pp. 314–319, 2018, doi: 10.1109/icicict1.2017.8342581.
- [44] T. Wu, Z. Liu, J. Liu, B. Liu, and R. An, “A decoupled current droop control method for parallel inverters in microgrids,” *2017 ieee 3rd int. futur. energy electron. conf. ecce asia, ifeec - ecce asia 2017*, pp. 2117–2122, 2017, doi: 10.1109/ifeec.2017.7992378.
- [45] J. A. Ramos-ruiz, P. Enjeti, and L. Xie, “Peer-to-peer energy transaction in microgrids with power electronics enabled angle droop control,” *conf. rec. 3rd ieee int. work. electron. power grid, egrid 2018*, pp. 1–6, 2018, doi:10.1109/egrid.2018.8598671.
- [46] Z. Jin, L. Meng, R. Han, J. M. Guerrero, and J. C. Vasquez, “Admittance-type rc-mode droop control to introduce virtual inertia in dc microgrids,” *2017 ieee energy convers. congr. expo. ecce 2017*, vol. 2017-janua, no. d, pp. 4107–4112, 2017, doi: 10.1109/ecce.2017.8096714.
- [47] S. A. C. Dewapriya, W. A. R. premachandra, R. L. Konthasinghe, R. M. Y. S. Randunu, P. S. Thennakoon, and K. T. M. U. Hemapala, “State of charge based droop controlling of voltage for islanded dc microgrid,” *proc. 4th ieee int. conf. adv. electr. electron. information, commun. bio-informatics, aeeicb 2018*, pp. 1–5, 2018, doi: 10.1109/aeeicb.2018.8480848.
- [48] H. Liu *et al.*, “Small-signal analysis of dc microgrid and multi-objective optimization segmented droop control suitable for economic dispatch,” vol. xx, no. xx, pp. 1–9, doi: 10.35833/mpce.2018.000878.
- [49] F. Akhter, D. E. Macpherson, G. P. Harrison, and W. A. Bukhsh, “Dc voltage droop control implementation in the ac/dc power flow algorithm: combinational approach,” *iet semin. dig.*, vol. 2015, no. cp654, pp. 1–6, 2015, doi: 10.1049/cp.2015.0096.
- [50] C. Zhang *et al.*, “Improved droop control strategy of energy storage converter under grid-side power fluctuation,” *j. eng.*, vol. 2019, no. 16, pp. 3341–3344, 2019, doi: 10.1049/joe.2018.8396.

8 Anexos.

Tabla 3. Aumento de carga del 25% y 50% en barra 6

L	P (p.u)	P 1(p.u) 25%	P 2(p.u) 50%
L1_2	0.00	0.00	0.00
L2_3	0.00	0.00	0.00
L3_4	0.00	0.00	0.00
L4_5	0.00	0.00	0.00
L3_6	0.30	0.375	0.45
L3_7	0.20	0.00	0.00

L4_8	0.15	0.00	0.00
L5_9	0.00	0.00	0.00
L5_10	0.15	0.00	0.00

Tabla 4. Aumento de carga del 25% y 50% en barra 8

L	P (p.u)	P 1(p.u) 25%	P 1(p.u) 50%
L1_2	0.00	0.00	0.00
L2_3	0.00	0.00	0.00
L3_4	0.00	0.00	0.00
L4_5	0.00	0.00	0.00
L3_6	0.30	0.00	0.00
L3_7	0.20	0.00	0.00
L4_8	0.15	0.1875	0.225
L5_9	0.00	0.00	0.00
L5_10	0.15	0.00	0.00

Tabla 5. Aumento de carga del 25% y 50% en barra 8

L	P (p.u)	P 1(p.u) 25%	P 1(p.u) 50%
L1_2	0.00	0.00	0.00
L2_3	0.00	0.00	0.00
L3_4	0.00	0.00	0.00
L4_5	0.00	0.00	0.00
L3_6	0.30	0.00	0.00
L3_7	0.20	0.00	0.00
L4_8	0.15	0.1875	0.225
L5_9	0.00	0.00	0.00
L5_10	0.15	0.00	0.00

Tabla 6. Aumento de carga del 25% y 50% en barra 6 y 8

L	P (p.u)	P 1(p.u) 25%	P 1(p.u) 50%
L1_2	0.00	0.00	0.00
L2_3	0.00	0.00	0.00
L3_4	0.00	0.00	0.00
L4_5	0.00	0.00	0.00
L3_6	0.30	0.375	0.45
L3_7	0.20	0.00	0.00
L4_8	0.15	0.1875	0.225
L5_9	0.00	0.00	0.00
L5_10	0.15	0.00	0.00

Tabla 7. Valores de tensión sin compensación p.u, escenario 1 y 2

Barra	Escenario 1		Escenario 2	
	25%	50%	25%	50%
1	1.04	1.04	1.04	1.04
2	1.04	1.04	1.04	1.04
3	0.94	0.93	0.98	0.97
4	0.90	0.89	0.91	0.89
5	0.90	0.89	0.91	0.87
6	0.93	0.93	0.94	0.94
7	0.93	0.93	0.94	0.94
8	0.96	0.86	0.94	0.92
9	1.00	1.00	1.00	1.00
10	1.00	1.00	1.00	1.00

Tabla 8. Valores de tensión p.u al incluir compensación, escenario 3 y 4

Barra	Escenario 3		Escenario 4	
	25%	50%	25%	50%
1	1.04	1.04	1.04	1.04
2	1.04	1.04	1.04	1.04
3	1.04	1.04	0.98	0.98
4	0.98	0.98	1.00	1.00
5	0.98	0.98	1.00	1.00
6	0.98	0.98	0.97	0.97
7	0.98	0.98	0.97	0.97
8	0.96	0.96	0.99	0.98
9	1.00	1.00	1.00	1.00
10	1.00	1.00	1.00	1.00

Tabla 9. Valores de tensión p.u al incluir compensación, escenario 5

Barra	Escenario 5	
	25%	50%
1	1.04	1.04
2	1.04	1.04
3	1.04	1.04
4	1.00	1.00
5	1.00	1.00
6	1.00	1.00
7	1.00	1.00

8	1.00	1.00
9	1.00	1.00
10	1.00	1.00

Matriz de estado del arte

ITEM	AÑO	DATOS			TEMÁTICA					FORMULACIÓN DEL PROBLEMA FUNCIONES OBJETIVO					RESTRICCIONES DEL PROBLEMA				PROPUESTAS PARA RESOLVER EL PROBLEMA				SOLUCIÓN PROPUESTA						
		TÍTULO DEL ARTÍCULO	PAÍS	CITAS	MICRO-RED	ENERGÍA RENOVABLE	RESPUESTA A LA DEMANDA	CONVERSORES DE POTENCIA	CONTROL DROOP	CAPACIDAD DE GENERACIÓN	CAPACIDAD DE ALMACENAMIENTO	COMPENSACIÓN BIDIRECCIONAL DC/DC	MICRO-RED AC/DC	GENERACIÓN DISTRIBUIDA	GENERACIÓN EÓLICA	GENERACIÓN FOTOVOLTAICA	LIMITACIÓN DE VOLTAJES EN BARRAS	LIMITACIÓN DE CAPACIDAD DE ALMACENAMIENTO	IMPLEMENTACIÓN DE MICRO-REDES	SIMULACIÓN	IMPLEMENTACIÓN DE CONTROL	INCREMENTO EN DEMANDA	IMPLEMENTACIÓN COMPENSADOR BIDIRECCIONAL DC/DC	ANÁLISIS DE PERFILES DE VOLTAJE	ESTABILIDAD DEL SISTEMA	CONTROL DE CONVERTIDORES DE POTENCIA	ALMACENAMIENTO E INYECCIÓN DE POTENCIA A LA RED	ANÁLISIS DE CORRIENTE EN LA RED	DISTRIBUCIÓN EQUITATIVA DE
1	2020	REDUCED-ORDER MODEL FOR DYNAMIC STABILITY ANALYSIS OF SINGLE-PHASE ISLANDED MICROGRID WITH BPF-BASED DROOP CONTROL SCHEME	China	2	X	X		X	X			X	X	X	X	X			X		X			X	X			X	X
2	2019	SMALL-SIGNAL ANALYSIS OF A HYBRID MICROGRID WITH HIGH PV PENETRATION	Pakistan	2	X	X	X	X	X			X	X			X	X		X	X	X		X	X	X			X	
3	2019	IMPROVED MODE-ADAPTIVE DROOP CONTROL STRATEGY FOR THE DC MICROGRID	Canada	3	X			X															X						
4	2019	OPTIMAL DESIGN OF PV-BATTERY MICROGRID INCORPORATING LEAD-ACID BATTERY AGING MODEL	Alemania	1	X	X		X	X	X	X				X		X	X	X	X		X	X			X	X		
5	2019	DISTRIBUTED SECONDARY CONTROL OF DROOP-CONTROLLED MICROGRID USING AVERAGED FEEDBACK REWARD PINNING	China	1	X			X	X							X	X		X					X					
6	2019	IMPROVED DROOP CONTROL STRATEGY OF ENERGY STORAGE CONVERTER UNDER GRID-SIDE POWER FLUCTUATION	USA	1			X		X								X		X				X		X	X			
7	2019	SELF-TUNING VIRTUAL SYNCHRONOUS GENERATOR CONTROL FOR IMPROVING FREQUENCY STABILITY IN AUTONOMOUS PHOTOVOLTAIC-DIESEL MICROGRIDS	China	1	X	X		X	X				X	X			X		X	X									
8	2019	DECENTRALIZED OPTIMAL SERVO CONTROL SYSTEM FOR IMPLEMENTING INSTANTANEOUS REACTIVE POWER SHARING IN MICROGRIDS	China	1	X			X	X	X		X	X	X	X			X	X	X		X	X		X	X			X
9	2019	CÁLCULO DEL RENDIMIENTO DE BATERÍAS EN SISTEMAS FOTOVOLTAICOS USANDO CRITERIOS DE EFICIENCIA ENERGÉTICA	Ecuador	1		X				X	X				X		X		X							X			
10	2018	ESQUEMAS DE CONTROL PARA MICRO-REDES DE POTENCIA	México	1	X		X		X									X		X	X			X					
11	2018	STATE OF CHARGE BASED DROOP CONTROLLING OF VOLTAGE FOR ISLANDED DC MICROGRID	USA	1	X		X		X			X	X				X				X			X			X		
12	2018	SMALL-SIGNAL ANALYSIS OF DC MICROGRID AND MULTI-OBJECTIVE OPTIMIZATION SEGMENTED DROOP CONTROL SUITABLE FOR ECONOMIC DISPATCH	China	1	X	X	X		X	X			X	X	X	X					X			X		X			X
13	2018	AN ACCURATE POWER CONTROL SCHEME FOR DROOP-CONTROLLED GRID-CONNECTED INVERTERS	China	1	X			X	X										X	X					X				
14	2018	REVIEW OF ACTIVE AND REACTIVE POWER SHARING STRATEGIES IN HIERARCHICAL CONTROLLED MICROGRIDS	China	1	X		X		X			X					X			X			X			X			X
15	2018	RESEARCH ON MODEL MANAGEMENT METHOD FOR MICRO-GRID.	China	1	X					X	X				X		X												

16	2018	AN IMPROVED DROOP CONTROL METHOD FOR REDUCING CURRENT SENSORS IN DC MICROGRID	China	3	X			X	X								X				X	X		X
17	2018	RESEARCH ON OUTPUT CONTROLLABILITY OF PHOTOVOLTAIC GRID CONNECTED GENERATION SYSTEM WITH HYBRID ENERGY STORAGE	China	1		X				X					X							X		X
18	2018	AN ADAPTIVE DROOP CONTROL STRATEGY FOR ISLANDED MICROGRID BASED ON IMPROVED PARTICLE SWARM OPTIMIZATION	USA	2	X			X	X			X					X			X	X			
19	2018	CURRENT-LIMITING DROOP CONTROL OF GRID-CONNECTED INVERTERS	USA	1				X	X			X	X					X						X
20	2018	DISTRIBUTION SYSTEMS OPERATION CONSIDERING ENERGY STORAGE DEVICES AND DISTRIBUTED GENERATION	China	1	X	X				X		X		X	X		X	X				X		
21	2018	A HIGHLY INTEGRATED AND RECONFIGURABLE MICROGRID TESTBED WITH HYBRID DISTRIBUTED ENERGY SOURCES	China	2	X	X				X			X	X	X									X
22	2017	COORDINATION SECONDARY CONTROL FOR AUTONOMOUS HYBRID AC / DC MICROGRIDS WITH GLOBAL POWER SHARING OPERATION	China	2	X			X				X									X	X		
23	2017	SMALL SIGNAL INDUCTION GENERATOR MODEL CONNECTED IN A FREQUENCY-DROOP CONTROLLED RENEWABLE ENERGY MICROGRID	Romania	1	X	X				X			X	X		X							X	X
24	2017	EMBEDDED DOMAIN-SPECIFIC LANGUAGE AND RUNTIME SYSTEM FOR PROGRESSIVE SPATIOTEMPORAL DATA ANALYSIS AND VISUALIZATION	USA	1	X	X		X						X	X						X		X	
25	2017	DROOP CONTROL METHOD FOR LOAD SHARE AND VOLTAGE REGULATION IN HIGH-VOLTAGE MICROGRIDS	USA	1			X		X								X				X			X
26	2017	SMALL AC SIGNAL DROOP BASED SECONDARY CONTROL FOR MICROGRIDS	China	1	X				X			X					X				X		X	
27	2017	BIDIRECTIONAL DROOP CONTROL OF INTERLINKING CONVERTER IN AC/DC HYBRID MICRO-GRID	China	1	X				X			X						X		X	X			X
28	2017	DESARROLLO E IMPLEMENTACIÓN DE MICRO-REDES ELÉCTRICAS DE CORRIENTE CONTINUA CON INTEGRACIÓN DE RECURSOS ENERGÉTICOS DISTRIBUIDOS	Argentina	1	X	X			X	X		X		X	X		X	X						
29	2017	AN IMPROVED DROOP CONTROL METHOD IN MICRO-GRID.	China	2	X		X		X								X	X	X					X
30	2017	A VARIABLE DROOP FREQUENCY CONTROL STRATEGY FOR WIND FARMS THAT CONSIDERS OPTIMAL ROTOR KINETIC ENERGY	China	3	X						X		X	X		X	X					X		
31	2017	HIERARCHICAL COORDINATION OF A COMMUNITY MICROGRID WITH AC AND DC MICROGRIDS	USA	2	X						X			X		X					X			
32	2016	OPERATION COST MINIMIZATION OF DROOP-CONTROLLED DC MICROGRIDS BASED ON REAL-TIME PRICING AND OPTIMAL POWER FLOW	España	1	X			X	X				X	X			X				X		X	
33	2016	OPTIMAL GENERATION DISPATCH WITH HIGH PENETRATION OF PHOTOVOLTAIC GENERATION	USA	1		X			X				X	X							X			
34	2016	POWER DISTRIBUTION OF PARALLEL CONVERTERS IN ISLANDED MICROGRID USING VIRTUAL RESISTANCE DROOP CONTROL	China	2	X			X			X				X		X			X			X	

