

CONTROL ÓPTIMO DE UNA MICRORRED A PARTIR DE UN ENFOQUE
JERÁRQUICO

SEBASTIÁN BENJUMEA CERPA

UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER
FACULTAD DE INGENIERÍAS FÍSICOMECÁNICAS
ESCUELA DE INGENIERÍAS
ELÉCTRICA, ELECTRÓNICA Y DE TELECOMUNICACIONES
BUCARAMANGA
2020

CONTROL ÓPTIMO DE UNA MICRORRED A PARTIR DE UN ENFOQUE
JERÁRQUICO

SEBASTIÁN BENJUMEA CERPA

Trabajo de Grado para optar al título de
Ingeniero Electrónico

Director

Ricardo Alzate Castaño

Doctorado en Ingeniería Informática y Automática

UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER
FACULTAD DE INGENIERÍAS FÍSICOMECÁNICAS
ESCUELA DE INGENIERÍAS
ELÉCTRICA, ELECTRÓNICA Y DE TELECOMUNICACIONES
BUCARAMANGA

2020

DEDICATORIA

Dedicado a mis padres por el apoyo brindado en cada aspecto de mi vida, especialmente a lo largo de mi vida universitaria.

AGRADECIMIENTOS

Agradezco a mi familia por el apoyo brindado durante el desarrollo de este proyecto. También agradezco a mis compañeros por los momentos que compartimos en nuestro paso por la universidad.

Agradezco de manera importante a mi director por su guía y apoyo en el desarrollo de este proyecto.

CONTENIDO

	pág.
INTRODUCCIÓN	14
1. OBJETIVOS	22
2. CONTROL DE RECURSOS DISTRIBUIDOS	23
2.1. CONVERTIDORES ELECTRÓNICOS DE POTENCIA	23
2.1.1. Control del convertidor elevador	24
2.2. CONTROL DROOP	24
2.2.1. Resistencia virtual	28
2.3. CONTROL JERÁRQUICO	29
2.4. CONTROL ÓPTIMO	30
3. CONTROL JERÁRQUICO DE MICRORREDES	33
3.1. TOPOLOGÍA Y DIMENSIONAMIENTO DE LA MICRORRED	33
3.1.1. Convertidor DC/DC elevador	34
3.1.2. Escenario de perturbación	35
3.2. CONTROL DE GENERADORES INDIVIDUALES	38
3.2.1. Diseño del lazo de corriente	38
3.2.2. Diseño del lazo de voltaje	41
3.2.3. Acople de generadores en red	42
3.3. CONTROL POR REPARTO DE POTENCIAS	43
3.3.1. Esquema de control <i>droop</i>	45
3.4. CONTROL SECUNDARIO	45
3.4.1. Gestión dinámica de recursos de la microrred	47

4. RECOMENDACIONES	69
5. TRABAJO FUTURO	70
6. CONCLUSIONES	71
BIBLIOGRAFÍA	74

LISTA DE FIGURAS

	pág.
Figura 1. Esquema general de <i>microrred</i> aislada DC	16
Figura 2. Curvas de caída para generadores	16
Figura 3. Convertidor DC-DC elevador	23
Figura 4. Control de doble lazo para el convertidor DC-DC	24
Figura 5. Modelo simplificado de una <i>microrred</i> DC de dos nodos	26
Figura 6. Curva de Droop en una <i>microrred</i> DC con diferentes valores de R_d	27
Figura 7. Control <i>droop</i> para regulación de voltaje en una <i>microrred</i> DC	28
Figura 8. Esquema de control jerarquico	30
Figura 9. <i>Microrred</i> dimensionada	35
Figura 10. Circuito convertidor-elevador simulado en PSIM	36
Figura 11. Magnitudes nominales a la salida del convertidor-elevador	37
Figura 12. Perfil de generación fotovoltaico	38
Figura 13. Magnitudes de salida en convertidor-elevador perturbado	53
Figura 14. Lazo de control de corriente para el convertidor DC-DC	54
Figura 15. Respuesta temporal para lazo de corriente	55
Figura 16. Lazo de control de voltaje para el convertidor DC-DC	56
Figura 17. Respuesta temporal para lazo de voltaje	57
Figura 18. <i>Microrred</i> a partir de generadores conectados en paralelo	58
Figura 19. Magnitudes de salida en <i>microrred</i> sometida a perturbaciones	59
Figura 20. Corriente de salida en cada generador	60
Figura 21. Sensibilidad de variables eléctricas a R_{di}	61
Figura 22. Variación en potencia de entrada	62
Figura 23. Corriente y potencia de salida bajo esquema <i>droop</i>	63

Figura 24.	Diagrama de flujo algoritmo <i>Newton-Raphson</i> en MATLAB	64
Figura 25.	Cálculo numérico para valores óptimos	65
Figura 26.	Bloque <i>Simplified C Block</i> configurado en PSIM	66
Figura 27.	Aportes de cada generador bajo esquema de despacho económico	67
Figura 28.	Variación de R_{di} y costos asociados	68

LISTA DE TABLAS

	pág.
Tabla 1. Niveles de control jerárquico	19

RESUMEN

TÍTULO: CONTROL ÓPTIMO DE UNA MICRORRED A PARTIR DE UN ENFOQUE JERÁRQUICO *

AUTOR: SEBASTIÁN BENJUMEA CERPA **

PALABRAS CLAVE: CONTROL JERÁRQUICO, ENERGÍAS RENOVABLES, GESTIÓN DE RECURSOS ENERGÉTICOS, MICRORREDES ELÉCTRICAS.

DESCRIPCIÓN:

El presente trabajo de grado presenta el diseño e implementación (a través de simulación) de una estrategia para la gestión optimizada de recursos energéticos en una microrred DC aislada, que hace uso de fuentes renovables. Inicialmente, el trabajo aborda una revisión conceptual acerca del control de circuitos convertidores de potencia del tipo elevador (boost) y se complementa por el problema de reparto de potencias a través de esquemas de control droop. Posteriormente, se establece una estructura jerárquica para gobernar la asignación de proporciones de generación (despacho) en una microrred, atendiendo a criterios de costo definidos considerando recursos renovables. A partir de ello, se toma como caso de estudio una estación de carga para automóviles eléctricos, dimensionada para operar a una carga nominal de 1500 W, y a la cual se aplica la estrategia de control jerárquico utilizando simulaciones en PSIM. Para obtener la asignación dinámica (gestión) de recursos en la microrred se realizó la codificación del algoritmo de Newton-Raphson, como método de aproximación para determinar la solución óptima del problema y por ende, la reducción del costo de operación de la microrred. Trabajos futuros incluyen la extensión de los resultados presentados al caso de sistemas de generación en corriente alterna y la verificación experimental para el algoritmo de gestión de recursos propuesto.

* Trabajo de grado

** Facultad de Ingenierías Físico-Mecánicas. Escuela de Ingenierías Eléctrica, Electrónica y telecomunicaciones. Director: Ricardo Alzate Castaño, Doctorado en Ingeniería Informática y Automática.

ABSTRACT

TITLE: OPTIMAL CONTROL OF A MICROGRID FROM A HIERARCHICAL VIEWPOINT *

AUTHOR: SEBASTIÁN BENJUMEA CERPA **

KEYWORDS: ELECTRICAL MICROGRID, ENERGY RESOURCE MANAGEMENT, HIERARCHICAL CONTROL, RENEWABLE ENERGY.

DESCRIPTION:

In this work, the design and implementation through numerical simulation of an energy management strategy for resources of an isolated DC microgrid employing renewable sources, is performed. First of all, a review about concepts regarding the control of DC electronic power circuits of the boost type and the scheduling of power in generation schemes via the so-called droop control technique, are covered in order to configure a hierarchical structure of power management aiming at implementing economic dispatch of resources attending cost requirements for renewable sources, including as part of a microgrid scheme configured to supply the power demand of a charging station for electric vehicles with a nominal load of 1500 W. Accordingly, numerical simulations in PSIM were performed to verify the hierarchical control scheme achieving dynamical scheduling of generation proportions (power management) by modifying the droop parameter subjected to a cost functional suited for renewable sources. Moreover, the implementation of a numerical Newton-Raphson algorithm was performed in a C-code block of PSIM to approximate the optimal solution, reducing the operation cost of the microgrid. Ongoing work include the extension of presented results to the case of alternating current generation systems and the experimental verification for the dispatch algorithm proposed.

* Bachelor Thesis

** Facultad de Ingenierías Físico-Mecánicas. Escuela de Ingenierías Eléctrica, Electrónica y telecomunicaciones. Director: Ricardo Alzate Castaño, Doctorado en Ingeniería Informática y Automática.

INTRODUCCIÓN

La sostenibilidad del planeta, principalmente ligada a los efectos nocivos del cambio climático, es el gran reto que experimenta actualmente la población mundial para asegurar su supervivencia. Por tanto, satisfacer la demanda de recursos por parte de una sociedad creciente y altamente dependiente de los mismos, supone desafíos no solo a nivel político, económico, social, técnico y tecnológico, sino también medio-ambiental. En ese sentido, se hace necesario reemplazar un modelo de desarrollo industrial basado en combustibles fósiles (principalmente petróleo, carbón y gas natural) por nuevos paradigmas alrededor de formas alternativas de producción energética, con el objetivo de mitigar emisiones contaminantes y el calentamiento global, siguiendo intenciones de gobiernos mundiales consagradas en, por ejemplo, el acuerdo de París y el protocolo de Kyoto ¹.

En este contexto, los sistemas de generación distribuida y más precisamente las *microrredes*, desempeñan una tarea fundamental para integrar al sistema interconectado formas de producción de energía eléctrica basadas en fuentes renovables (hidráulica, solar térmica y fotovoltaica, biomasa, eólica, geotérmica y mareomotriz) ². Una *microrred* se define como un sistema de distribución de baja tensión con recursos distribuidos de energía, junto con dispositivos de almacenamiento (volantes de inercia, capacitores, baterías, entre otros) y cargas flexibles, operados con cone-

¹ C. GARCÍA y col. *El acuerdo de París: Así actuará Colombia frente al cambio climático*. WWF - Colombia, 2016.

² Felipe Andrés BARRERA LOBO. *Control primario con pendiente variable aplicado en microrredes aisladas*. Trabajo de Grado (Ingeniero Civil Eléctrico). Santiago de Chile - Chile: Universidad de Chile, 2016.

xión a la red o de manera autónoma si no dependen de la red principal ³⁴.

Las *microrredes* se pueden clasificar en AC, DC y mixtas (AC/DC), dependiendo de la forma en que se presente la energía en los puntos de conexión. Las *microrredes* AC, constituyen el tipo de *microrred* de mayor uso y poseen facilidad de transformación (incrementos y disminución de magnitud) en variables eléctricas, al igual que sistemas de protección más desarrollados, debido a su uso masivo. Las *microrredes* DC, tienen menores pérdidas en las líneas de transmisión, no presentan flujos de carga reactiva y no requieren sincronización de generadores debido a la ausencia de componentes frecuenciales. Adicional a ello, estas últimas presentan un mayor auge debido a la incorporación de energías renovables como la solar fotovoltaica y las celdas (o pilas) de combustible, de naturaleza en corriente continua. Sin embargo, también requieren sistemas de control más complejos en los circuitos de conversión de energía (convertidores de potencia), para garantizar flujos de potencia apropiados hacia las cargas, muchas veces a través de conversiones de corriente directa en alterna (inversores) ⁵.

Por tanto, dada la volatilidad de las fuentes de energía en arquitecturas de generación distribuida como lo son las *microrredes* aisladas alimentadas por generadores de energía solar o eólica, e incluso grupos electrógenos empleando biocombustible, uno de los elementos más importantes en una *microrred* es su apropiada gestión energética. Por simplicidad, se ilustrará como ejemplo el problema de suministrar a

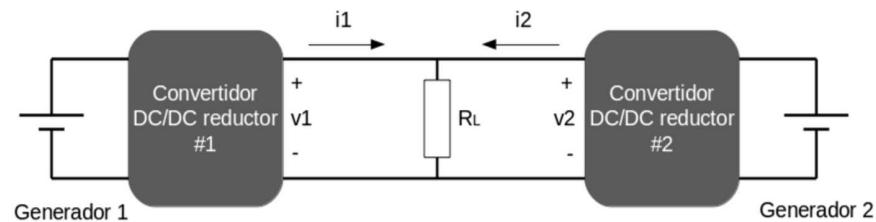
³ E. PLANAS. "Aportaciones al diseño del control jerárquico de microrredes eléctricas". Tesis doct. ESPAÑA: Universidad del País Vasco, Escuela Técnica Superior de Ingeniería de Bilbao, 2013.

⁴ N. HATZIARGYRIOU. *Microgrids: architectures and control*. John Wiley & Sons, 2014.

⁵ E. PLANAS y col. "General aspects, hierarchical controls and droop methods in microgrids: A review". En: *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 17 (2013), págs. 147-159.

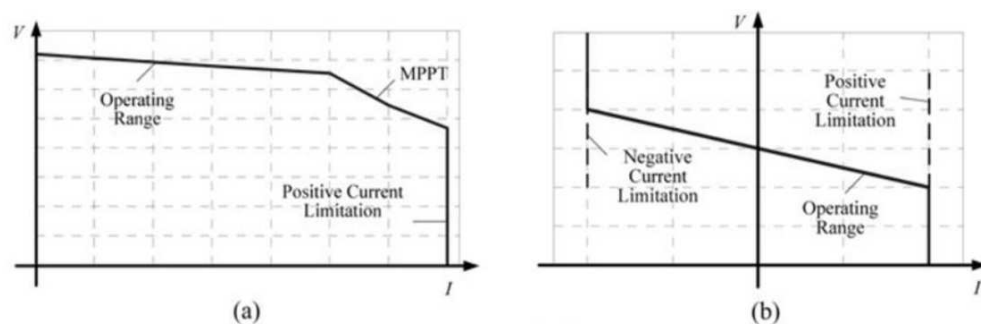
una carga R_L , una potencia P en una *microrred* DC, empleando dos convertidores reductores, conectados a dos fuentes de corriente continua representando un arreglo de paneles fotovoltaicos y un banco de baterías, respectivamente (ver Fig. 1).

Figura 1. Esquema general de *microrred* aislada DC, con dos fuentes que suplen una misma carga



A partir de ello, considere las curvas de caída (o *droop curves* en inglés) ilustradas en la Fig. 2, que relacionan niveles de voltaje vs. niveles de corriente (es decir, niveles límite de potencia) entregados por cada generador ⁶.

Figura 2. Curvas de caída para generadores: (a) fotovoltaico y (b) banco de baterías, en *microrred* DC aislada



Fuente: 6.

⁶ X. LU y col. "An improved droop control method for DC microgrids based on low bandwidth communication with DC bus voltage restoration and enhanced current sharing accuracy". En: *IEEE Transactions on Power electronics* 29.4 (2013), págs. 1800-1812.

Como se observa de dichas curvas, existen límites de corriente (superior e inferior) y por tanto se crea un escenario de múltiples posibilidades respecto a la distribución de proporciones en la asignación de corrientes (y por tanto potencias) hacia la carga. Por ejemplo, considerando constante el voltaje de la barra o bus DC, una proporción 50/50 entre ambos generadores representa un aporte de la mitad de la corriente nominal para la carga a plena potencia. Sin embargo, este límite del 50 % de potencia debería ser un escenario viable para el generador con base, no sólo en las curvas de suministro mostradas en la Fig. 2 sino también en las condiciones reales de operación en el momento de ser requerido, recordando que una *microrred* alimentada por fuentes alternativas sufre el problema de una disponibilidad limitada de recursos. Aún peor es considerar las posibles variaciones en los valores de carga.

De esta manera, se justifica la necesidad de plantear estrategias de control para gestionar los recursos en *microrredes*. De hecho, un simple control en la dinámica no es suficiente para garantizar éxito en la operación del sistema ante un escenario de recursos limitados y/o de carácter volátil. Por tanto, técnicas como el control óptimo son importantes alternativas para asegurar una distribución eficiente de recursos en *microrredes*. En esencia, el control óptimo busca encontrar una ley de control tal que se minimice una función de costo predefinida para el sistema. Técnicas de control óptimo incluyen el control óptimo cuadrático ⁷, el control hamiltoniano ⁸ y el control basado en pasividad ⁹, sólo por mencionar algunas.

⁷ K. OGATA. *Ingeniería de Control Moderna*. PEARSON EDUCACIÓN S.A., 2010.

⁸ R. ALZATE y L. FUENTES. "Optimización hamiltoniana en un circuito convertidor de potencia". En: *Revista Integración: Temas de Matemáticas* 31.2 (2013), págs. 133-146.

⁹ C. J. VEGA y R. ALZATE. "Control óptimo inverso como alternativa para la regulación de un convertidor DC-DC elevador". En: *Tecnura* 19.46 (2015), págs. 65-78.

En sistemas de producción (generación, transmisión y distribución) de energía, es muy popular la técnica de despacho económico para definir la asignación de recursos y costos de operación ¹⁰. Dicha técnica se basa en algoritmos de optimización, que sin embargo analizan variables no sólo a nivel de etapas de generación, sin incorporar información relevante de la dinámica de cargas y/o de elementos de control, así entonces, la conexión de información entre etapas o niveles del sistema, introduce el concepto de descomposición jerárquica ¹¹¹². Lo anterior forma parte de una filosofía de control distribuido, contrario a las soluciones tradicionales de tipo centralizado donde se requiere transmitir una gran cantidad de información entre las unidades del sistema (algunas veces alejadas geográficamente) para generar decisiones en un solo punto. Por otro lado, en un esquema totalmente descentralizado cada unidad es controlada localmente sin conocer el estado de las demás unidades. Un punto intermedio se logra a través del denominado control jerárquico ¹³. Al respecto el ANSI/ISA-95 es un estándar internacional para desarrollo de sistemas de automatización y control que establece los cinco niveles jerárquicos incluidos en la tabla 1

Una adaptación de dicho estándar al caso de microrredes, permite concentrar las jerarquías en los siguientes niveles de control: 1) *terciario*: es la cima de la estructura y es responsable de la operación óptima de la microrred, regulando los flujos

¹⁰ H. SAADAT. *Power System Analysis*. PSA Publishing LLC, 2011.

¹¹ J. M. GUERRERO y col. "Hierarchical Control of Droop-Controlled AC and DC Microgrids: A General Approach Toward Standardization". En: *IEEE Transactions on Industrial Electronics* 58.1 (2011), págs. 158-172.

¹² Z. SHUAI y col. "Hierarchical structure and bus voltage control of DC microgrid". En: *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 82.3 (2018), págs. 3670-3682.

¹³ M. D. ILIC y S. X. LIU. *Hierarchical Power Systems Control: Its Value in a Changing Industry (Advances in Industrial Control)*. Springer, 1996.

Tabla 1. Niveles de control jerárquico

Nivel	Nombre	Descripción
0	Dispositivo	Comprende el conjunto de dispositivos de campo que sensan y proveen actuación en los sistemas de producción
1	Célula	Comprende políticas de control y administración para estados de comportamiento de una célula de manufactura
2	Área	Comprende políticas de control y administración para estados de comportamiento de un área del sistema de producción
3	Producción	Comprende políticas de control y administración para estados de comportamiento del sistema de producción
4	Planta	Comprende políticas de administración de una rama o división operacional, incluyendo elementos de la sección financiera de la empresa
5	Empresarial	Comprende políticas de administración de una entidad comercial. Tiene responsabilidad operacional y de desarrollo a nivel de plantas y líneas de producción

Fuente: 13.

de potencia; 2) *secundario*: se enfoca en corregir las desviaciones de voltaje y de corriente; 3) *primario*: encargado de ajustar la referencia de voltaje para los lazos interiores de corriente y voltaje ¹¹¹².

El control jerárquico de microrredes es por tanto una temática que ha despertado interés reciente en la comunidad científica colombiana. Por tanto se destacan trabajos como ¹⁴ donde se simula y analiza una topología para *microrred*, posteriormente instalada en la Universidad Distrital Francisco José de Caldas de Bogotá D.C. ¹⁵; en

¹⁴ Maritza Andrea GONZÁLEZ RAMÍREZ y Diego Alexander ORTIZ QUEVEDO. *Simulación de la Microrred de la Facultad de Ingeniería de la Universidad Distrital FJDC*. Trabajo de grado (Ingeniero Eléctrico). Bogotá - Colombia: Universidad Distrital Francisco José De Caldas, 2016.

¹⁵ Alexis Iván CHAPARRO VARGAS y Juan David LISCANO SEGURA. *Diseño e implementación de una Microrred en la Universidad Distrital Francisco José de Caldas Sede de Ingeniería*. Trabajo de grado (Ingeniero Eléctrico). Bogotá - Colombia: Universidad Distrital Francisco José de Caldas, 2017.

¹⁶ se aborda la distribución óptima de energía en una *microrred* y en ¹⁷ el estudio para una *microrred* aislada.

Asimismo, en la Universidad Industrial de Santander, y más específicamente en la Escuela de Ingenierías Eléctrica, Electrónica y de Telecomunicaciones (E3T), se han realizado trabajos afines a la temática como: ¹⁸ donde se diseña una *microrred* para el Parque Tecnológico UIS-Guatiguará; ¹⁹ explorando tecnologías para redes inteligentes; ²⁰ abordando topologías para *microrredes* en zonas no interconectadas; ²¹ analizando el biogás como fuente alternativa de energía en *microrredes* y ²²

¹⁶ Wilson Daniel GIRALDO GÓMEZ. “Metodología para la gestión óptima de energía en una micro red eléctrica interconectada”. Tesis de Maestría (Magister en Ingeniería Eléctrica). Colombia: Universidad Nacional de Colombia, 2016.

¹⁷ Jairo Andrés MORALES RODRÍGUEZ. *Operación y control de microrredes operando en modo aislado*. Trabajo de grado (Ingeniero Eléctrico). Pereira - Colombia: Universidad Tecnológica de Pereira. Programa de Ingeniería Eléctrica, 2016.

¹⁸ Juan Manuel REY LÓPEZ y Pedro Pablo VERGARA BARRIOS. *Diseño de una microred de baja tensión para el laboratorio de integración energética del parque tecnológico de Guatiguará*. Trabajo de grado (Ingeniero Electricista e Ingeniero Electrónico). Bucaramanga - Colombia: Universidad Industrial de Santander, 2012.

¹⁹ Diego Fernando ZAPATA GARCÍA. *Definición de componentes tecnológicos de una micro-red inteligente*. Trabajo de grado (Ingeniero Electricista). Bucaramanga - Colombia: Universidad Industrial de Santander, 2014.

²⁰ Cesar Ricardo DURAN SANTOS y Jose Fernando FORERO QUINTERO. *Propuesta metodológica para la selección de la topología más adecuada para la implementación de una microrred en centros poblados con viviendas en zonas no interconectadas (ZNI)*. Trabajo de grado (Ingeniero Electricista). Bucaramanga - Colombia: Universidad Industrial de Santander, 2014.

²¹ Yohana Carolina GALVIS SILVA y Leonardo GOMEZ ARIZA. *Estudio de viabilidad para el aprovechamiento biogás que se produce en el relleno sanitario “El Carrasco” y su adaptabilidad en un entorno de una microred eléctrica*. Trabajo de grado (Ingeniero Electricista). Bucaramanga - Colombia: Universidad Industrial de Santander, 2014.

²² Yury Karina BETANCUR CASTRO y Yuly Alejandra PERÉZ RUIZ. *Identificación e implementación de modelos de baterías para una micro red en el entorno gráfico de simulación Simulink de Matlab*. Trabajo de grado (Ingeniera Electricista). Bucaramanga - Colombia: Universidad Indus-

en modelado del efecto de baterías en sistemas de generación distribuida.

A pesar de ello, no se documenta un trabajo notable al interior de la E3T en control óptimo aplicado a *microrredes* y, más particularmente, a partir de un enfoque jerárquico como mecanismo de gestión apropiada de recursos es un esquema aislado para una *microrred* DC. Por tanto el presente trabajo de grado busca realizar aportes en dicha temática, permitiendo abordar y resolver inquietudes como las siguientes: ¿Qué es el control jerárquico en *microrredes*? ¿Cómo proponer e implementar esquema de control óptimo jerárquico en una *microrred* DC aislada? ¿Qué ventajas presenta una estructura de control jerárquico en la operación de *microrredes* y redes inteligentes, en comparación con otras alternativas tradicionales de control? ¿Qué ventajas presenta para una *microrred* un control óptimo jerárquico en comparación con otras alternativas tradicionales de optimización de recursos energéticos (despacho)?

1. OBJETIVOS

Objetivo general

- Diseñar y simular un algoritmo de control óptimo para una *microrred* empleando un enfoque de control jerárquico.

Objetivos específicos

- Establecer la topología para una *microrred* DC aislada con al menos dos tipos de fuente, como caso de estudio para el problema de gestión de recursos energéticos empleando control jerárquico;
- Aplicar una técnica de control óptimo a partir de una estructura jerárquica sobre la *microrred* en un entorno de simulación;
- Analizar mediante comparación por simulación, la operación del sistema optimizado con respecto al mismo sistema ante condiciones no óptimas, como estrategia de validación para el método propuesto.

2. CONTROL DE RECURSOS DISTRIBUIDOS

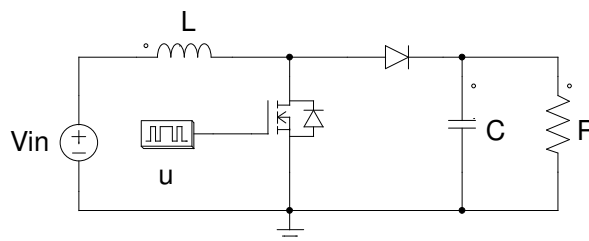
Los recursos energéticos distribuidos (*DER*, de su sigla en inglés), constituyen un reto conceptual y tecnológico interesante en términos de nuevos métodos que permitan manipular o *controlar* los flujos de potencia entre fuentes y cargas. El presente Capítulo aborda ideas básicas sobre diversas estrategias de control, que en conjunto permitirán constituir una propuesta para la arquitectura de una microrred operada bajo un esquema de niveles jerárquicos.

2.1. CONVERTIDORES ELECTRÓNICOS DE POTENCIA

Un circuito troceador o convertidor electrónico de potencia DC/DC, es un dispositivo encargado de ajustar la transferencia de energía desde una fuente en su entrada hacia una carga en su salida, a través del patrón de conmutación de un dispositivo electrónico.

La Fig. 3 ilustra el esquema circuital para un convertidor de potencia DC-DC elevador, el cual entrega niveles de tensión DC en su salida mayores que los disponibles en la fuente de suministro conectada en su entrada. Esta clase de convertidores son útiles en diversas aplicaciones debido a que permiten acondicionar (amplificar) niveles de tensión en su camino hacia las cargas.

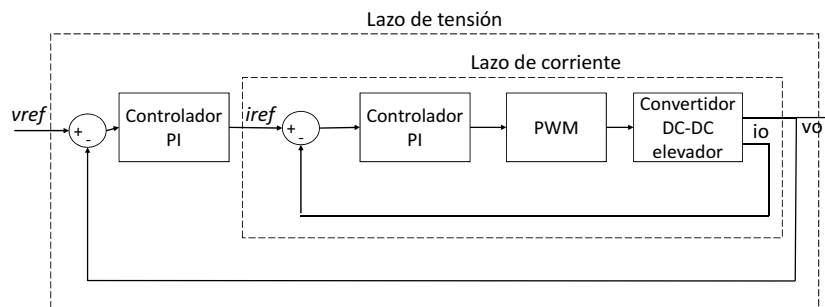
Figura 3. Convertidor DC-DC elevador



2.1.1. Control del convertidor elevador Tomando como referencia a Utkin ²³, es posible descomponer el control de un sistema con múltiples dinámicas (múltiples estados), en múltiples lazos acoplados según sus características frecuenciales. Por ejemplo, en sistemas electromecánicos las dinámicas mecánicas son más lentas que las eléctricas, y por tanto, pueden realizarse lazos internos de variables eléctricas y lazos externos de variables mecánicas para controlar sus estados.

Una filosofía similar puede aplicarse a circuitos convertidores de potencia, como el mostrado en la Fig. 3, donde al poseer dos variables de estado (i.e. dos elementos almacenadores de energía), un control total de la dinámica del sistema puede constituirse a través de un esquema de doble lazo, como el mostrado en la Fig. 4 donde la dinámica interna corresponde con la corriente del inductor, mientras el lazo externo se configura para el control del voltaje en su capacitor.

Figura 4. Control de doble lazo para el convertidor DC-DC



2.2. CONTROL DROOP

Considerando circuitos convertidores de potencia controlados según lo descrito en la *Sección* anterior, es posible pensar en la agrupación de diferentes etapas de con-

²³ V. UTKIN, J. GULDNER y J. SHI. *Sliding Mode Control in Electromechanical Systems*. Taylor & Francis, 1999.

vertidores (generadores) a manera de red.

Las redes eléctricas se constituyen de elementos tales como generadores, cargas y líneas de transmisión. Dependiendo de la naturaleza de los anteriores se pueden constituir redes de alta, media y baja tensión. Para el caso de sistemas con recursos energéticos distribuidos, aparece el concepto de *microrred* ²⁴. Una *microrred eléctrica* se define como el conjunto de cargas, microgeneradores y dispositivos de almacenamiento que operan como un sistema único e independiente. En palabras simples, las *microrredes* son pequeñas redes eléctricas autónomas, alimentadas por fuentes de energía distribuida junto con almacenadores de energía y cargas flexibles, con magnitudes de potencia inferiores a 100 kW ²⁴. Una *microrred* puede operar conectada a la red de distribución o de forma aislada (en isla). En el caso conectado a la red, la *microrred* se convierte en un sistema de respaldo que inyecta potencia a las cargas y energía remanente a la red, siendo robusta debido a la gran inercia del sistema principal. Para el caso aislado, la *microrred* se convierte en responsable directo del suministro energético hacia las cargas, requiriendo una administración apropiada de recursos que incremente sus niveles de autonomía ²⁴.

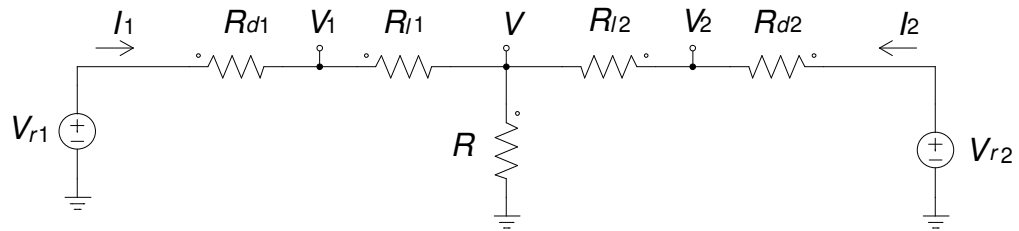
El control *droop* ²⁵ es el método de control más utilizado para distribuir de manera adecuada las corrientes de carga en aplicaciones de *microrredes*. Existe control *droop AC* y control *droop DC*.

²⁴ DIANA CATALINA MUÑOZ GALVIS Karen Julieth y HERNÁNDEZ MALAVER. *Control droop de una microrred simple*. Trabajo de grado (Ingeniero Electrónico). Bucaramanga - Colombia: Universidad Industrial de Santander, 2019.

²⁵ S. Y. YU y col. "SoC-based output voltage control for BESS with a lithium-ion battery in a stand-alone DC microgrid". En: *Energies* 9.11 (2016), págs. 924-939.

Para introducir las ideas que fundamentan el método de control *droop* DC convencional, considere el esquema simplificado para una microrred DC simple mostrado en la Fig. 5, constituida por dos generadores (representados mediante su equivalente de *Thevenin*) conectados a través de resistencias de línea a un nodo común (barra o bus DC), donde a su vez se conecta una carga resistiva.

Figura 5. Modelo simplificado de una *microrred* DC de dos nodos



La ecuación eléctrica que define dicho equivalente circuital es la siguiente:

$$V = V_{r_i} - I_i R_{d_i} - I_i R_{l_i}, \quad (1)$$

siendo V_{r_i} la tensión DC a la salida del i -ésimo generador $\forall i = \{1, 2\}$, I_i su corriente, R_{d_i} su resistencia *droop* y R_{l_i} su resistencia de línea.

De esta manera, tomando en cuenta que R_{l_i} puede considerarse despreciable (en una microrred la distancia entre generadores y cargas es corta), es posible escribir:

$$V = V_{r_1} - I_1 R_{d_1} = V_{r_2} - I_2 R_{d_2} \implies \frac{I_1}{I_2} = \frac{R_{d_2}}{R_{d_1}}, \quad (2)$$

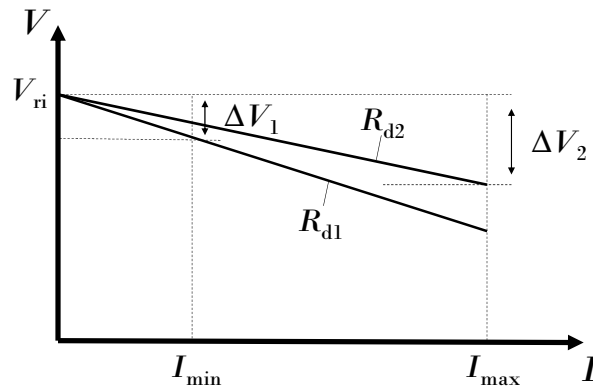
bajo la suposición $V_{r_1} \rightarrow V_{r_2}$.

A partir de ello, *dimensionar* un control *droop* es asignar R_{d_i} en modo tal que sea posible satisfacer una relación de proporciones de potencia entre cada rama de ge-

neración, ante un voltaje controlado en la carga ²⁵.

Es importante sin embargo verificar que ante una variación ΔI_i en el valor de corriente para el i -ésimo generador, se producirá una correspondiente variación de voltaje $\Delta V_i = \Delta I_i \times R_{di}$ que afectará el comportamiento de la carga.

Figura 6. Curva de Droop en una microrred DC con diferentes valores de Rd



Dicha situación se ilustra gráficamente en la Fig. 6 para el caso comparativo de un generador ante valores diferentes de R_{di} . Tal y como se observa, la resistencia *droop* define la sensibilidad del sistema para cambiar su condición de operación a través de la pendiente de la curva. En otras palabras, ante una variación dada de corriente al interior del intervalo $I \in [I_{min}, I_{max}]$ se obtendrá una variación de voltaje en el intervalo ΔV , cuyos límites dependen de R_{di} . Por tanto, deberá evitarse a toda costa realizar excursiones de voltaje que superen los niveles de variación permitidos en el sistema, por restricciones de calidad en la energía suministrada a la carga.

Con base en lo anterior, la resistencia *droop* debe satisfacer:

$$R_{di} \leq \frac{\Delta V}{I_{\sigma}}, \quad (3)$$

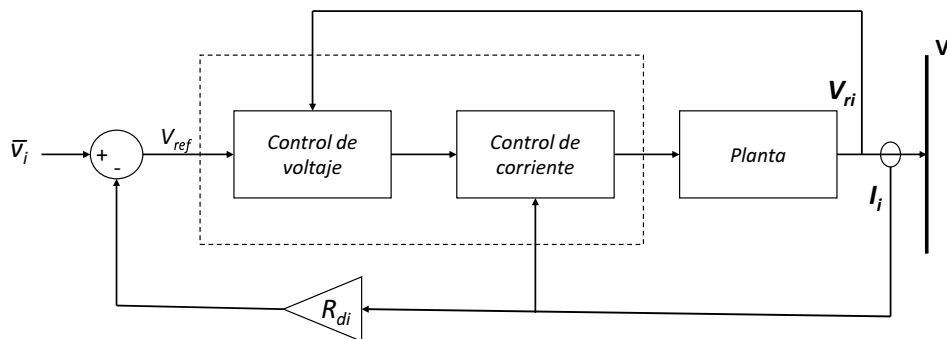
siendo ΔV la máxima desviación permitida de voltaje e I_σ la corriente del i -ésimo generador a máxima carga. A su vez, la máxima carga ocurre para el valor mínimo de R y por tanto I_σ producirá un voltaje en la carga V_σ que puede considerarse el mínimo valor de V . Así entonces, la máxima potencia entregada por la fuente será $P_\sigma = I_\sigma \times V_\sigma$ y de esta manera la expresión (3) puede modificarse para escribir:

$$R_{di} \leq \frac{\Delta V \times V_\sigma}{P_\sigma}. \quad (4)$$

2.2.1. Resistencia virtual En favor de obtener un voltaje de bus V con valor regulado, los voltajes V_{ri} de salida de los generadores se deben ajustar a las variaciones de carga y fluctuaciones de potencias de entrada en la red, a través de la caída ocasionada por su correspondiente R_{di} .

Desde un punto de vista energético, la caída de tensión en R_{di} representa un desperdicio y por tanto es una situación inconcebible que justifica en la práctica la utilización de una resistencia *droop* virtual, más que de una física ²⁶.

Figura 7. Lazo de control *droop* para regulación de voltaje en una microrred DC



²⁶ A. RIZQIAWAN y col. "Damping improvement by using virtual resistance controller for DC-DC boost converter dahono-1". En: *2017 International Conference on High Voltage Engineering and Power Systems (ICHVEPS)*. 2017, págs. 400-403.

Para explicar lo anterior, considere el sistema realimentado de la Fig. 7 representando un lazo de control *droop* para un circuito convertidor de potencia DC/DC. En dicho esquema, la salida de voltaje del circuito se conecta directamente (o mejor, a través de una resistencia de línea despreciable) al bus DC y no a través de la resistencia *droop* R_{di} . A partir de ello:

$$V_{ref} = \bar{V}_i - I_i R_{di}, \quad (5)$$

siendo V_{ref} el valor deseado para V , mientras que \bar{V}_i es el valor deseado para V_{ri} .

Algunas consideraciones pueden realizarse respecto a esta última expresión:

- R_{di} no se encuentra físicamente en el circuito (es una impedancia virtual). Por el contrario es un valor que multiplica o amplifica a I_i en la operación ²⁶;
- La referencia para el lazo de voltaje que regula la salida de tensión en el convertidor de potencia no es el valor deseado \bar{V}_i para el voltaje V_{ri} del convertidor de potencia, sino el valor deseado V_{ref} para el voltaje del bus V ;
- La diferencia entre el valor deseado \bar{V}_i para el voltaje del convertidor de potencia y el valor deseado V_{ref} para el voltaje del bus, es conceptual, en cuanto corresponde con un término de corrección que depende de R_{di} y de la corriente I_i sensada. En otras palabras, al no existir físicamente una resistencia *droop* los lazos se ajustan para seguir un voltaje desviado en una proporción que depende de las variaciones de corriente a la salida del circuito convertidor y cuya sensibilidad viene determinada por el valor de R_{di} .

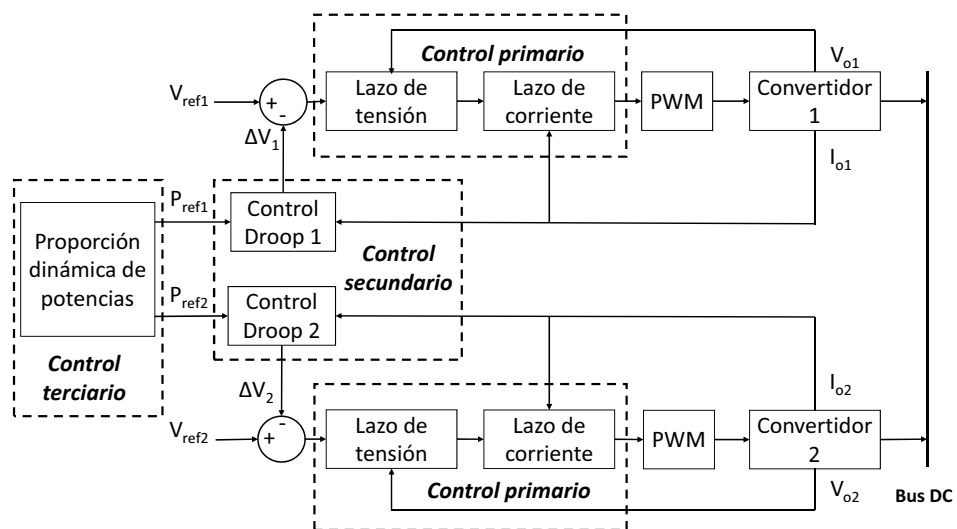
2.3. CONTROL JERÁRQUICO

En complemento a la introducción sobre el *control jerárquico* realizada en la *Sección* correspondiente, se asume como caso de estudio la estructura mostrada en la Fig.8,

constituida por 2 generadores bajo la influencia del control *droop* y una estrategia de asignación dinámica de proporciones de demanda.

Este esquema de control distribuido está inspirado en los enunciados propuestos por Guerrero *et al.* en ¹¹ y requiere para su correcta operación, no sólo un desempeño eficiente de los esquemas de control a nivel local (en campo), sino también de una interacción apropiada de dichos elementos locales en términos de una interconexión global, principalmente a nivel de acción en los niveles superiores de la jerarquía.

Figura 8. Esquema de control jerárquico



2.4. CONTROL ÓPTIMO

Optimizar es, esencialmente, maximizar o minimizar un funcional de costo o un criterio de desempeño. Para poder satisfacer dicha premisa, se debe realizar una configuración precisa que satisfaga requerimientos para los cuales no necesariamente existe una solución. Un problema de optimización implica satisfacer restricciones desde el punto de vista matemático para encontrar mínimos (o máximos) locales y

globales que permitan garantizar las condiciones del problema. En un contexto de control, la ley de control que fuerza el sistema a satisfacer dichas restricciones de optimalidad se denomina el *control óptimo* ⁸.

A nivel de sistemas de generación eléctrica, la operación óptima se define en términos de un *despacho económico* el cual hace referencia a un arreglo de generación de potencia que busca satisfacer una demanda dada al menor costo de operación posible. Para ello se define una función de costos:

$$C(P_G) = \sum_{i=1}^n C_i(P_{Gi}), \quad (6)$$

donde: n es el número de generadores, C_i el costo de generación individual y P_{Gi} la potencia generada individual.

A su vez, la potencia total generada P_G puede expresarse en términos de la potencia total de demanda P_D y las pérdidas de potencia P_P , mediante:

$$\begin{aligned} P_G &= \sum_{i=1}^n P_{Gi} \\ &= P_D + P_P, \end{aligned} \quad (7)$$

constituyendo una *restricción* práctica para el sistema.

El objetivo de un despacho económico será entonces *optimizar* (6) aplicando métodos analíticos o computacionales para determinar los valores máximos o mínimos de la función. De esta manera, es posible formular el problema de optimización ge-

neral en el modo siguiente:

$$\begin{aligned} &\text{minimice} && C(P_G) \equiv \sum_{i=1}^n C_i(P_{Gi}) && (8) \\ &\text{sometido a la restricción (7),} \end{aligned}$$

correspondiendo con un problema de *optimización con restricciones* de igualdad.

En el trabajo de grado desarrollado por Hernández ²⁷, se proponen funciones de costo para generadores basados en energía renovable y se analiza su *despacho económico* en el contexto de las *microrredes aisladas*.

²⁷ Diana Marcela HERNÁNDEZ VARGAS. *Despacho económico y su aplicación en microrredes eléctricas*. Trabajo de grado (Ingeniero Electricista). Bucaramanga - Colombia: Universidad Industrial de Santander, 2019.

3. CONTROL JERÁRQUICO DE MICRORREDES

Posterior al marco conceptual y a las definiciones previamente realizadas, el presente *Capítulo* aborda la configuración para una estructura de control jerárquico en una microrred compuesta por 2 generadores correspondientes con representaciones para recursos energéticos de tipo fotovoltaico y banco de baterías. En esencia, el control jerárquico propuesto consta de un nivel cero constituido por un control en cascada de las variables eléctricas de un convertidor de potencia elevador, seguido por un primer nivel donde actúa un despacho de potencias a partir de un lazo de control *droop*. Finalmente, un nivel secundario optimiza las proporciones de potencias a manera de estrategia de despacho.

3.1. TOPOLOGÍA Y DIMENSIONAMIENTO DE LA MICRORRED

El caso de estudio a ser analizado, toma como base la topología de microrred aislada propuesta por Muñoz y Hernández en ²⁴, en la cual se asume una estación de carga para vehículos eléctricos en una zona remota del departamento de Santander, para alimentar una demanda de 1.5 kWh. Este valor de demanda corresponde con datos proporcionados por *ESSA* para la modalidad de carga lenta en la estación instalada en los alrededores de *HOME CENTER* en el centro de la ciudad de Bucaramanga.

A partir de ello, una batería de 30 kWh tardaría alrededor de 20 horas en completar una carga del 0 % al 100 %.

Ahora bien, considerando un bus DC de 120 V dicha demanda representa una co-

riente de suministro correspondiente con:

$$I = \frac{1.5 \text{ kW}}{120 \text{ V}} = 12.5 \text{ A}, \quad (9)$$

contantes durante el ciclo de carga, y por tanto, la impedancia equivalente para la batería puede aproximarse como:

$$R = \frac{1.5 \text{ kW}}{(12.5 \text{ A})^2} = 9.6 \Omega. \quad (10)$$

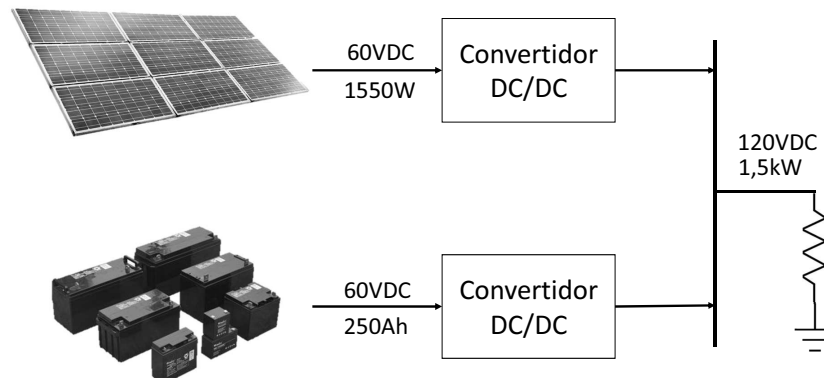
Teniendo en cuenta el alto potencial de recurso solar en Santander, se asume que un arreglo fotovoltaico de 5 paneles de 310 W / 12 VDC conectados en serie para generar 60 VDC, junto con un circuito convertidor de potencia DC/DC elevador (boost), permitirán suministrar la potencia requerida en la carga ante condiciones favorables de irradiancia solar.

Asimismo, se considera un banco de 5 baterías de 250 Ah / 12 VDC conectadas en serie para generar 60 VDC, junto con un circuito convertidor de potencia DC/DC elevador (boost), como sistema de respaldo conectado en paralelo para satisfacer la demanda total o parcialmente, en ausencia del recurso solar. La Fig. 9 incluye una ilustración para la microrred DC aislada descrita.

A partir de ello, se procederá a continuación con el diseño y la simulación de los elementos que constituyen a nivel circuital la topología de microrred propuesta.

3.1.1. Convertidor DC/DC elevador El diseño para el circuito convertidor de potencia elevador presentado en la Fig. 3, se realizó empleando la metodología suge-

Figura 9. Microrred dimensionada



rida por D. Hart en ²⁸. A partir de ello, considerando una frecuencia de base para el PWM (modulación de ancho de pulso para el disparo del transistor de potencia) de 20 kHz, una tensión de suministro E de 60 VDC, un factor de rizo de voltaje del 3 % y un factor de rizo de corriente del 2 %, se determinan como valores de capacitancia e inductancia a los siguientes:

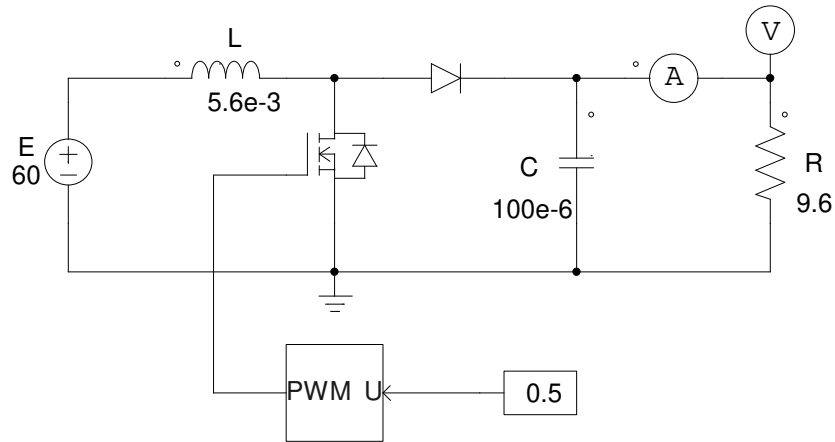
$$L = 5.6 \text{ mH}; C = 100 \mu\text{F}.$$

La Fig. 10 ilustra el diagrama esquemático para el convertidor de potencia simulado en la herramienta PSIM (<https://powersimtech.com>), permitiendo obtener en la carga el comportamiento temporal visualizado en la Fig. 11. Lo anterior constituye las características de operación nominal para el convertidor elevador en lazo abierto, como elemento fundamental de la microrred.

3.1.2. Escenario de perturbación Como escenario de perturbación se considera una combinación entre el cambio instantáneo para el valor nominal de la carga y una variación continua del valor nominal para la fuente de suministro E .

²⁸ D. W. HART. *Electrónica de Potencia*. PEARSON EDUCACIÓN S.A., 2001.

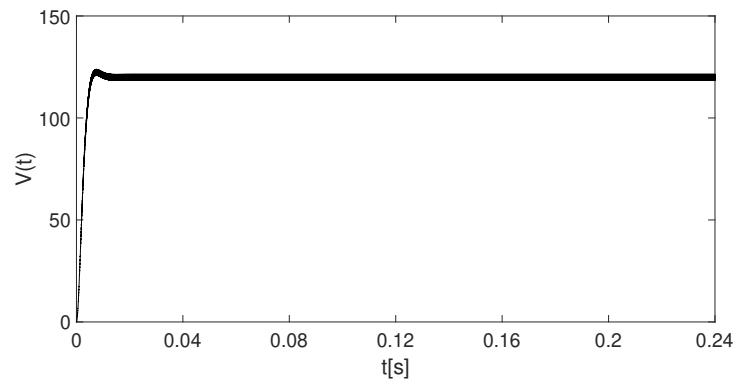
Figura 10. Circuito convertidor-elevador simulado en PSIM



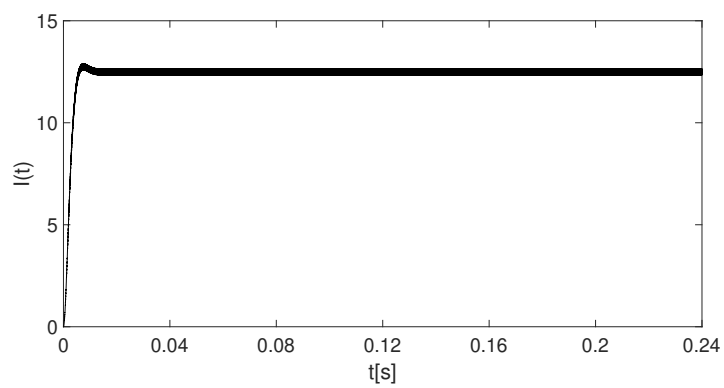
En particular, la simulación del sistema parte de condiciones nominales en $t = 0$ s. Posteriormente, en $t = 0.07$ s el valor de R pasa de 9.6Ω a 12Ω en modo escalón, siendo revertido a su valor original, también en modo instantáneo para $t = 0.11$ s. A partir de $t = 0.14$ s se asume una variación en E mediante el perfil senoidal ilustrado en la Fig. 12, que motiva una pérdida parcial del recurso solar (e.g. efecto de sombra) con una duración de $t = 0.1$ s.

De esta manera, la Fig. 13 muestra el efecto de las perturbaciones en las magnitudes eléctricas a la salida del circuito convertidor elevador, permitiendo observar en la Fig. 14(a) una autoregulación en los valores de voltaje ante cambios de carga que contrasta con una pérdida de tensión nominal como consecuencia de las variaciones consideradas en la tensión de suministro E . Asimismo, la Fig. 14(b) ilustra los cambios en el valor de la corriente de salida que compensan y justifican el comportamiento de voltaje. Finalmente, a partir de la Fig. 14(c) se verifica la necesidad de aplicar acciones correctivas que garanticen un suministro de potencia constante a pesar de las posibles variaciones nominales del entorno.

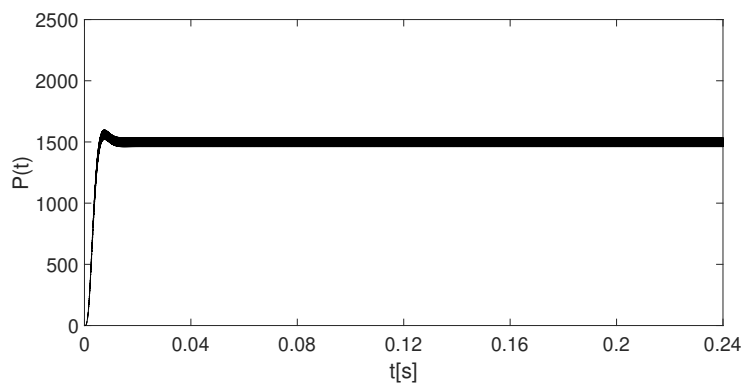
Figura 11. Magnitudes nominales a la salida del convertidor-elevador: (a) $V(t)$, (b) $I(t)$ y (c) $P(t)$



(a)

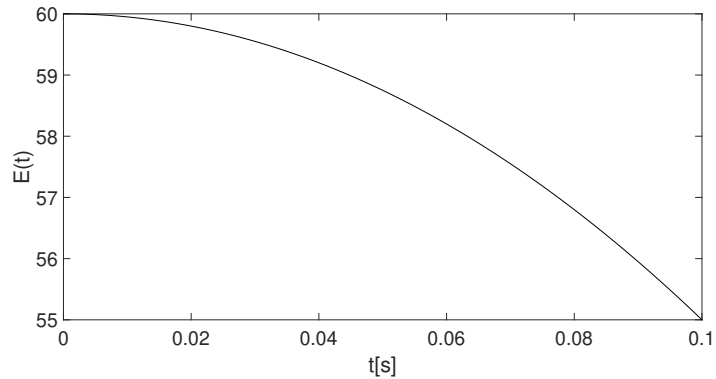


(b)



(c)

Figura 12. Perfil de generación fotovoltaico



3.2. CONTROL DE GENERADORES INDIVIDUALES

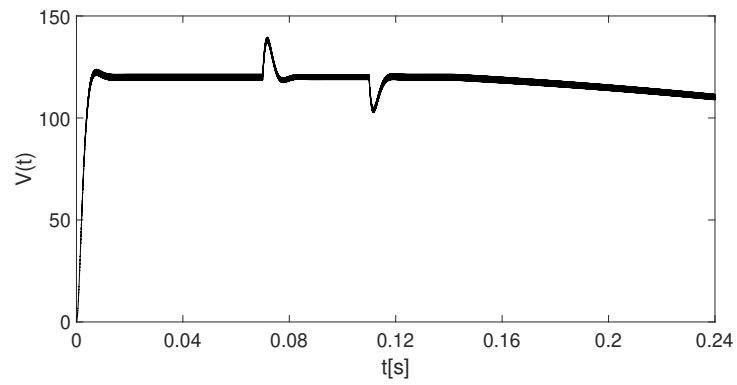
Los resultados presentados evidencian alteraciones indeseables en la operación del circuito convertidor de potencia elevador a causa de perturbaciones, que ameritan la incorporación de estrategias de control para regular los valores de variables hacia condiciones nominales.

Por tanto, retomando las ideas previamente ilustradas en la *Sección 2.1.1* se sugiere una estructura de doble lazo para mitigar tales efectos en el esquema de generación. El diseño e implementación para dicha estrategia de regulación se describe a continuación tomando como base los desarrollos presentados por Muñoz y Hernández en ²⁴.

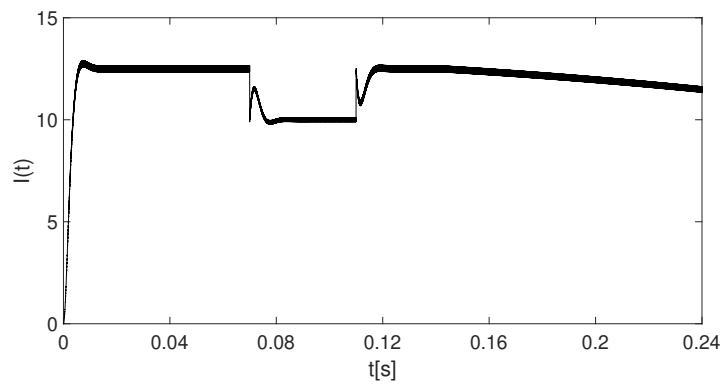
3.2.1. Diseño del lazo de corriente Las ecuaciones dinámicas del circuito convertidor de potencia elevador pueden enunciarse como sigue:

$$\begin{aligned} \frac{di_L}{dt} &= -\left(\frac{1-u}{L}\right)v_C + \frac{E}{L} \\ \frac{dv_C}{dt} &= \left(\frac{1-u}{C}\right)i_L - \frac{v_C}{RC}, \end{aligned} \quad (11)$$

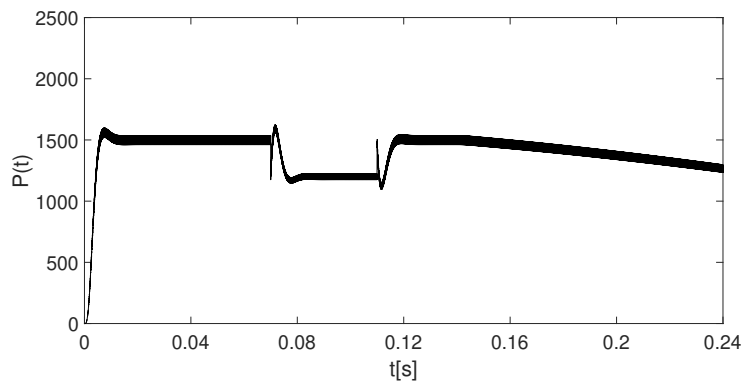
Figura 13. Magnitudes de salida en convertidor-elevador perturbado: (a) $V(t)$, (b) $I(t)$ y (c) $P(t)$



(a)



(b)



(c)

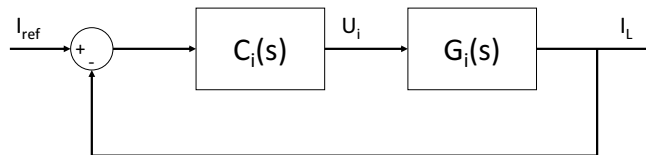
siendo i_L la corriente del inductor, v_C la tensión del capacitor y u el ciclo útil del PWM.

Una linealización alrededor de los valores de equilibrio del sistema, permite obtener la siguiente función de transferencia:

$$\begin{aligned} G_i(s) &= \frac{\Delta I_L(s)}{\Delta U(s)} \\ &= \frac{E(CRs + (1 + 2U))}{RLCs^2 + Ls + R(1 - U)^2} \\ &= \frac{10714.29(s + 2083.33)}{s^2 + 1041.67s + 446428.57}, \end{aligned}$$

en términos de desviaciones respecto a condiciones en régimen permanente para i_L y u , posterior al reemplazo de valores de parámetros circuitales (siendo $U = 0.5$ la condición nominal para el ciclo útil del PWM).

Figura 14. Lazo de control de corriente para el convertidor DC-DC



A partir de ello, se considera el lazo de control PI ilustrado en la Fig.14, siendo:

$$C_i(s) = \frac{k_{pi}s + k_{ii}}{s}, \quad (12)$$

la función de transferencia para el controlador.

Los valores de parámetro para k_{pi} y k_{ii} se determinan analíticamente igualando el polinomio característico (denominador de la función de transferencia) del sistema

controlado:

$$\frac{i_L}{i_{ref}} = \frac{C_i(s)G_i(s)}{1 + C_i(s)G_i(s)}, \quad (13)$$

calculado como:

$$s^3 + (1041 + 10714.29k_{pi})s^2 + (4.46 \times 10^5 + 10714.29k_{ii} + 2.23 \times 10^7k_{pi})s + 2.23 \times 10^7k_{ii},$$

con el polinomio característico deseado:

$$(s + \alpha)(s^2 + 2\zeta\omega_n s + \omega_n^2),$$

definido para ζ y ω_n en favor de satisfacer:

$$M_p = 3\%; \quad t_s = 20 \text{ ms},$$

y para un α que asegure el caracter dominante del par cuadrático y el criterio de estabilidad de *Routh-Hurwitz* ⁷.

De esta manera se crea un sistema de ecuaciones con los coeficientes de ambos polinomios ²⁹, que al resolverse permite obtener:

$$k_{pi} = 0.0076; \quad k_{ii} = 1.8111.$$

La Fig. 15 muestra resultados de simulación para la regulación del lazo de corriente, con un valor (nominal) de referencia calculado a partir de la condición de equilibrio

²⁹ Gustavo ROA CANO y Andruv Saim AYALA ORTÍZ. *Control en espacio de estados para un dron tipo cuadrorotor*. Trabajo de grado (Ingeniero Electrónico). Bucaramanga - Colombia: Universidad Industrial de Santander, 2016.

para i_L en (11) en el modo siguiente:

$$i_{ref} = \frac{V_{ref}}{R(1-U)} = \frac{120}{9.6(1-0.5)} = 25[A], \quad (14)$$

siendo $V_{ref} = 120 \text{ VDC}$ el valor de voltaje en régimen permanente deseado a la salida del circuito convertidor de potencia y por tanto, en el bus de carga para la microrred.

En particular, la Fig. 16(a) ilustra la manera en que la corriente sigue el valor de referencia a pesar de las perturbaciones consideradas y para un esfuerzo de control no saturado según el perfil para $u_i(t)$ de la Fig. 16(b). Más aún, la Fig. 16(c) muestra la incapacidad del lazo de corriente para mantener regulado el valor de tensión en el capacitor, ante variaciones de carga y suministro, justificando la inclusión de un lazo adicional de voltaje.

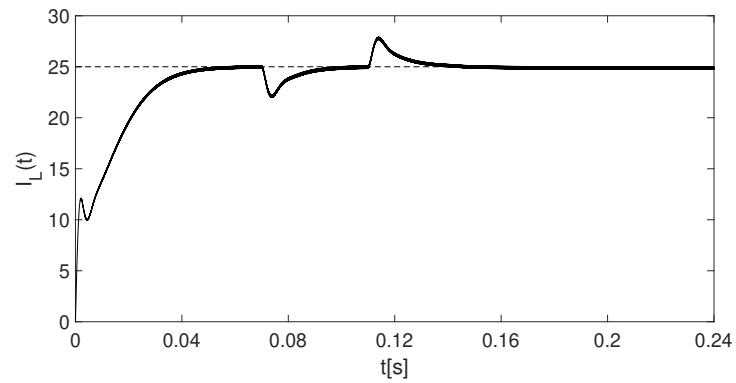
3.2.2. Diseño del lazo de voltaje Procediendo en un modo similar al expuesto para el lazo de corriente, se realiza la configuración para el esquema de control ilustrado en la Fig. 16, con el fin de regular la tensión de salida en la carga.

Para este caso, la función de transferencia $G_v(s)$ corresponde con la relación entrada-salida del lazo de corriente dada en (13) y puede ser calculada en el modo siguiente:

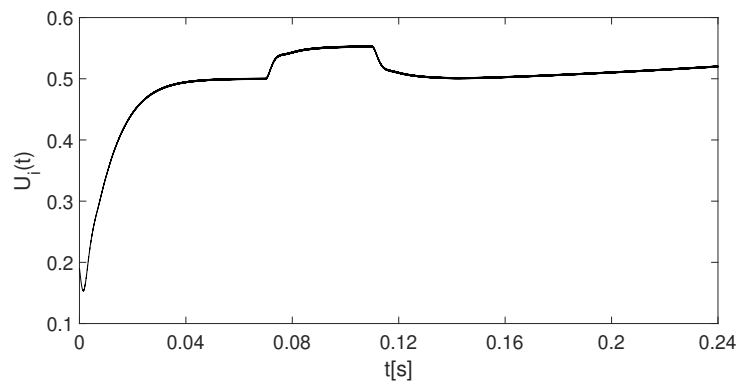
$$\begin{aligned} G_v(s) &= \frac{i_L}{i_{ref}} \\ &= \frac{81.43s^2 + (1.89 \times 10^5)s + (4.043 \times 10^7)}{s^3 + 1123s^2 + (6.355 \times 10^5)s + (4.043 \times 10^7)}. \end{aligned}$$

A su vez, a partir de (14) se justifica la relación asignada entre valores en régimen permanente para i_L y v_C .

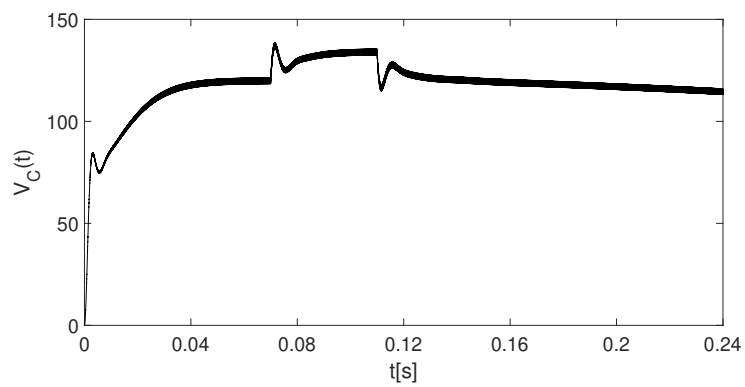
Figura 15. Respuesta temporal para lazo de corriente: (a) $I_L(t)$, (b) $U_i(t)$ y (c) $V_C(t)$



(a)

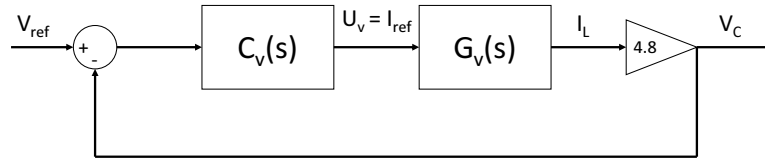


(b)



(c)

Figura 16. Lazo de control de voltaje para el convertidor DC-DC



De esta manera, se procede con el cálculo para las constantes del controlador:

$$C_v(s) = \frac{k_{pv}s + k_{iv}}{s}, \quad (15)$$

ante condiciones dinámicas deseadas dadas por: $M_p = 5\%$ y $t_s = 40\text{ ms}$, permitiendo determinar:

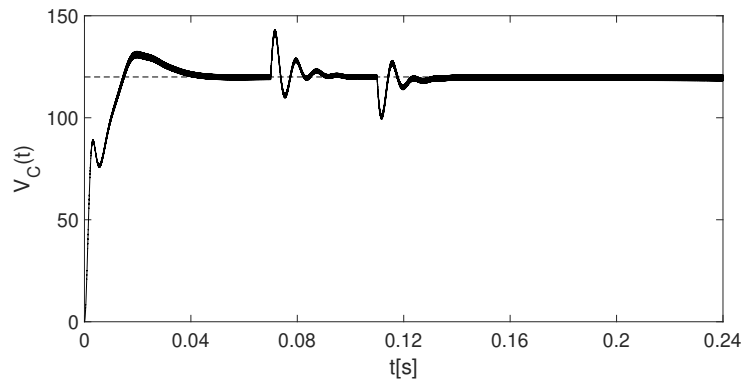
$$k_{pv} = 0.2725; \quad k_{iv} = 72.8039.$$

Los resultados de simulación para el control de voltaje ante el escenario de perturbación previamente descrito se presentan en la Fig. 17. Como se observa, el valor de la tensión a la salida del circuito convertidor-elevador se establece en la condición nominal deseada de 120 VDC (ver Fig. 18(a)), a pesar de las perturbaciones aplicadas en la carga y el suministro, con condiciones dinámicas apropiadas y evitando saturación en las señales de control para la configuración en doble lazo (ver Figs. 18(b) y 18(c)).

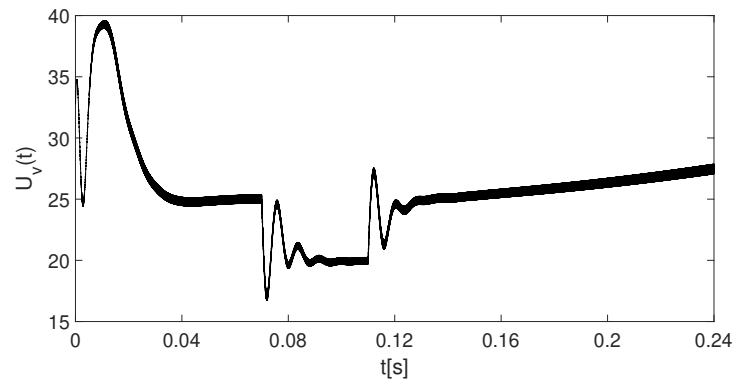
3.2.3. Acople de generadores en red Una vez se verifica la regulación del generador (conjunto fuente de suministro + convertidor elevador + doble lazo de control en cascada), es posible constituir circuitalmente la estructura de generación en paralelo para la microrred propuesta en la Fig. 18.

Para ello, es importante recalcar que a partir de la teoría general de los circuitos

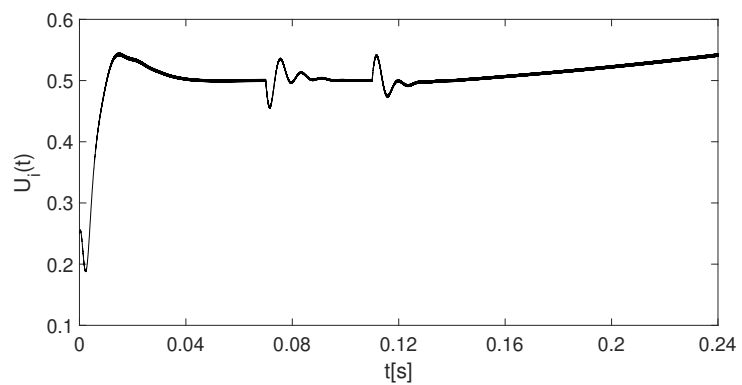
Figura 17. Respuesta temporal para lazo de voltaje: (a) $V_C(t)$, (b) $U_v(t)$ y (c) $U_i(t)$



(a)



(b)



(c)

eléctricos ³⁰, no es posible interconectar dos fuentes de voltaje en paralelo a menos que estas sean idealmente iguales. Debido a esto, se considera el acople correspondiente entre generadores al bus de salida, a través de resistencias de línea.

Así, asumiendo una distancia de 4 m entre el *generador 1* y la carga es posible calcular (para un cable de cobre calibre 14 y diámetro 1.63 mm) una impedancia de línea $R_{l1} = 0.032\Omega$ ²⁴³⁰. De manera similar, asumiendo una distancia de 2 m entre el *generador 2* y la carga, para las mismas condiciones de la línea de transmisión, se puede calcular una impedancia $R_{l2} = 0.016\Omega$.

La Fig. 19 presenta los resultados de simulación en PSIM para la respuesta temporal de las variables eléctricas en la resistencia de carga, considerando dos generadores regulados. A partir de ello, se observa en la Fig. 20(a) un voltaje de carga que mantiene regulado su valor en las condiciones nominales deseadas. Para el caso de la corriente en la carga, la Fig. 20(b) muestra la regulación al valor nominal:

$$I_o = \frac{P_o}{V_o} = \frac{1500 W}{120 VAC} = 12,5 A,$$

siempre que el valor de la carga también se mantenga en condiciones nominales (conviene aclarar en este punto que $i_L \neq i_o$). De hecho la Fig. 20(c) muestra el cambio correspondiente para la potencia percibida en la carga debido a esta situación (recordando que la potencia es el producto entre la tensión y la corriente).

Asimismo, se visualizan en la Fig.20 las contribuciones de corriente debidas a cada generador, mostrando una repartición equitativa de aproximadamente el 50 % cada

³⁰ M. O. SADIKU y C. K. ALEXANDER. *Fundamentos de circuitos eléctricos*. McGraw-Hill Interamericana, 2006.

Figura 18. Microrred a partir de generadores conectados en paralelo, uno de ellos con perturbación de suministro

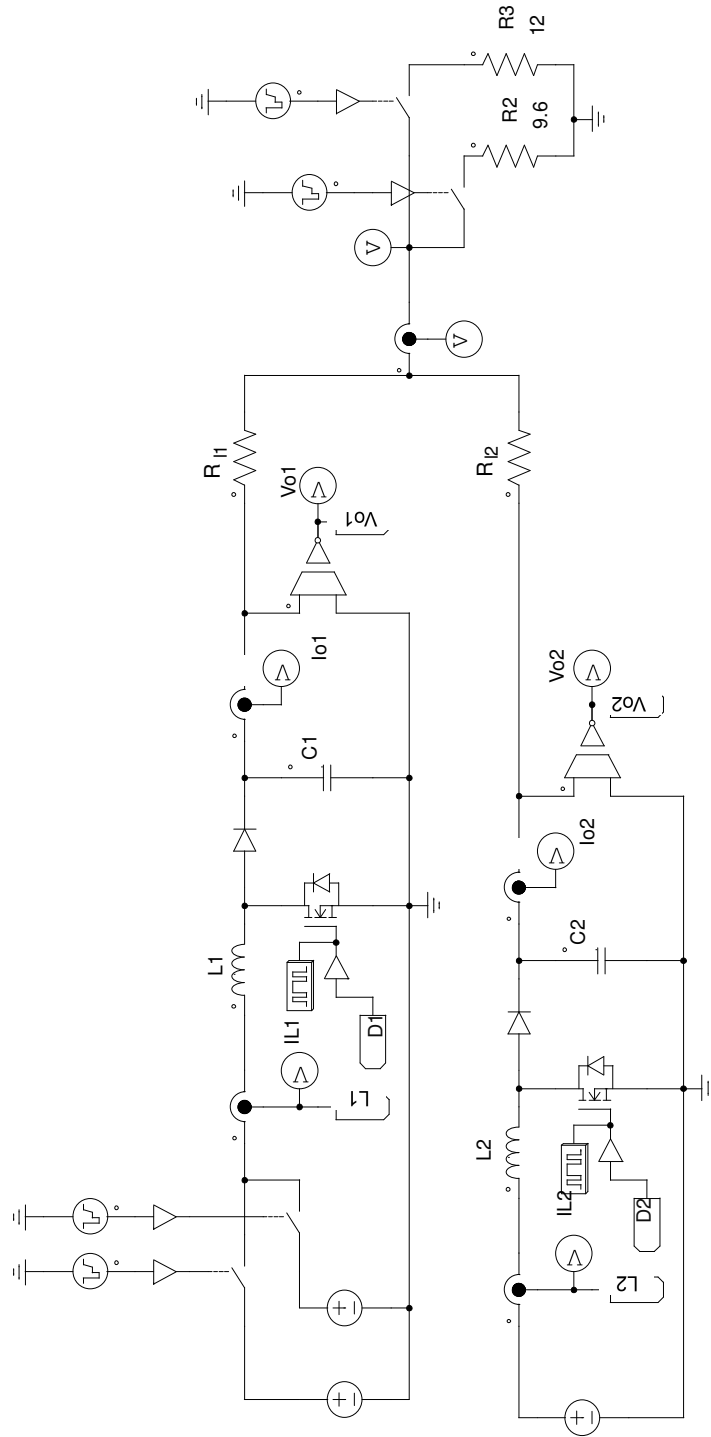
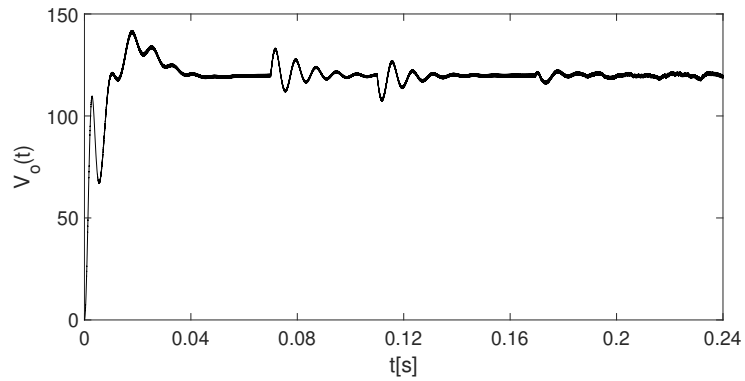
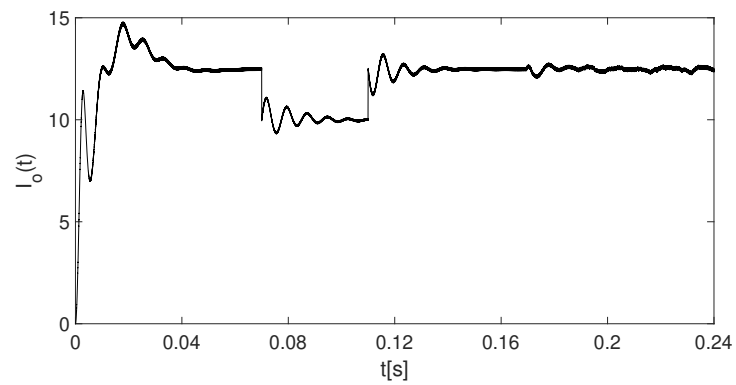


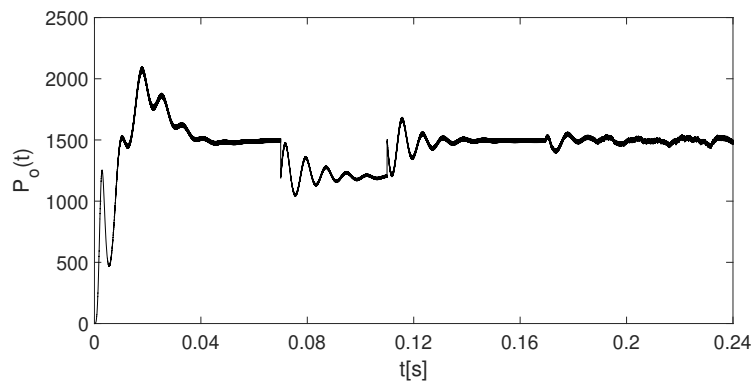
Figura 19. Magnitudes de salida en microrred sometida a perturbaciones: (a) $V_o(t)$, (b) $I_o(t)$ y (c) $P_o(t)$



(a)



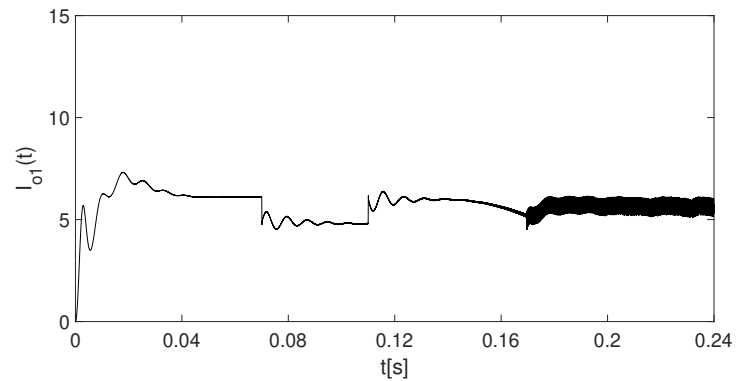
(b)



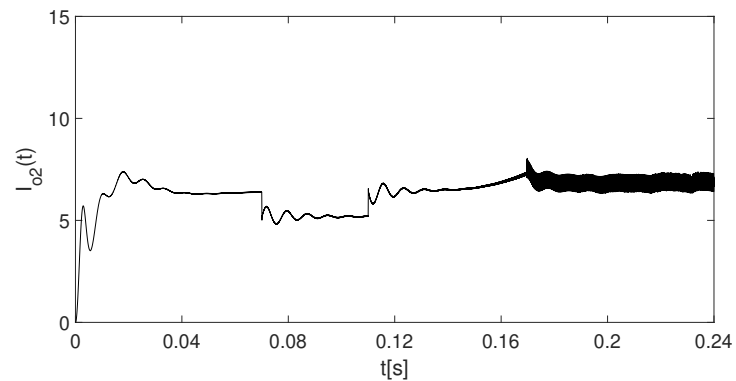
(c)

uno, con respecto a la demanda nominal. Esta proporción será modificada a partir del control *droop* abordado a continuación.

Figura 20. Corriente de salida en cada generador: (a) $I_{o1}(t)$ y (b) $I_{o2}(t)$



(a)



(b)

3.3. CONTROL POR REPARTO DE POTENCIAS

Para analizar el reparto de potencias considere inicialmente un generador, regulado y conectado a la carga como se muestra en la Fig. 7. A partir de ello, tomando como base la expresión (5) para el caso en que $\bar{V}_i = 122 V$ y $V_{ref} = 120 V$, es claro que la caída de tensión esperada en R_{di} será de $2 V$.

Lo anterior impone restricciones para la relación entre la resistencia *droop* y las posibles variaciones en la corriente de salida I_i . Por tanto, atendiendo a la ecuación (4) considere: $\Delta V = 2 V$, $V_\sigma = 118 V$ y $P_\sigma = 1500 W$, lo cual permite calcular:

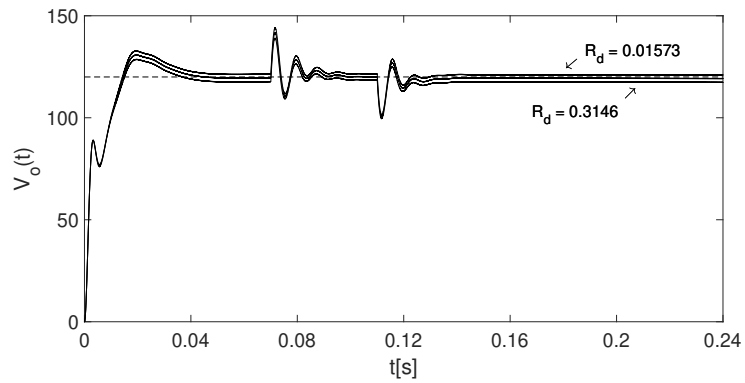
$$R_{di} \leq \frac{\Delta V \times V_\sigma}{P_\sigma} = \frac{2 \times 118}{1500} = 0.1573 \Omega. \quad (16)$$

Resultados de simulación para magnitudes eléctricas en la carga se presentan en la Fig. 21 ante tres valores diferentes de R_{di} (correspondientes con: R_{di} , $(0.1 \times R_{di})$ y $(2 \times R_{di})$). En todas las gráficas el trazo central representa el valor promedio de la variable simulada en PSIM para la condición nominal de R_{di} calculada en (16). Adicionalmente, se muestran excursiones alrededor de dicha condición nominal ante variaciones de la resistencia *droop* corroborando la idea conceptual plasmada previamente para el método en la Fig. 6. Específicamente, se observa cómo a través de variaciones en voltajes y corrientes de carga se experimentan variaciones en el valor de potencia a la salida dependiendo del valor asignado a R_{di} , ilustrando de manera práctica la susceptibilidad de la técnica ante la selección de dicho parámetro.

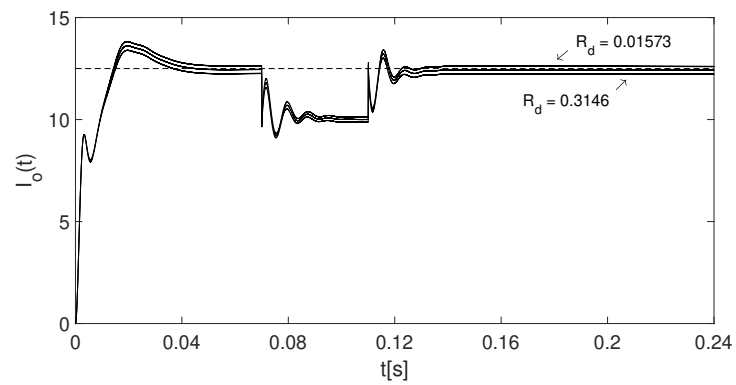
Más aún, es interesante notar el esfuerzo de control para mantener los niveles energéticos entregados a la carga ante las variaciones consideradas en la potencia de entrada (debidas a las variaciones en la tensión de suministro) visualizadas en la Fig. 22.

Estrictamente hablando, la configuración sugerida en la Fig. 7 no satisface la idea de un reparto de potencias y por tanto se debe complementar por la conexión de unidades generadoras en paralelo, que siguiendo el mismo esquema presentado permitan constituir la topología *droop* mostrada a continuación.

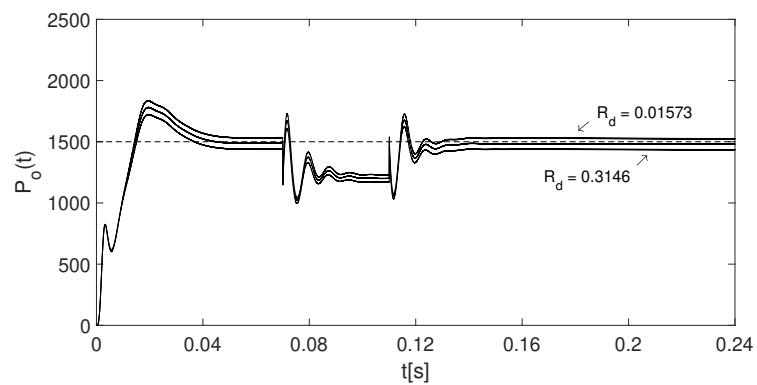
Figura 21. Sensibilidad de variables eléctricas a R_{di} : (a) $V(t)$, (b) $I(t)$ y (c) $P(t)$



(a)

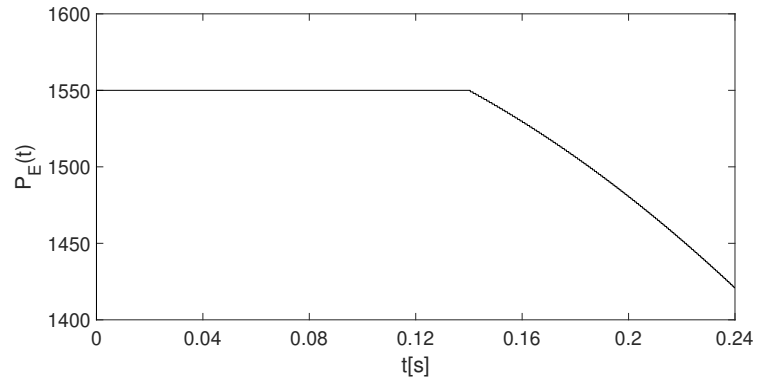


(b)



(c)

Figura 22. Variación en potencia de entrada



3.3.1. Esquema de control *droop* Tomando en cuenta que la potencia nominal de la carga es:

$$P = 1500 \text{ W},$$

considere una distribución de potencias por parte de dos unidades generadoras, de manera tal que:

$$P = P_1 + P_2,$$

siendo $P_1 = 900 \text{ W}$ y $P_2 = 600 \text{ W}$.

A partir de ello, asumiendo $\Delta V = 2 \text{ V}$, $V_\sigma = 118 \text{ V}$, las resistencias droop para cada generador pueden calcularse respectivamente como:

$$\begin{aligned} R_{d1} &= \frac{2 \times 118}{900} \\ &= 0.262 \Omega; \\ R_{d2} &= \frac{2 \times 118}{600} \\ &= 0.393 \Omega. \end{aligned}$$

Por tanto, los resultados de simulación presentados en la Fig. 23 permiten verificar

la proporción de potencias repartida entre ambos generadores, con efecto principalmente visualizado en los valores de corriente entregados al nodo de carga.

3.4. CONTROL SECUNDARIO

Hasta este punto el suministro de potencia en la carga ha sido verificado a partir de una distribución de energía en modo estático (i.e. fijo).

A continuación se emplearán los conceptos introducidos en la *Sección 2.4*, para realizar una gestión dinámica de recursos. Para ello, inicialmente se define la función de costos globales para la microrred mediante una adaptación de la expresión (6) en los términos siguientes:

$$C(P_G) = C_1(P_{G1}) + C_2(P_{G2}). \quad (17)$$

A su vez, la función de costo para el *generador 1* (sistema fotovoltaico) puede formularse a partir de los desarrollos reportados por D. Hernández en ²⁷, como sigue:

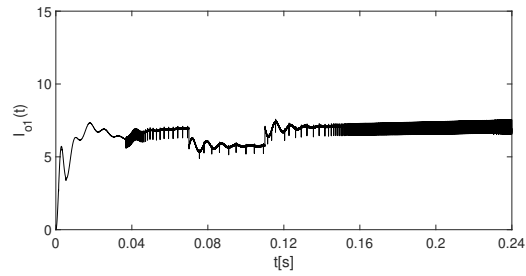
$$C_1(P_{G1}) = (a_1 \times I_1 \times P_{G1}) + (M_1 \times P_{G1}), \quad (18)$$

siendo:

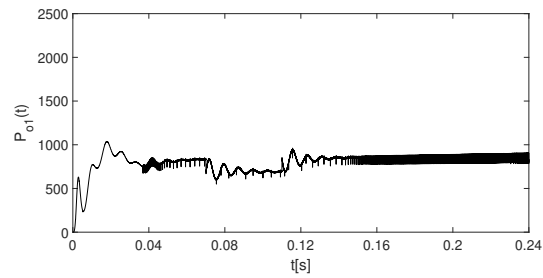
I_1 los costos de inversión por unidad de potencia instalada, estimados en 2000 USD kW/año según la agencia internacional de energía renovable (IRENA) para el año 2017. Realizando una conversión a COP (pesos colombianos) se tiene $I_1 = 781.85$ COP kW/hora;

M_1 los costos de operación y mantenimiento, estimados en 18 USD kW/año según IRENA para el año 2017. Realizando una conversión a COP se tiene $M_1 = 7.04$ COP kW/hora;

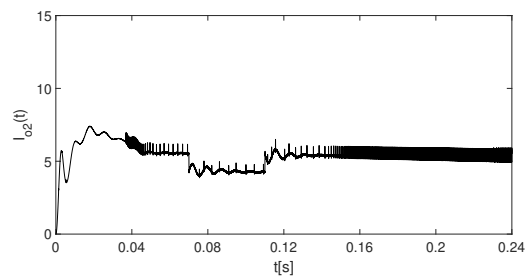
Figura 23. Corriente y potencia de salida bajo esquema *droop*: (a) $I_{o1}(t)$, (b) $P_{o1}(t)$, (c) $I_{o2}(t)$ y (d) $P_{o2}(t)$



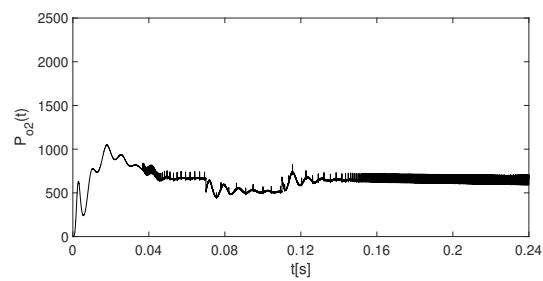
(a)



(b)



(c)



(d)

a_1 el coeficiente de anualización, definido por la siguiente expresión:

$$a_1 = \frac{r}{1 - [(1 + r)^{-N}]}, \quad (19)$$

para una tasa de interés r (que a partir de una tasa anual del 4.25 % representa un interés por hora $r = 4.85 \times 10^{-4}$) y un número de cuotas N (igual a 24 para un intervalo de análisis de un día), permitiendo obtener $a_1 = 0.04$ como el coeficiente de anualización por hora.

A partir de lo anterior, (18) puede reescribirse como:

$$\begin{aligned} C_1(P_{G1}) &= (0.04 \times 781.85 \times P_{G1}) + (7.04 \times P_{G1}) \\ &= (31.374 \times P_{G1}) + (7.04 \times P_{G1}) \\ &= 38.314 \times P_{G1}. \end{aligned} \quad (20)$$

Empleando un enfoque similar es posible definir una función de costo para el *generador 2* (banco de baterías) en el modo siguiente:

$$\begin{aligned} C_2(P_{G2}) &= (a_2 \times I_2 \times P_{G2}) + (M_2 \times P_{G2}) \\ &= (0.04 \times 390.92 \times P_{G2}) + (3.9 \times P_{G2}) \\ &= (15.63 \times P_{G2}) + (3.9 \times P_{G2}) \\ &= 19.5368 \times P_{G2}, \end{aligned} \quad (21)$$

con estimaciones IRENA dadas por $I_2 = 1000$ USD kW/año y $M_2 = 10$ USD kW/año.

De esta manera, la función de costo global para la microrred a ser computada co-

responde con:

$$C(P_G) = (38.314 \times P_{G1}) + (19.5368 \times P_{G2}), \quad (22)$$

verificando un mayor costo relativo asignado a la generación obtenida por el *sistema fotovoltaico* y por tanto, optimizar el reparto de potencias corresponde con una selección de proporciones de energía entre los *generadores 1 y 2* en favor de disminuir el valor de $C(P_G)$ a lo largo del tiempo de operación de la microrred.

3.4.1. Gestión dinámica de recursos de la microrred Minimizar el costo de operación de la microrred implica resolver un problema de optimización. Tomando en cuenta las restricciones propias de un simulador de circuitos como PSIM, para plantear y resolver un problema de optimización numérica, se realizó el siguiente procedimiento para programar la rutina de asignación dinámica de recursos en la microrred analizada:

1. En aras de asegurar la concavidad del problema de optimización (i.e. la existencia de un mínimo), el primer paso consiste en considerar más que una función simple de costo, su versión de costo cuadrático ponderado. Así entonces:

$$\begin{aligned} C_C(P_G) &= C_1^2(P_{G1}) + C_2^2(P_{G2}) \\ &= (38.314 \times P_{G1})^2 + (19.5368 \times P_{G2})^2 \\ &= (1467.96 \times P_{G1}^2) + (381.686 \times P_{G2}^2); \end{aligned} \quad (23)$$

2. Para resolver el problema de optimización formulado en (8), con $C(P_G) = C_C(P_G)$, se asume la solución propuesta por Saadat en el *Capítulo 7* de ¹⁰.

En estos términos, la función de costo cuadrática:

$$\begin{aligned}C_C(P_G) &= C_1^2(P_{G1}) + C_2^2(P_{G2}) \\ &= \gamma_1 P_{G1}^2 + \gamma_2 P_{G2}^2,\end{aligned}$$

sujeta a la restricción:

$$P_{G1} + P_{G2} = P_D = 1500 \text{ W}, \quad (24)$$

permite definir (empleando el enfoque de los multiplicadores de Lagrange ¹⁰), el siguiente funcional:

$$h(P_G, \lambda) = C_C(P_G) + \lambda(P_D - (P_{G1} + P_{G2})). \quad (25)$$

De (25) se observa que si (24) se cumple, entonces $h(P_G, \lambda) = C_C(P_G)$. De esta manera, para un valor apropiado de λ (no nulo) minimizar $h(P_G, \lambda)$ equivale a minimizar $C_C(P_G)$.

Ahora bien, el mínimo de (25) con respecto a P_{G1} se puede formular en el modo siguiente:

$$\frac{\partial h}{\partial P_{G1}} = 0 \Rightarrow \frac{\partial C_C}{\partial P_{G1}} = \lambda \Rightarrow 2\gamma_1 P_{G1} = \lambda,$$

y equivalentemente:

$$\frac{\partial h}{\partial P_{G2}} = 0 \Rightarrow \frac{\partial C_C}{\partial P_{G2}} = \lambda \Rightarrow 2\gamma_2 P_{G2} = \lambda.$$

A partir de lo anterior, (24) puede reescribirse como:

$$\lambda \left(\frac{1}{2\gamma_1} + \frac{1}{2\gamma_2} \right) = P_D,$$

es decir:

$$\lambda = \frac{P_D}{\left(\frac{1}{2\gamma_1} + \frac{1}{2\gamma_2} \right)} = \frac{1500}{\frac{1}{(2 \times 1467.96)} + \frac{1}{(2 \times 381.686)}} = 9.087 \times 10^5, \quad (26)$$

siendo el valor del parámetro que optimiza el problema de despacho de potencias en términos de P_{G1} y P_{G2} , con lo cual:

$$\begin{aligned} P_{G1} &= \frac{\lambda}{2\gamma_1} \\ &= \frac{9.087 \times 10^5}{2 \times 1467.96} \\ &= 309.535 \text{ W}; \\ P_{G2} &= \frac{\lambda}{2\gamma_2} \\ &= \frac{9.087 \times 10^5}{2 \times 381.686} \\ &= 1190.5 \text{ W}. \end{aligned}$$

Sin embargo, no siempre será posible obtener una solución analítica para el problema de optimización (debido a que en la mayoría de casos las ecuaciones que implican el cálculo de λ constituyen problemas no lineales) y por tanto, se puede aproximar el valor de λ a través de métodos numéricos.

En particular, asuma que $P_D = f(\lambda)$ siendo $f(\cdot)$ una función no lineal de λ . La expansión en serie de Taylor para f alrededor del valor conocido $\lambda = \lambda_0$,

permite obtener la siguiente aproximación de primer orden:

$$\begin{aligned}
 f(\lambda) &\approx f(\lambda_0) + \left. \frac{df}{d\lambda} \right|_{\lambda_0} (\lambda - \lambda_0) \\
 \Rightarrow (\lambda - \lambda_0) &= \frac{f(\lambda) - f(\lambda_0)}{\left. \frac{df}{d\lambda} \right|_{\lambda_0}} \\
 &= \frac{P_D - f(\lambda_0)}{\left. \frac{df}{d\lambda} \right|_{\lambda_0}}.
 \end{aligned} \tag{27}$$

Observe que $(\lambda - \lambda_0) = \Delta\lambda$ corresponde con una aproximación para el cambio de λ y, por tanto:

$$\begin{aligned}
 \lambda_1 &= \lambda_0 + \Delta\lambda \\
 &= \lambda_0 + \left(\frac{P_D - f(\lambda_0)}{\left. \frac{df}{d\lambda} \right|_{\lambda_0}} \right).
 \end{aligned} \tag{28}$$

Las expresiones (27) y (28), permiten configurar un cálculo iterativo denominado algoritmo de *Newton-Raphson* ¹⁰ implementado en MATLAB a partir del flujograma ilustrado en la Fig. 24.

Los resultados de simulación para el cálculo del λ óptimo se presentan en la Fig. 25, ante parámetros $\lambda_0 = 1 \times 10^7$, $P_{G1_{max}} = 1550 \text{ W}$ y $P_{G2_{max}} = 1500 \text{ W}$. A partir de ello, se observa la convergencia de valores para λ , P_{G1} y P_{G2} hacia las predicciones analíticas, trascurridas alrededor de 14 iteraciones del método numérico.

3. Finalmente, se implementa el algoritmo de *Newton-Raphson* en el esquema de simulación de la microrred utilizando el bloque `Simplified C Block` de PSIM, a partir de programación en *lenguaje C* para la rutina previamente ilustrada en el flujograma de la Fig. 24. La configuración para dicho bloque se muestra en

Figura 24. Diagrama de flujo algoritmo *Newton-Raphson* en MATLAB

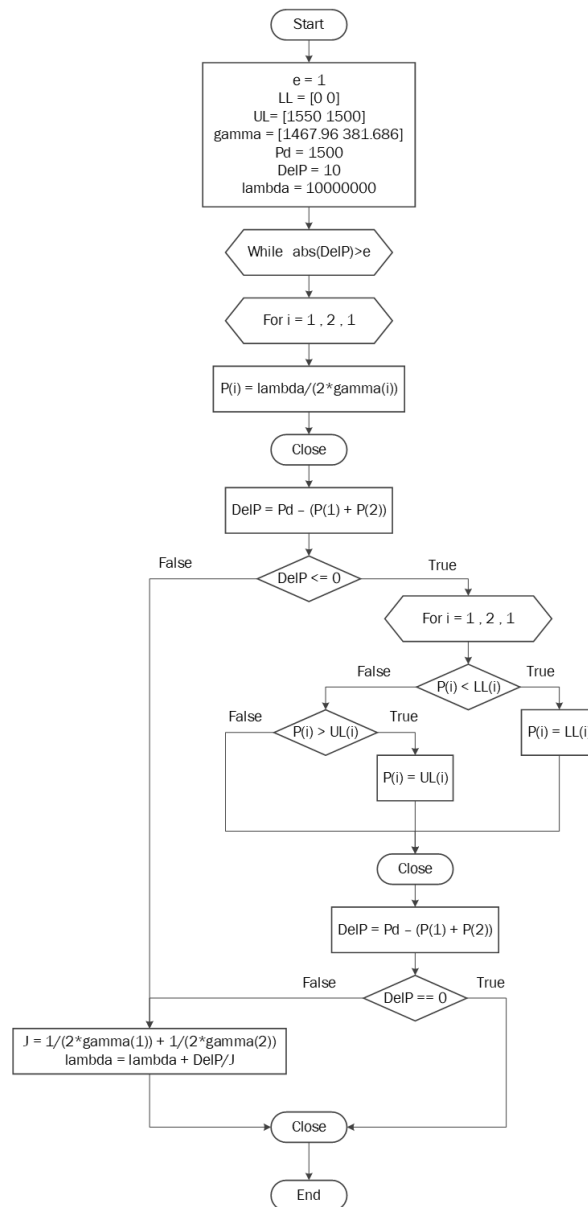
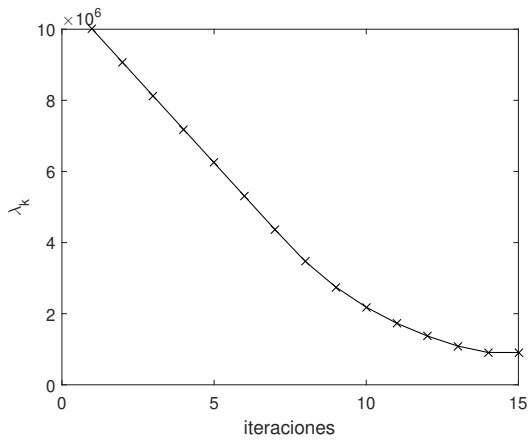
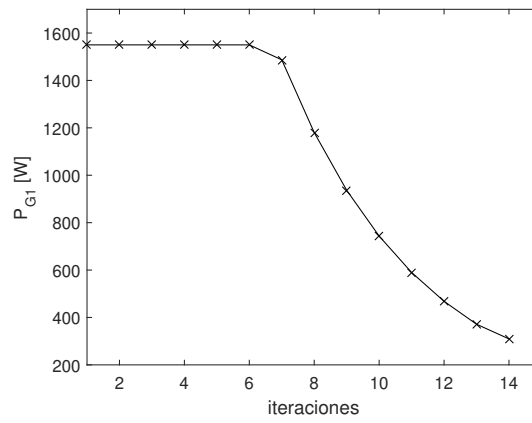


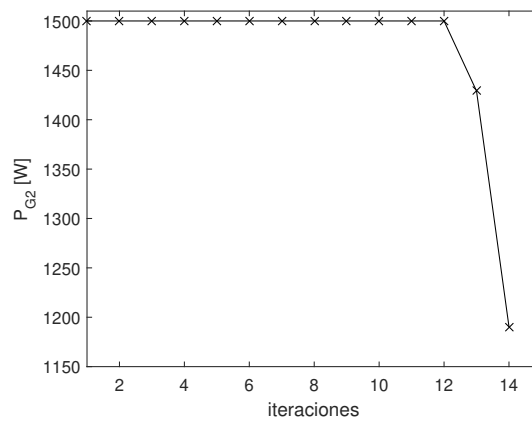
Figura 25. Cálculo numérico para valores óptimos: (a) λ , (b) P_{G1} y (c) P_{G2}



(a)



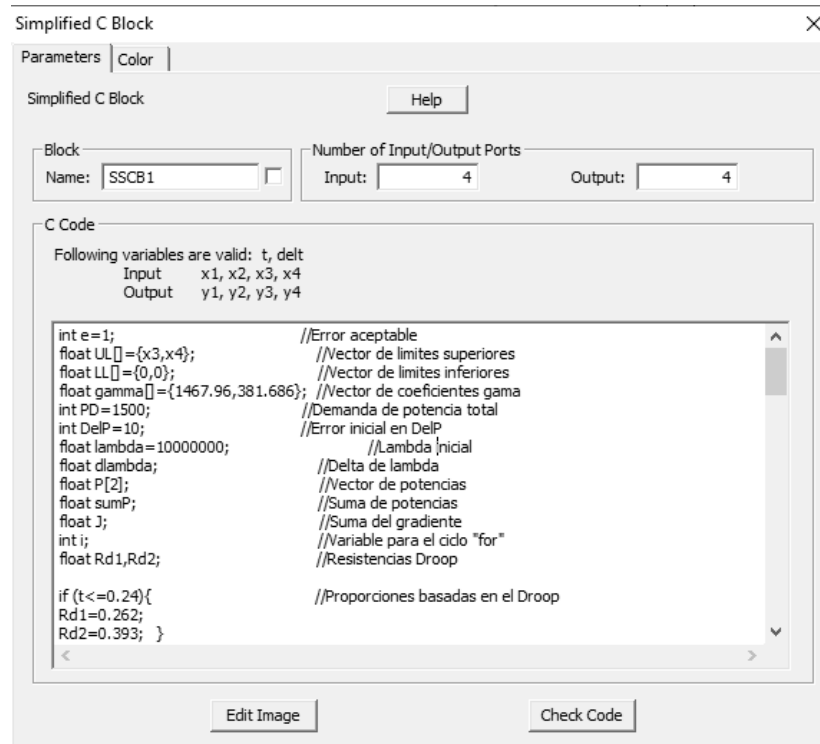
(b)



(c)

la Fig. 26.

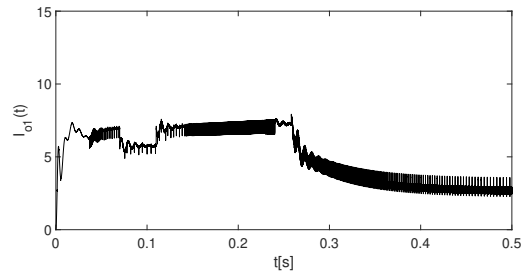
Figura 26. Bloque Simplified C Block configurado en PSIM



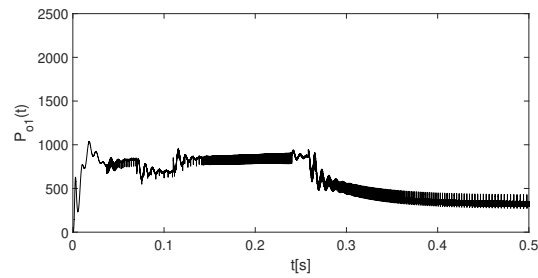
Adicionalmente, la Fig. 27 permite observar los resultados de simulación de la estrategia de despacho implementada en PSIM, realizando para $t > 0.24 s$ una asignación dinámica de proporciones que converge en $t \approx 0.5 s$ a los valores óptimos calculados analíticamente.

Más aún, la Fig. 28 muestra la variación correspondiente para las resistencias de *droop* en un horizonte más amplio, para observar una segunda conmutación en $t = 0.5 s$ tras asignar una variación arbitraria de γ_1 (pasando de 1467.96 a 600) para forzar el algoritmo a un nuevo cálculo de sus valores óptimos. De esta manera, los cambios de R_{di} reflejan variaciones consistentes en los valores

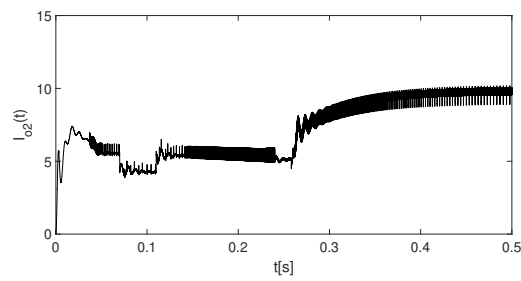
Figura 27. Aportes de cada generador bajo esquema de despacho económico: (a) $I_{o1}(t)$, (b) $P_{o1}(t)$, (c) $I_{o2}(t)$ y (d) $P_{o2}(t)$



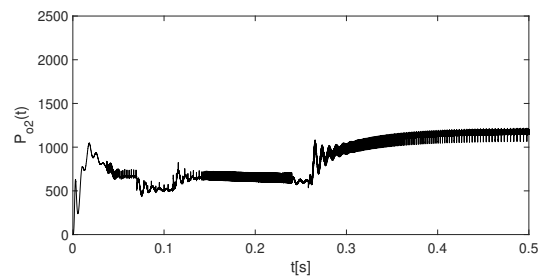
(a)



(b)



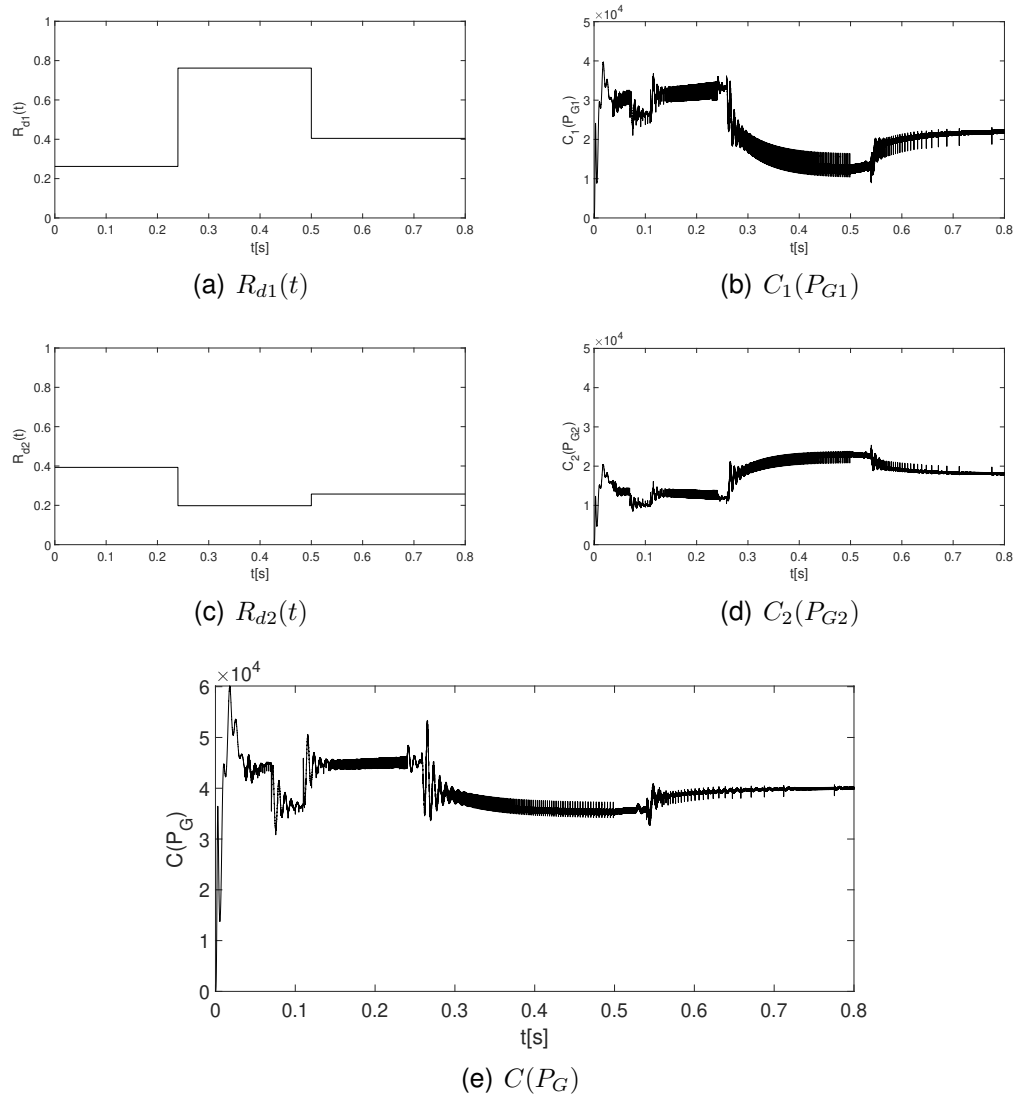
(c)



(d)

de costo (20) y (21) y de manera más puntual en el costo total de operación (22), correspondiente con $C(P_G) \propto C_C(P_G)$. De este último, se observa que el algoritmo programado en el Simplified C Block minimiza “dinámicamente” el costo de operación del sistema.

Figura 28. Variación de R_{di} y costos asociados bajo esquema de despacho económico



4. RECOMENDACIONES

Las simulaciones desarrolladas en PSIM para el algoritmo de *Newton-Raphson*, presentaron inconvenientes de convergencia para algunos valores de γ_1 , manifestados en perturbaciones que alteraban la cantidad de iteraciones necesarias para encontrar los valores óptimos.

Lo anterior, sugiere una selección apropiada en los valores iniciales de λ , al igual que en los cambios programados para el parámetro γ_1 , de manera tal que pueda asegurarse una evolución consistente con los valores esperados de solución para el método numérico implementado.

5. TRABAJO FUTURO

La evolución natural del presente trabajo de grado, implica las siguientes actividades complementarias a manera de trabajo futuro: 1) la extensión de los resultados presentados en corriente continua al caso de sistemas de generación en corriente alterna; 2) verificación experimental para la estrategia de despacho presentada a través de simulaciones en PSIM.

6. CONCLUSIONES

El presente trabajo de grado, fue desarrollado en el marco del proyecto de investigación denominado: “*Control centralizado para un sistema de generación de energía con potencial aplicación en zonas rurales del departamento de Santander*”, financiado por la Universidad Industrial de Santander a través del código VIE-UIS 2479.

A partir de los desarrollos presentados y los resultados obtenidos, es posible enunciar la siguiente conclusión general:

- Se diseñó y simuló un algoritmo de control óptimo para una *microrred* empleando un enfoque de control jerárquico. En particular, se realizó la implementación de una rutina basada en el algoritmo de Newton-Raphson simulado en PSIM, para calcular el reparto de potencias que minimiza un funcional de costo para un sistema de generación híbrido en corriente continua, constituido por la combinación entre un arreglo fotovoltaico y un banco de baterías. A su vez, la gestión de potencias se construyó sobre la base de un control *droop* que proporciona las referencias de un esquema de doble lazo (de tensión y corriente) para convertidores de potencia del tipo elevador (boost) abasteciendo la demanda energética en una carga constante de 1500 W.

De manera más puntual:

- Se estableció la topología para una *microrred* DC aislada con al menos dos tipos de fuente, como caso de estudio para el problema de gestión de recursos energéticos empleando control jerárquico. Tal y como fue abordado en el *Capítulo 3*, se realizó la definición conceptual de una microrred aislada y a partir de ello se justificaron valores para una configuración específica en la Sección 3.1, permitiendo obtener como caso de estudio la topología ilustrada en la Fig. 9.
- Se aplicó una técnica de control óptimo a partir de una estructura jerárquica sobre la *microrred* en un entorno de simulación. Para ello, se abordaron en el Capítulo 2 conceptos iniciales acerca del control de circuitos convertidores de potencia y esquemas de reparto de potencias y despacho económico en microrredes, que posteriormente fueron adaptados al caso de estudio mediante los desarrollos presentados en las *Secciones 3.2, 3.3 y 3.4 del Capítulo 3*.
- Se analizó mediante comparación por simulación, la operación del sistema optimizado con respecto al mismo sistema ante condiciones no óptimas, como estrategia de validación para el método propuesto. Más precisamente, en la Fig. 29(e) fue posible observar la evolución temporal para el funcional de costo definido en la expresión (22), siendo el intervalo de simulación $t \in [0, 0.24] s$ los valores calculados para suministrar un reparto de potencias apropiado (*no óptimo*) a partir de la estrategia *droop*. A partir de $t > 0.24 s$ se observa la optimización del despacho mediante la convergencia de las potencias a sus valores óptimos en $t = 0.5 s$ (ver Figs. 28(b) y 28(d)) con correspondiente reducción en el costo de operación del sistema. En un segundo momento, cuando $t > 0.5 s$ se realiza una conmutación adicional del algoritmo para un

valor arbitrario del coeficiente de ponderación del *generador 1* en la función de costo (γ_1) y modificaciones correspondientes en las proporciones de despacho (resistencias *droop*, ver Figs. 28(a) y 28(c)) que constituyen una reasignación (gestión) dinámica de recursos en el sistema.

BIBLIOGRAFÍA

- ALZATE, R. y L. FUENTES. "Optimización hamiltoniana en un circuito convertidor de potencia". En: *Revista Integración: Temas de Matemáticas* 31.2 (2013), págs. 133-146 (vid. págs. 17, 31).
- BARRERA LOBO, Felipe Andrés. *Control primario con pendiente variable aplicado en microrredes aisladas*. Trabajo de Grado (Ingeniero Civil Eléctrico). Santiago de Chile - Chile: Universidad de Chile, 2016 (vid. pág. 14).
- BETANCUR CASTRO, Yury Karina y Yuly Alejandra PERÉZ RUIZ. *Identificación e implementación de modelos de baterías para una micro red en el entorno gráfico de simulación Simulink de Matlab*. Trabajo de grado (Ingeniera Electricista). Bucaramanga - Colombia: Universidad Industrial de Santander, 2016 (vid. pág. 20).
- CHAPARRO VARGAS, Alexis Iván y Juan David LISCANO SEGURA. *Diseño e implementación de una Microrred en la Universidad Distrital Francisco José de Caldas Sede de Ingeniería*. Trabajo de grado (Ingeniero Eléctrico). Bogotá - Colombia: Universidad Distrital Francisco José de Caldas, 2017 (vid. pág. 19).
- DURAN SANTOS, Cesar Ricardo y Jose Fernando FORERO QUINTERO. *Propuesta metodológica para la selección de la topología más adecuada para la implementación de una microrred en centros poblados con viviendas en zonas no interconectadas (ZNI)*. Trabajo de grado (Ingeniero Electricista). Bucaramanga - Colombia: Universidad Industrial de Santander, 2014 (vid. pág. 20).
- GALVIS SILVA, Yohana Carolina y Leonardo GOMEZ ARIZA. *Estudio de viabilidad para el aprovechamiento biogás que se produce en el relleno sanitario "El Ca-*

- rrasco” y su adaptabilidad en un entorno de una microred eléctrica.* Trabajo de grado (Ingeniero Electricista). Bucaramanga - Colombia: Universidad Industrial de Santander, 2014 (vid. pág. 20).
- GARCÍA, C. y col. *El acuerdo de París: Así actuará Colombia frente al cambio climático.* WWF - Colombia, 2016 (vid. pág. 14).
- GIRALDO GÓMEZ, Wilson Daniel. “Metodología para la gestión óptima de energía en una micro red eléctrica interconectada”. Tesis de Maestría (Magister en Ingeniería Eléctrica)). Colombia: Universidad Nacional de Colombia, 2016 (vid. pág. 20).
- GONZÁLEZ RAMÍREZ, Maritza Andrea y Diego Alexander ORTIZ QUEVEDO. *Simulación de la Microrred de la Facultad de Ingeniería de la Universidad Distrital FJDC.* Trabajo de grado (Ingeniero Eléctrico). Bogotá - Colombia: Universidad Distrital Francisco José De Caldas, 2016 (vid. pág. 19).
- GUERRERO, J. M. y col. “Hierarchical Control of Droop-Controlled AC and DC Microgrids: A General Approach Toward Standardization”. En: *IEEE Transactions on Industrial Electronics* 58.1 (2011), págs. 158-172 (vid. págs. 18, 19, 30).
- HART, D. W. *Electrónica de Potencia.* PEARSON EDUCACIÓN S.A., 2001 (vid. pág. 35).
- HATZIARGYRIOU, N. *Microgrids: architectures and control.* John Wiley & Sons, 2014 (vid. pág. 15).
- HERNÁNDEZ VARGAS, Diana Marcela. *Despacho económico y su aplicación en microrredes eléctricas.* Trabajo de grado (Ingeniero Electricista). Bucaramanga - Colombia: Universidad Industrial de Santander, 2019 (vid. págs. 32, 46).

- ILIC, M. D. y S. X. LIU. *Hierarchical Power Systems Control: Its Value in a Changing Industry (Advances in Industrial Control)*. Springer, 1996 (vid. pág. 18).
- LU, X. y col. "An improved droop control method for DC microgrids based on low bandwidth communication with DC bus voltage restoration and enhanced current sharing accuracy". En: *IEEE Transactions on Power electronics* 29.4 (2013), págs. 1800-1812 (vid. pág. 16).
- MORALES RODRÍGUEZ, Jairo Andrés. *Operación y control de microredes operando en modo aislado*. Trabajo de grado (Ingeniero Eléctrico). Pereira - Colombia: Universidad Tecnológica de Pereira. Programa de Ingeniería Eléctrica, 2016 (vid. pág. 20).
- MUÑOZ GALVIS Karen Julieth y HERNÁNDEZ MALAVER, DIANA CATALINA. *Control droop de una microrred simple*. Trabajo de grado (Ingeniero Electrónico). Bucaramanga - Colombia: Universidad Industrial de Santander, 2019 (vid. págs. 25, 33, 38, 42).
- OGATA, K. *Ingeniería de Control Moderna*. PEARSON EDUCACIÓN S.A., 2010 (vid. págs. 17, 40).
- PLANAS, E. "Aportaciones al diseño del control jerárquico de microrredes eléctricas". Tesis doct. ESPAÑA: Universidad del País Vasco, Escuela Técnica Superior de Ingeniería de Bilbao, 2013 (vid. pág. 15).
- PLANAS, E. y col. "General aspects, hierarchical controls and droop methods in microgrids: A review". En: *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 17 (2013), págs. 147-159 (vid. pág. 15).

- REY LÓPEZ, Juan Manuel y Pedro Pablo VERGARA BARRIOS. *Diseño de una microred de baja tensión para el laboratorio de integración energética del parque tecnológico de Guatiguará*. Trabajo de grado (Ingeniero Electricista e Ingeniero Electrónico). Bucaramanga - Colombia: Universidad Industrial de Santander, 2012 (vid. pág. 20).
- RIZQIAWAN, A. y col. "Damping improvement by using virtual resistance controller for DC-DC boost converter dahono-1". En: *2017 International Conference on High Voltage Engineering and Power Systems (ICHVEPS)*. 2017, págs. 400-403 (vid. págs. 28, 29).
- ROA CANO, Gustavo y Andruv Saim AYALA ORTÍZ. *Control en espacio de estados para un dron tipo cuadrorotor*. Trabajo de grado (Ingeniero Electrónico). Bucaramanga - Colombia: Universidad Industrial de Santander, 2016 (vid. pág. 40).
- SAADAT, H. *Power System Analysis*. PSA Publishing LLC, 2011 (vid. págs. 18, 48, 51).
- SADIKU, M. O. y C. K. ALEXANDER. *Fundamentos de circuitos eléctricos*. McGraw-Hill Interamericana, 2006 (vid. pág. 42).
- SHUAI, Z. y col. "Hierarchical structure and bus voltage control of DC microgrid". En: *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 82.3 (2018), págs. 3670-3682 (vid. págs. 18, 19).
- UTKIN, V., J. GULDNER y J. SHI. *Sliding Mode Control in Electromechanical Systems*. Taylor & Francis, 1999 (vid. pág. 24).

VEGA, C. J. y R. ALZATE. “Control óptimo inverso como alternativa para la regulación de un convertidor DC-DC elevador”. En: *Tecnura* 19.46 (2015), págs. 65-78 (vid. pág. 17).

YU, S. Y. y col. “SoC-based output voltage control for BESS with a lithium-ion battery in a stand-alone DC microgrid”. En: *Energies* 9.11 (2016), págs. 924-939 (vid. págs. 25, 27).

ZAPATA GARCÍA, Diego Fernando. *Definición de componentes tecnológicos de una micro-red inteligente*. Trabajo de grado (Ingeniero Electricista). Bucaramanga - Colombia: Universidad Industrial de Santander, 2014 (vid. pág. 20).