

CONTROL DROOP DE UNA MICRORRED SIMPLE

DIANA CATALINA HERNÁNDEZ MALAVER

KAREN JULIETH MUÑOZ GALVIS

UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER

FACULTAD DE INGENIERÍAS FÍSICOMECÁNICAS

ESCUELA DE INGENIERÍAS

ELÉCTRICA, ELECTRÓNICA Y DE TELECOMUNICACIONES

BUCARAMANGA

2019

CONTROL DROOP DE UNA MICRORRED SIMPLE

DIANA CATALINA HERNÁNDEZ MALAVER

KAREN JULIETH MUÑOZ GALVIS

Trabajo de Grado para optar al título de
Ingeniera Electrónica

Director

Ricardo Alzate Castaño

Doctorado en Ingeniería Informática y Automática

UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER

FACULTAD DE INGENIERÍAS FÍSICOMECAÑICAS

ESCUELA DE INGENIERÍAS

ELÉCTRICA, ELECTRÓNICA Y DE TELECOMUNICACIONES

BUCARAMANGA

2019

DEDICATORIA

Este trabajo esta dedicado a todas aquellas personas que apoyaron el desarrollo y ejecución de este trabajo de grado.

AGRADECIMIENTOS

Agradezco a mis padres por el apoyo económico y moral que tuvieron para conmigo durante el desarrollo de mi carrera. A mis amigos y compañeros por las experiencias vividas. Agradezco a Julian Fuentes, por el apoyo emocional y la motivación de emprender y salir adelante. También, a nuestro director de proyecto de grado por motivarnos a aprender y mejorar cada día más.

Diana Hernández

Agradezco a mis padres y hermanas por el apoyo incondicional que tuvieron para conmigo durante el desarrollo de mi carrera. A mis amigos y compañeros por acompañarme en mi proceso de formación. También un agradecimiento a nuestro director de trabajo de grado por compartir su tiempo y conocimiento para la realización de este proyecto.

Karen Muñoz

CONTENIDO

	pág.
INTRODUCCIÓN	15
1. OBJETIVOS	23
2. Control de microrredes eléctricas	24
2.1. Microrredes eléctricas	24
2.2. Microrredes aisladas	25
2.2.1. Dimensionamiento de una microrred aislada	26
2.2.2. Realización circuital y simulación de la microrred	26
2.3. Control basado en reparto de potencias	33
2.3.1. Resistencia virtual	36
3. Control <i>droop</i> de una microrred	39
3.1. Estructura jerárquica del control	39
3.1.1. Lazo de control para i_L	40
3.1.2. Lazo de control para v_C	45
3.1.3. Control pre- <i>droop</i>	46
3.1.4. Lazo de control <i>droop</i>	48
4. RECOMENDACIONES	56
5. TRABAJO FUTURO	57
6. CONCLUSIONES	58
BIBLIOGRAFÍA	60

LISTA DE FIGURAS

	pág.
Figura 1. Esquema general de <i>microrred</i> aislada DC	17
Figura 2. Curvas de caída para generadores	18
Figura 3. Configuración para microrred aislada diseñada	27
Figura 4. Realización circuital para microrred aislada, en lazo abierto	27
Figura 5. Perfil de generación fotovoltaico	29
Figura 6. Diagrama esquemático del circuito simulado	31
Figura 7. Comportamiento temporal de magnitudes eléctricas en R	32
Figura 8. Magnitudes de salida en convertidores DC-DC	33
Figura 9. Modelo simplificado de una <i>microrred</i> DC de dos nodos	34
Figura 10. Curvas <i>droop</i> de la <i>microrred</i> DC con diferentes resistencias <i>droop</i>	35
Figura 11. Lazo <i>droop</i> para regulación de voltaje en convertidor DC/DC	37
Figura 12. Control <i>droop</i> jerárquico para microrred DC	40
Figura 13. Lazo para regulación de i_L	42
Figura 14. Respuesta ante perturbaciones para lazo de corriente	44
Figura 15. Lazo para regulación de v_C	45
Figura 16. Respuesta ante perturbaciones para lazo de voltaje	47
Figura 17. Resultados de simulación para control pre- <i>droop</i> en R	49
Figura 18. Perfil de simulación	51
Figura 19. Distribución corrientes y potencias ante control <i>droop</i>	51
Figura 20. Comportamiento de magnitudes en R ante control <i>droop</i>	53
Figura 21. Realización para microrred en lazo cerrado controlado	54
Figura 22. Realización para control <i>droop</i> más lazo en cascada	55

LISTA DE ANEXOS

	pág.
Anexo A. Modelo linealizado para el convertidor elevador	66

RESUMEN

TÍTULO: CONTROL DROOP DE UNA MICRORRED SIMPLE ¹

AUTOR: DIANA CATALINA HERNÁNDEZ MALAVER; KAREN JULIETH MUÑOZ GALVIS ²

PALABRAS CLAVE: CONTROL DROOP, CONVERTIDOR ELEVADOR, GESTIÓN ENERGÉTICA, MICRORREDES ELÉCTRICAS.

DESCRIPCIÓN:

El presente trabajo de grado aborda el control de microrredes eléctricas en corriente continua. Inicialmente se realiza el dimensionamiento para una microrred aislada a partir del recurso solar fotovoltaico y un banco de baterías con capacidad total instalada de 1.5 kW, motivando su utilización en el contexto de una estación de carga para vehículos eléctricos en zonas aisladas. Posteriormente, se calculan los parámetros de controladores clásicos del tipo proporcional-integral para regulación de tensión a la salida de un circuito convertidor de potencia elevador a través de un esquema de doble lazo en cascada. Este generador regulado se acopla a una resistencia virtual para ajustar los niveles de tensión y corriente necesarios para configurar dos o más generadores en paralelo a través de la estrategia droop en una topología jerárquica. Resultados de simulación en PSIM muestran que ante perturbaciones de carga y variaciones en los valores de tensión de suministro, la estrategia droop permite asegurar un flujo de potencia uniforme hacia la carga a pesar de las alteraciones nominales consideradas. El trabajo futuro incluye el análisis de lazos de control para gestión de la demanda energética a partir de controladores resonantes y el diseño e implementación de estrategias droop para generadores en corriente alterna.

¹ Trabajo de grado

² Facultad de Ingenierías Físico-Mecánicas. Escuela de Ingenierías Eléctrica, Electrónica y Telecomunicaciones. Director: Ricardo Alzate Castaño, Doctorado en Ingeniería Informática y Automática.

ABSTRACT

TITLE: DROOP CONTROL OF A SIMPLE MICROGRID³

AUTHOR: DIANA CATALINA HERNÁNDEZ MALAVER; KAREN JULIETH MUÑOZ GALVIS ⁴

KEYWORDS: BOOST POWER CONVERTER, DROOP CONTROL, ENERGY MANAGEMENT, MICROGRIDS.

DESCRIPTION:

In this work the control of direct current electric microgrids is addressed. The first part is concerned with sizing of an isolated microgrid based on solar photovoltaic resources and a battery bank, constituting a total installed capacity of 1.5 kW to supply the demand of a charge station for electrical vehicles located in a remote area. Hence, parameters for a cascaded double-loop of PI controllers regulating the output voltage of a boost power converter subjected to disturbances in the nominal value of load and variations in supply voltages, are calculated by classical model-based techniques. Moreover, the regulated generator is further linked to a virtual resistance to adjust its voltage and current levels in order to couple it with two or more generators in a hierarchical structure called droop control. The selection of the virtual resistance is the key to assign the percentage of power delivered by each generator to the load. Simulation results performed in PSIM allows to verify a constant power flowing through the load in spite of the disturbances altering the nominal conditions of the system. Ongoing work includes the analysis of energy management structures involving resonator controllers and the design and implementation of droop strategies for alternating current generators.

³ Bachelor Thesis

⁴ 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 ⁵.

En este contexto, los sistemas de generación distribuida y más precisamente las *microrredes*, poseen 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) ⁶. Una

⁵ C. García Arbeláez y col. *El acuerdo de París: Así actuará Colombia frente al cambio climático*. Cali: WWF - Colombia, 2016.

⁶ Felipe Andrés Barrera Lobo. *Control primario con pendiente variable aplicado en microrredes aisladas*. Trabajo de Grado (Ingeniero Civil Eléctrico). Santiago de Chile: Universidad de Chile, Facultad de Físicas y Matemáticas, Departamento de Ingeniería Eléctrica, 2016.

microrred se define como ^{7 8} un sistema de distribución de baja tensión con recursos distribuidos de energía, junto con dispositivos de almacenamiento (volantes de inercia, capacitores y baterías) y cargas flexibles, operados con conexión a la red o de manera autónoma si no dependen de la red principal.

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 complejos de control 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) ⁹.

Por tanto, dada la volatilidad de las fuentes de energía en arquitecturas de gene-

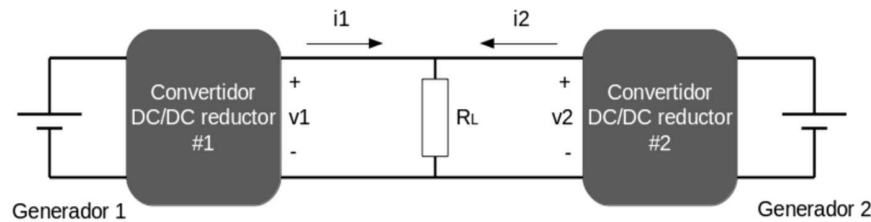
⁷ Estefanía Planas Fullaondo. "Aportaciones al diseño del control jerárquico de microrredes eléctricas". Ph.D. Departamento de Tecnología Electrónica. Universidad del País Vasco, Escuela Técnica Superior de Ingeniería de Bilbao, 2013.

⁸ Nikos Hatziaargyriou. *Microgrids: architectures and control*. John Wiley & Sons, 2014.

⁹ Estefanía 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.

ración distribuida como los son *microrredes* aisladas alimentadas por generadores de energía solar o eólica, e incluso grupos electrógenos empleando biocombustible, uno de los aspectos más importantes en una *microrred* es su apropiada gestión energética. Por simplicidad, se ilustrará como ejemplo el problema de suministrar a 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).

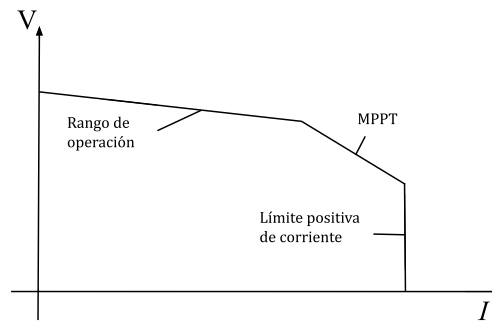
Figura 1. Esquema general de *microrred* aislada DC, con dos fuentes que suplen una misma carga



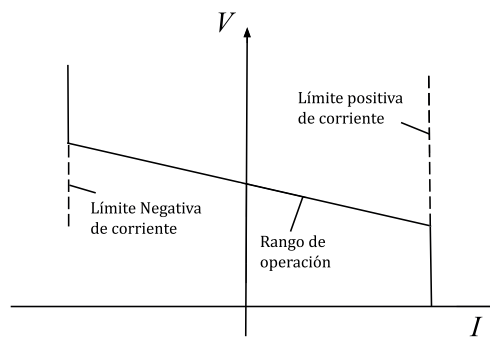
A partir de ello, considere las curvas de caída (o *droop curves* en Inglés) ilustradas en la Fig. 2, que relacionan niveles de voltaje vs. niveles de corriente (es decir, niveles límite de potencia) entregados por cada generador.

Como se observa en 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

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



(a)



(b)

Fuente: 9.

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*. Al respecto, la técnica de control de caída o

control droop ¹⁰ se convierte en una alternativa muy empleada en aplicaciones para estabilizar la potencia de salida de generadores, actuando en conjunto con controles de lazo de voltaje y corriente ¹¹. Una ventaja importante del control droop es que no requiere una infraestructura de comunicación muy refinada en la *microrred*, siendo esta una de las exigencias más relevantes a nivel tecnológico para la implementación de redes inteligentes ^{12 7}. En esencia la técnica de control droop ajusta la pendiente de la curva que relaciona bien sea la frecuencia con la potencia activa (en redes AC) o la corriente y el voltaje (en redes DC - ver Fig. 2), para los generadores que alimentan la *microrred*, empleando por ejemplo impedancias virtuales. Para una revisión detallada de la técnica, se sugiere al lector interesado consultar ¹³.

En Colombia el control de *microrredes* es un tema que ha despertado interés reciente en la comunidad científica. Por tanto, se destacan trabajos como ¹⁴ en la cual se presenta un estudio de tipos de control en *microrredes* AC haciendo énfasis en la configuración maestro - esclavo; en Fernando Guerrero Torres. *Estudio de la opera-*

¹⁰ Xiaonan 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.

¹¹ Douglas Pereira Henrique. *Análise de um controlador Drop de potência integrado ao controle em modo conectado de um inversor de tensão trifásico balanceado*. Trabajo de grado (Graduação em Engenharia Elétrica com ênfase em Sistemas de Energia e Automação). São Carlos, Brasil: Escola de Engenharia de São Carlos da Universidade de São Paulo, 2017.

¹² Elvis Eduardo Gaona García, César Leonardo Rodríguez Trujillo y Herbert Enrique Rojas Cubides. "Infraestructura de comunicaciones en microrredes eléctricas". En: *Revista Electrónica Redes de Ingeniería* 5.2 (2014), págs. 28-38.

¹³ Usman Bashir Tayab y col. "A review of droop control techniques for microgrid". En: *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 76 (2017), págs. 717-727.

¹⁴ Jairo Andrés Morales Rodríguez. *Operación y control de micro-redes operando en modo aislado*. Trabajo de Grado (Ingeniería Eléctrica). Pereira, Colombia: Universidad Tecnológica de Pereira, Programa de Ingeniería Eléctrica, 2015.

ción de las microrredes con convertidores back to back. Trabajo de Grado (Ingeniero Electricista. Santiago de Cali, Colombia: Universidad Autónoma de Occidente, Facultad de Ingeniería, Departamento de Energética y Mecánica, 2016 se muestran los convertidores back to back como alternativa de control de flujo de potencia en *microrredes*; en ¹⁵ se realizan conexiones paralelas con la red para alimentar cargas lineales y no lineales mediante control droop; en ¹⁶ se analizan sistemas VSC-HVDC bajo un esquema multiterminal de múltiples alternativas de control incluyendo la técnica droop; en ¹⁷ se implementan estrategias de control para integración de subsistemas en una *microrred* y se propone un algoritmo de optimización para despacho económico bajo distintas condiciones de generación y demanda; en ¹⁸ se propone una arquitectura para controlar *microrredes* aisladas tomando en cuenta los estados de sus elementos almacenadores de energía; en ¹⁹ se aborda una visión de tecnologías para operación, gestión y control de *microrredes*, incluyendo el control para potencia activa y reactiva, jerárquico y multiagente.

¹⁵ Oscar Mauricio Hernández y Camilo Andrés Sanabria. *Diseño y prueba de inversores independientes con capacidad de conexión en paralelo para alimentar cargas lineales y no lineales*. Tesis de Maestría (Magister en Ingeniería Electrónica). Santafé de Bogotá, Colombia: Pontificia Universidad Javeriana, Facultad en Ingeniería, Maestría en Ingeniería Electrónica., 2013.

¹⁶ Daniel Garzón Yusti. *Operación y control de sistemas HVDC multiterminal*. Trabajo de Grado (Ingeniería Eléctrica). Pereira, Colombia: Universidad Tecnológica de Pereira, Programa de Ingeniería Eléctrica, 2015.

¹⁷ Ignacio Javier Muñoz Moreno. *Modelo y control de un sistema híbrido PV-Eólico para una micro-red eléctrica DC*. Tesis de Maestría (Magister en Ingeniería Electrónica). Santafé de Bogotá, Colombia: Pontificia Universidad Javeriana, Facultad de Ingeniería, Departamento de Ingeniería Electrónica, 2015.

¹⁸ Carlos Andrés Torres Pinzón. *Sistemas distribuidos para el control del modo de operación en micro-redes inteligentes basados en técnicas multiAgente*. Propuesta de Investigación. Santafé de Bogotá, Colombia: Universidad Santo Tomas, Programa de Ingeniería Electrónica, 2016.

¹⁹ Ricardo David Medina. "Microrredes basadas en electrónica de potencia: parte II: control de potencia activa y reactiva". En: *Ingenius* 12 (2014), págs. 24-34.

Asimismo, en la Universidad Industrial de Santander y más particularmente en la Escuela de Ingenierías Eléctrica, Electrónica y de Telecomunicaciones (E3T), se destacan trabajos como: ²⁰ donde se establecen parámetros en modos de operación de turbogeneradores usando control droop e isochronous; ²¹ que estudia el mejoramiento de factores en *microrredes* como rendimiento, durabilidad y factibilidad; asimismo se destaca el trabajo de la Prof. María Alejandra Mantilla Villalobos en control de flujos de potencia en sistemas fotovoltaicos ^{22 23 24 25 26}.

A pesar de ello, no se documenta un trabajo notable al interior de la E3T en control

-
- ²⁰ Juan Carlos Caballero y Juan Darío Acosta. *Lógica para cambio de estado de operación Isochronous/Droop de dos turbogeneradores de una red de autogeneración propietaria con conexión al sistema interconectado nacional (SIN) según el estado de los interruptores de las líneas de transmisión o distribución asociadas*. Monografía (Especialista en Sistemas de Distribución de Energía Eléctrica). Bucaramanga, Colombia: Universidad Industrial de Santander, 2016.
- ²¹ Leidy Johana Cuchimaque y Ana María Montagut. *Caracterización de acumuladores de energía en el ámbito de micro redes inteligentes*. Trabajo de grado (Ingeniera Electrónica y Electricista). Bucaramanga, Colombia: Universidad Industrial de Santander, 2014.
- ²² María Alejandra Mantilla Villalobos. "Control de generadores fotovoltaicos con funciones de filtrado activo en sistemas trifásicos distorsionados y desequilibrados". Doctor en Ingeniería Área Ingeniería Electrónica. Universidad Industrial de Santander, Facultad de Ingenierías Físico-Mecánicas, 2016.
- ²³ Lady Vargas y Sergio Rodríguez. *Convertidor DC/DC dual intercalado para aplicaciones en sistemas fotovoltaicos*. Trabajo de grado (Ingeniero Electricista). Bucaramanga, Colombia: Universidad Industrial de Santander, 2017.
- ²⁴ Fausto Osorio Silva. *Control de sistema fotovoltaico conectado a la red trifásica considerando inversor multinivel con diodos anclados al neutro*. Tesis de Maestría (Magister en Ingeniería Electrónica). Bucaramanga, Colombia: Universidad Industrial de Santander, 2017.
- ²⁵ John Edinson Archila Valderrama. *Implementación de un convertidor SEPIC para el seguimiento del punto de máxima potencia en sistemas fotovoltaicos*. Tesis de Maestría (Magister en Ingeniería Electrónica). Bucaramanga, Colombia: Universidad Industrial de Santander, 2016.
- ²⁶ Nasser Mendoza y John Pardo. *Convertidor directo de potencia aplicado a inversores trifásicos conectados a la red*. Trabajo de grado (Ingeniero Electricista). Bucaramanga, Colombia: Universidad Industrial de Santander, 2013.

de *microrredes* a partir de un enfoque jerárquico y, más particularmente, incorporando la técnica de control droop 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 la técnica de control droop en *microrredes*? ¿Cómo implementar un control droop en una *microrred* DC aislada? ¿Qué ventajas presenta la técnica de control droop en la operación de *microrredes* y redes inteligentes? ¿Cómo posibilita el control droop incorporar el concepto de jerarquía en el esquema de operación de una *microrred*?

1. OBJETIVOS

Objetivo general

- Diseñar y simular una estrategia de control droop aplicada a una *microrred* DC simple.

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 droop;
- Diseñar y aplicar la técnica de control droop sobre la *microrred* en un entorno de simulación;
- Analizar la operación del sistema controlado bajo el esquema droop ante cambios en los valores de suministro y/o los perfiles de carga.

2. Control de microrredes eléctricas

En las últimas décadas el crecimiento poblacional e industrial ha incrementado el consumo de energía a niveles sin precedentes, lo cual ha requerido la implementación de nuevas alternativas para satisfacer la demanda energética en modo eficiente y amigable con el medio ambiente. Parte de lo anterior conlleva el uso de recursos renovables, como lo son el potencial energético del sol, el viento y el agua, entre otros. A partir de esto, los sistemas de generación distribuida y en particular las *microrredes* aprovechan este tipo de recurso, principalmente en zonas remotas y no interconectadas. En este *Capítulo* se define formalmente el concepto de *microrred*, se aborda su diseño y simulación al igual que el control de sus variables relevantes.

2.1. Microrredes eléctricas

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 ⁸.

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.

Asimismo, dependiendo de la naturaleza de las cargas se pueden tener microrredes en corriente continua (DC) o en corriente alterna (AC), estas últimas a su vez en modo monofásico o trifásico. Debido a las características de las cargas residenciales, es más común encontrar microrredes en AC de tipo monofásico. Sin embargo, aunque sea menos frecuente es también posible configurar microrredes en DC para el caso de aplicaciones que utilizan energías renovables, debido a que cargas como las baterías de vehículos eléctricos operan en DC ²⁷. Adicionalmente, existen menos pérdidas cuando se transmite energía en DC debido a la eliminación del efecto piel y a la reducción en los niveles de tensión de las líneas.

Para objetivos del presente trabajo de grado, se realizará mayor énfasis en *microrredes* que operan en modo aislado.

2.2. Microrredes aisladas

En una *microrred aislada* el dimensionamiento apropiado de los valores nominales de los generadores, se convierte en un aspecto crítico para satisfacer las necesidades de demanda energética en las cargas. Para ello puede hacerse uso de algoritmos de control que modifiquen los parámetros de generación de cada fuente del sistema para adecuarse a cambios del entorno y otro tipo de perturbaciones ⁸. También se convierten en recursos útiles los elementos de almacenamiento energético tales como baterías, celdas de combustible, supercapacitores y volantes de inercia, para aumentar la autonomía de la microrred (i.e. el tiempo que puede alimentar de energía a las cargas) ante una eventual contingencia.

²⁷ Bronson Richard Blasi. *DC microgrids: review and applications*. Tesis de Maestría (Magister en Ciencias). Manhattan, Kansas - USA: Kansas State University, College of Engineering, Master of Science, 2013.

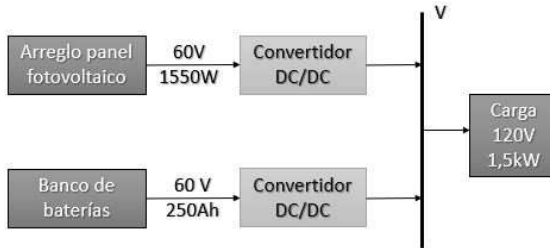
2.2.1. Dimensionamiento de una microrred aislada Actualmente, *Electrificadora de Santander S.A.* (<https://www.essa.com.co/>) posee una estación de carga para vehículos eléctricos instalada en el centro de la ciudad de Bucaramanga. Dicha estación de carga permite realizar, entre otras opciones, una carga lenta a 12 A y 1.5 kW. Considerando el caso de un vehículo eléctrico con batería de 30 kWh a 120 VDC (e.g. NISSAN LEAF - <https://www.nissan.com.co>), lo anterior representa un tiempo de carga de aproximadamente 21 h.

Si la estación de carga para vehículos eléctricos se encuentra en una zona no interconectada de Colombia, se puede pensar en aprovechar el potencial solar del país instalando 1.5 kW de dicho recurso. Asimismo, se puede complementar el sistema fotovoltaico con un módulo de almacenamiento por baterías de capacidad nominal similar; es decir, de 1.5 kWh.

Desde un punto de vista práctico, pueden considerarse paneles fotovoltaicos de 310 W / 12 VDC configurados en serie (5 módulos) para generar 60 VDC con baja corriente. Es posible complementar lo anterior con un convertidor de potencia DC/DC elevador (boost) de manera tal que en la salida se obtengan 120 VDC. Asimismo, un arreglo en serie de 5 baterías de 250 Ah / 12 VDC permitirá obtener 250 Ah / 60 VDC como entrada a un convertidor de potencia DC/DC elevador (boost), proporcionando 120 VDC a la carga conectada en su salida. El diagrama de bloques para la microrred aislada configurada en los términos descritos, se presenta en la Fig. 3.

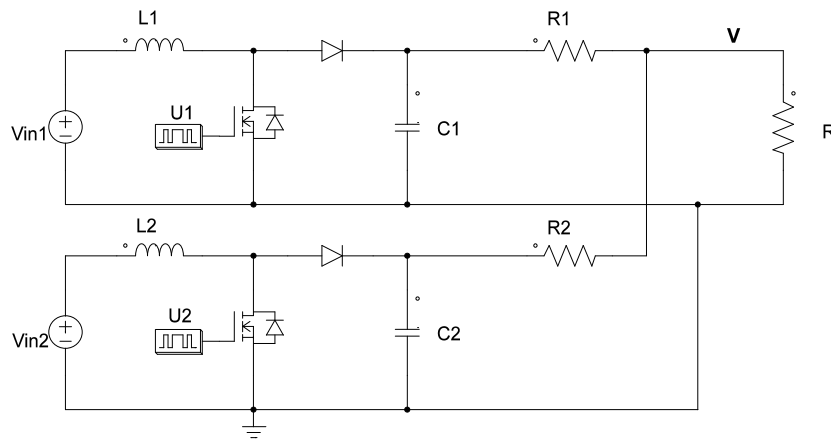
2.2.2. Realización circuital y simulación de la microrred La realización circuital para la microrred configurada se describe mediante el diagrama esquemático de la Fig. 4, en donde V_{in_1} hace referencia al arreglo de paneles fotovoltaicos, V_{in_2} al

Figura 3. Configuración para microrred aislada diseñada



banco de baterías y R a la carga del sistema. Asimismo, $R_1 = 0.032 \Omega$ y $R_2 = 0.016 \Omega$ representan las resistencias de línea entre el convertidor y el bus DC (calculadas para un cable de cobre calibre 14, diámetro 1.63 mm y longitudes 4 m y 2 m , respectivamente)²⁸.

Figura 4. Realización circuital para microrred aislada, en lazo abierto



Para el diseño del circuito convertidor de potencia se consideró una carga resistiva con potencia fija de 1.5 kW , lo cual, para un bus DC de 120 V representa una impedancia de:

$$R = \frac{V^2}{P} = \frac{(120)^2}{1500} = 9.6 \Omega,$$

²⁸ Matthew Alexander Sadiku. *Fundamentos de circuitos eléctricos*. Vol. 5. McGraw-Hill, 2006.

y una corriente de:

$$I_o = \frac{P}{V} = \frac{1500}{120} = 12.5 \text{ A.}$$

A partir de lo anterior, y considerando una frecuencia de base para el circuito de PWM (modulación de ancho de pulso) con valor $f = 20 \text{ kHz}$, ante una entrada de 60 VDC el circuito convertidor de potencia elevador presentará un ciclo útil D con valor nominal dado por ²⁹:

$$D = 1 - \frac{V_{in}}{V} = 1 - \frac{60}{120} = 0.5,$$

es decir 50 %. Asimismo, considerando un factor de rizo $\Delta_V = 3 \%$ en el voltaje del condensador, el valor de la capacitancia debe satisfacer ²⁹:

$$C > \frac{D}{f \times R \times \Delta_V} = \frac{0.5}{20 \times 10^3 \times 9.6 \times 0.03} = 86.81 \mu F,$$

que aproximado a valores comerciales permite obtener $C = 100 \mu F$.

Para el caso del inductor, su corriente puede calcularse como:

$$I = \frac{V_{in}}{(1 - D)^2 R} = \frac{60}{(1 - 0.5)^2 \times 9.6} = 25 \text{ A},$$

al igual que un valor de inductancia mínima L_{min} dado por:

$$L_{min} = \frac{D(1 - D)^2 R}{2f} = \frac{0.5 \times (1 - 0.5)^2 \times 9.6}{2 \times 20 \times 10^3} = 30 \mu H.$$

²⁹ Mohammad H. Rashid. *Electrónica de potencia, circuitos, dispositivos y aplicaciones*. Vol. 2. Prentice-Hall Inc., 2001.

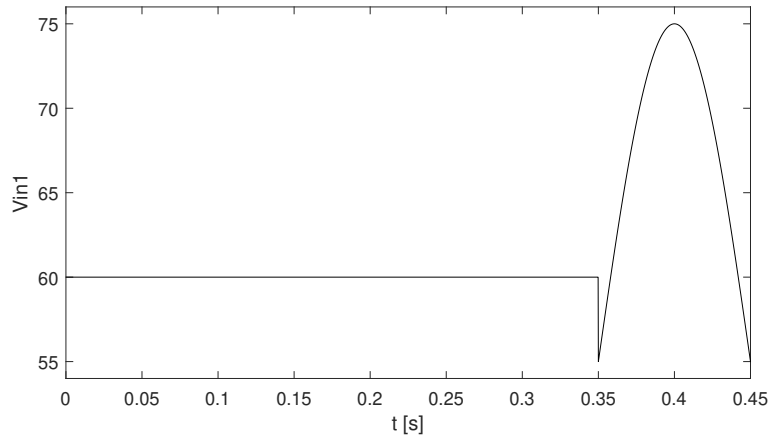
De esta manera, para asegurar un modo de conducción continua la corriente no puede ser negativa y por tanto, una variación del 2 % en el valor de I (es decir: $\Delta_I = 0.5 \text{ A}$) permite calcular ²⁹:

$$L = \frac{V_{in} \times D}{f \times \Delta_I} = \frac{60 \times 0.5}{20 \times 10^3 \times 0.5} = 3 \text{ mH} > L_{min},$$

que aproximada a valores comerciales representa una inductancia $L = 5.6 \text{ mH}$.

Ahora bien, la fuente fotovoltaica V_{in1} se consideró con un perfil de variación de voltaje que emula el comportamiento de la radiación solar a lo largo de un intervalo del mediodía (escalado a 0.1 s) con valor pico de 75 VDC , tal y como lo muestra la Fig. 5, para una tensión media aproximada de 60 VDC . Por su parte, la fuente correspondiente con el banco de baterías se seleccionó para un valor constante de 60 VDC .

Figura 5. Perfil de generación fotovoltaico



Para validar el funcionamiento de la microrred se configuraron e implementaron simulaciones numéricas en la herramienta *PSIM* (<https://powersimtech.com/>), considerando condiciones iniciales cero ante parámetros nominales para $t \in [0, 0.15] \text{ s}$

(esto incluye $V_{in1} = 60 \text{ VDC}$). Posteriormente, en $t = 0.15 \text{ s}$ se realizó un cambio escalón en el valor de carga, pasando de $R = 9.6 \Omega$ a 6.6Ω , mantenido hasta $t = 0.25 \text{ s}$ cuando se revierte a su valor original. A partir de $t = 0.35 \text{ s}$ se aplica la variación considerada en V_{in1} .

La Fig. 6 presenta el diagrama esquemático para el circuito simulado en *PSIM*. Asimismo, la Fig. 7 presenta los resultados de simulación obtenidos para la corriente, el voltaje y la potencia entregados a la resistencia de carga. A partir de ellos es posible observar que debido a la naturaleza del convertidor elevador, el circuito implementado se hace insensible a la variación de la carga en términos de voltaje. Sin embargo, lo anterior contrasta con la alta sensibilidad que genera un cambio de carga sobre la magnitud de su corriente.

Otro aspecto importante que se evidencia de las gráficas, es la afectación simultánea que recibe el sistema tanto en los niveles de voltaje como de corriente entregados a la carga, ante la variación del perfil de voltaje V_{in1} .

A su vez, la Fig. 8 presenta resultados para las magnitudes de salida en los convertidores elevadores previo a la resistencia de línea. Como se observa, dada la pequeña caída en las resistencias de línea (0.195 V) se conserva aproximadamente el mismo valor de tensión en la salida de cada generador. De igual manera, la corriente de carga se reparte en modo equitativo entre ambos convertidores.

Esta situación, sin embargo, se descompensa a partir del momento en que se aplica la perturbación en V_{in1} , cuando las proporciones dependen de la disponibilidad del recurso en la fuente de entrada, por otro lado el rizado que se presenta es un comportamiento normal del convertidor elevador, dado que este es gobernado por

Figura 6. Diagrama esquemático del circuito simulado

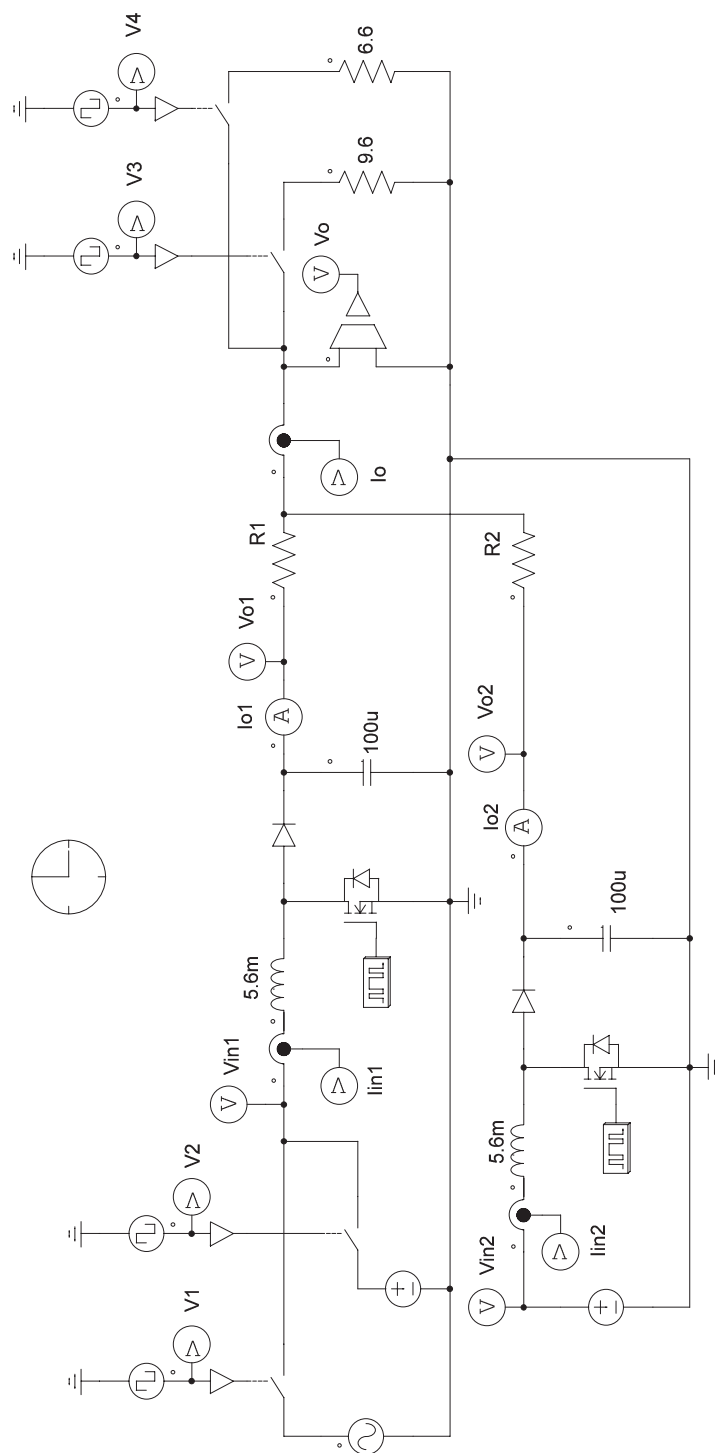
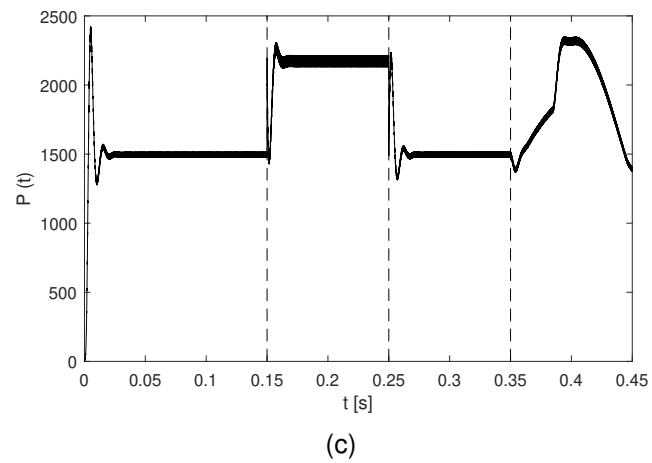
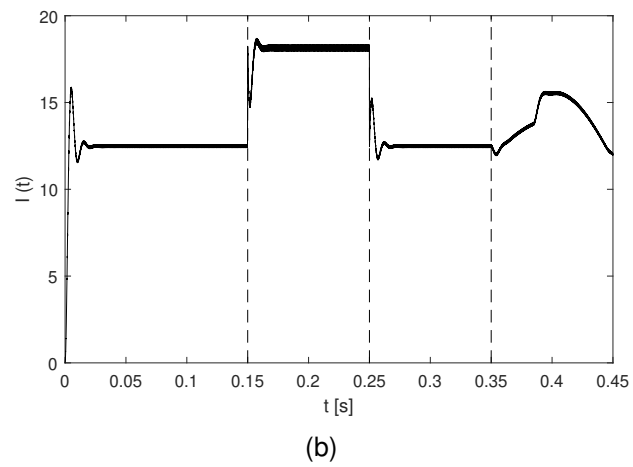
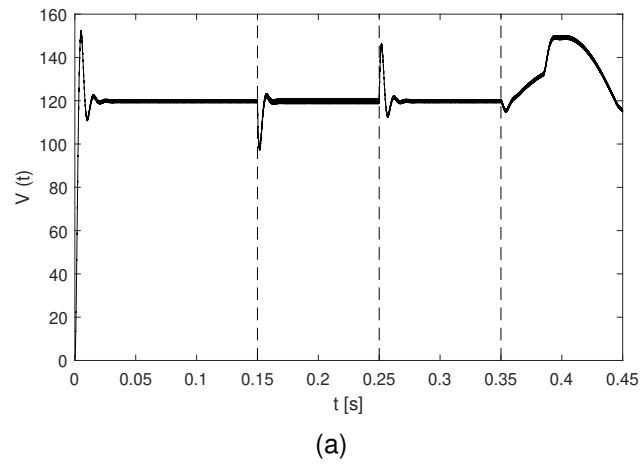
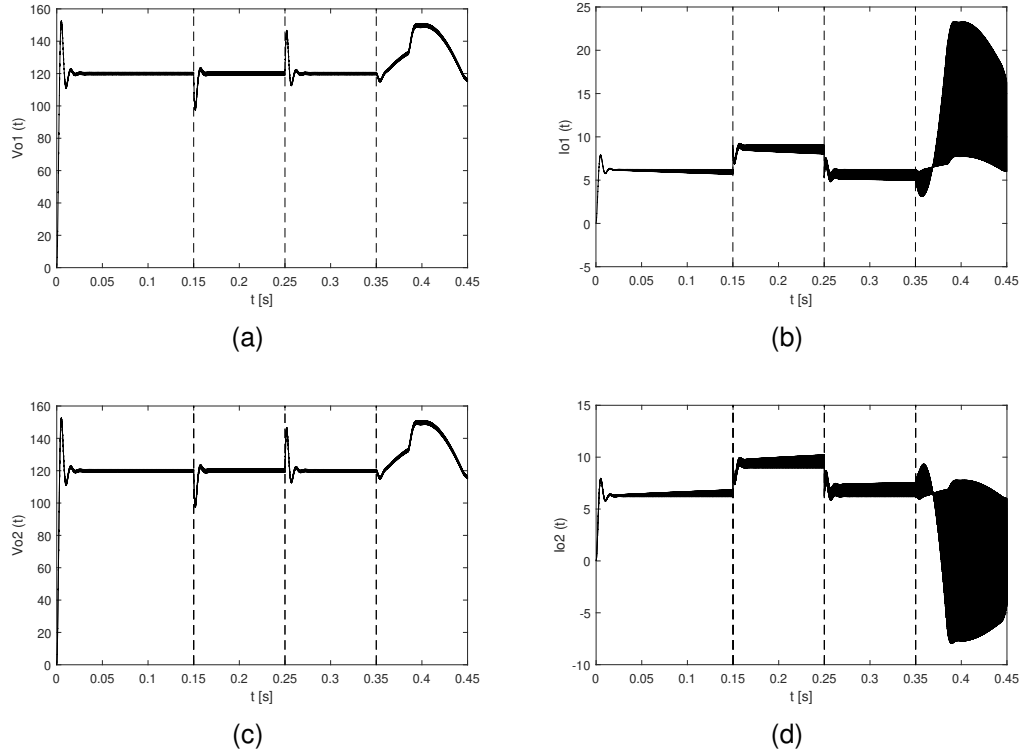


Figura 7. Comportamiento temporal de magnitudes eléctricas en R : (a) $V(t)$, (b) $I(t)$ y (c) $P(t)$



pulsos (PWM). Este punto constituye la esencia del control basado en reparto de potencias, también conocido como control *droop* ³⁰.

Figura 8. Magnitudes de salida en convertidores DC-DC: (a) $V_{o1}(t)$, (b) $I_{o1}(t)$, (c) $V_{o2}(t)$ y (d) $I_{o2}(t)$



2.3. Control basado en reparto de potencias

Considerando circuitos convertidores de potencia controlados, es posible pensar en la agrupación de diferentes etapas de convertidores (generadores) a manera de red.

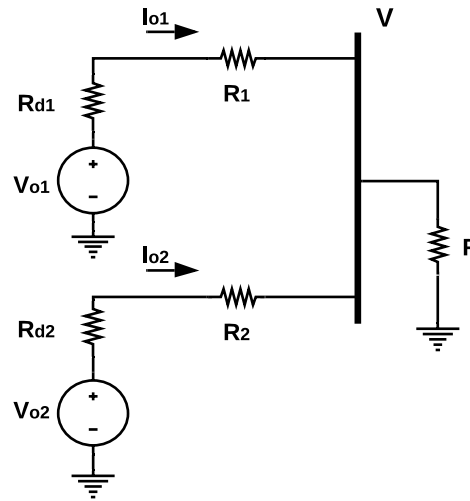
El control basado en reparto de potencias o *droop* ³⁰, es el método de control más

³⁰ Seung-Yeong Yu y col. "SoC-based output voltage control for BESS with a lithium-ion battery in a stand-alone DC microgrid". En: *Energies* 9 (2016), págs. 924-939.

utilizado para distribuir de manera adecuada las corrientes de la carga en aplicaciones de *microrredes*. Existe control *droop AC* y control *droop DC*.

Para introducir las ideas que fundamentan el método de control *droop DC* convencional, considere el esquema simplificado para la microrred DC de la Fig. 4, constituido por dos generadores (representados por 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, según ilustrado en la Fig. 9.

Figura 9. Modelo simplificado de una *microrred DC* de dos nodos



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

$$V = V_{oi} - I_{oi}R_{di} - I_iR_i, \quad (1)$$

siendo V_{oi} la tensión DC a la salida del i -ésimo generador $\forall i = \{1, 2\}$, I_{oi} su corriente, R_{di} su resistencia *droop* y R_i su resistencia de línea.

Tomando en cuenta que R_i puede considerarse despreciable (en una microrred la distancia entre generadores y cargas es corta), es posible escribir:

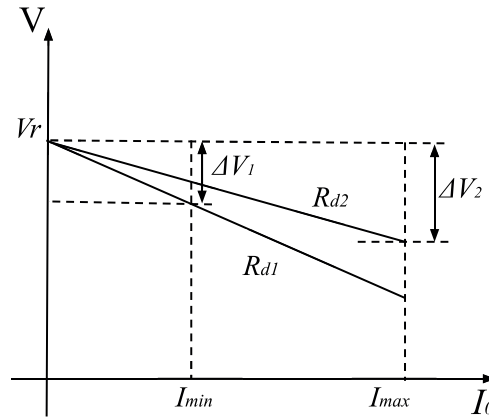
$$V = V_{o1} - I_{o1}R_{d1} = V_{o2} - I_{o2}R_{d2} \implies \frac{I_{o1}}{I_{o2}} = \frac{R_{d2}}{R_{d1}}, \quad (2)$$

bajo la suposición $V_{o1} \rightarrow V_{o2}$.

A partir de ello, *dimensionar* un control *droop* es asignar R_{di} en modo tal que sea posible satisfacer una relación de proporciones de potencia entre cada rama de generación, ante un voltaje controlado en la carga ³⁰.

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

Figura 10. Curvas *droop* de la *microrred* DC con diferentes resistencias droop



Dicha situación se ilustra gráficamente en la Fig. 10 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 $I_o \in [I_{min}, I_{max}]$ 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 valor mínimo de V . Así entonces, la máxima potencia entregada por la fuente será $P_\sigma = I_\sigma \times V_\sigma$ y por tanto, la expresión (3) puede modificarse para escribir:

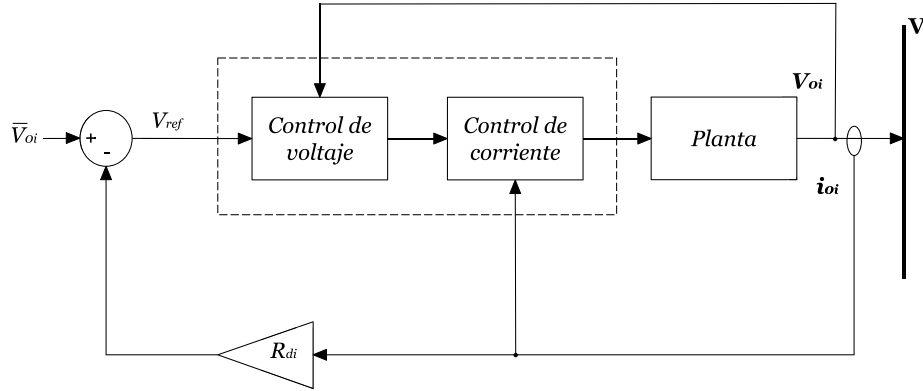
$$R_{di} \leq \frac{\Delta V \times V_\sigma}{P_\sigma}. \quad (4)$$

2.3.1. Resistencia virtual En favor de obtener un voltaje de bus V con valor regulado, los voltajes V_{oi} 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 ³¹.

³¹ Arwindra Rizqiawan y col. "Damping improvement by using virtual resistance controller for DC-DC

Figura 11. Lazo de control *droop* para regulación de voltaje en un convertidor DC/DC



Para explicar lo anterior, considere el sistema realimentado de la Fig. 11 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_d . A partir de ello:

$$V_{ref} = \bar{V}_{oi} - I_{oi}R_{di}, \quad (5)$$

siendo V_{ref} el valor deseado para V , mientras que $\bar{V}_{oi}$ es el valor deseado para V_{oi} .

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_{oi} en la operación ³¹;
- La referencia para el lazo de voltaje que regula la salida de tensión en el con-

boost converter dahono-1". En: *2017 International Conference on High Voltage Engineering and Power Systems (ICHVEPS)*. 2017, págs. 400-403.

vertidor de potencia no es el valor deseado $\bar{V}_{oi}$ para el voltaje V_{oi} del convertidor de potencia, sino el valor deseado V_{ref} para el voltaje del bus V ;

- La diferencia entre el valor deseado $\bar{V}_{oi}$ 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_i y de la corriente I_{oi} 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 R_{di} .

3. Control *droop* de una microrred

Posterior al dimensionamiento y simulación de la *microrred*, en el presente *Capítulo* se aborda formalmente el diseño y la implementación de un control *droop* para gestionar el reparto eficiente de potencias en el sistema de microgeneración. Inicialmente, se realiza el ajuste de los lazos de control internos para cada convertidor elevador y posteriormente se discute la combinación de generadores bajo el esquema *droop*.

3.1. Estructura jerárquica del control

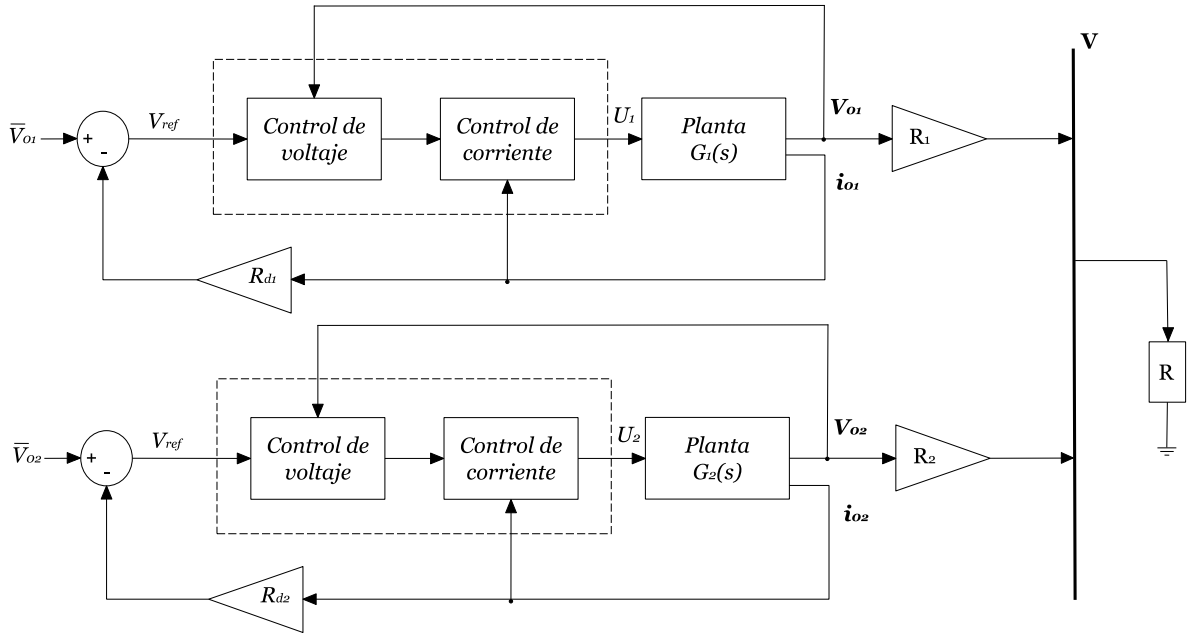
La Fig. 12 ilustra la estructura jerárquica del control *droop* para la microrred descrita y analizada en la *Sección 2.2*. A partir de ello, se observa que la base sobre la cual se construye la técnica *droop* es la regulación (estabilización) las variables relevantes en cada generador, hacia valores deseados en régimen permanente.

Para el caso particular de un circuito convertidor de potencia elevador (*boost*), la corriente y el voltaje en el nodo de salida se pueden ajustar empleando una estructura de control en cascada para la cual el lazo interno corresponde con la regulación de la corriente en el inductor, mientras el lazo externo permite gobernar la tensión del capacitor.

Para una discusión abierta del control en cascada de un convertidor elevador, se recomienda al lector interesado consultar el trabajo de *Alzate et al* en ³².

³² R. Alzate y col. "Double-loop control design for boost converters based on frequency response data". En: *20th World Congress of the international federation of automatic control (IFAC)*. 2017.

Figura 12. Control droop jerárquico para microrred DC



A continuación se describirá el diseño y ajuste de un controlador PI para cada lazo de la estructura en cascada y posteriormente su gobierno en modo descentralizado a través del control *droop* propuesto en la Sección 3.1.4.

3.1.1. Lazo de control para i_L Ante las perturbaciones de carga y entrada propuestas en la Sección 2.2.2 se observó una afectación significativa en la corriente de carga I . Este hecho permite asumir también una variación en i_L y por tanto, regular i_L implica modificar apropiadamente I para mitigar los efectos de las perturbaciones en la potencia entregada hacia la carga.

A partir de la combinación de los instantes de conducción y no conducción del transistor en el convertidor de potencia elevador (ver Fig. 4), es posible formular el siguiente modelo promediado para la dinámica de sus variables ³²:

$$\begin{aligned}\frac{di_L}{dt} &= -\frac{(1-u)}{L}v_C + \frac{E}{L}; \\ \frac{dv_C}{dt} &= \frac{(1-u)}{C}i_L - \frac{v_C}{RC},\end{aligned}\tag{6}$$

siendo i_L la corriente del inductor (con inductancia L), v_C el voltaje en su capacitor (de capacitancia C), u el ciclo útil de su señal de actuación por modulación de ancho de pulso (PWM - Pulse Width Modulation) y E la tensión DC de suministro en la entrada.

Realizando linealización alrededor de los valores de equilibrio (según explicado en el Anexo 1) es posible obtener un modelo en función de transferencia para la relación entre i_L y u dado por:

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

siendo ΔI_L y ΔU desviaciones respecto a condiciones de régimen permanente. Reemplazando los valores para C , L , R y E sugeridos en el Capítulo 2 se tiene:

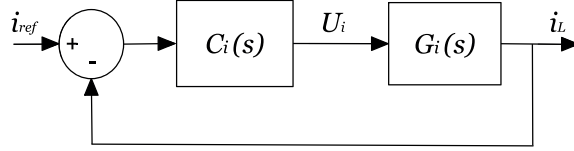
$$G_i(s) = \frac{10714.29(s + 2083.33)}{s^2 + 1041.67s + 446428.57},\tag{7}$$

como representación entrada-salida equivalente para el convertidor elevador en el esquema de regulación de corriente ilustrado en la Fig. 13, donde además:

$$C_i(s) = \frac{k_p s + k_i}{s}\tag{8}$$

representa la función de transferencia para un controlador PI.

Figura 13. Lazo para regulación de i_L



La determinación de los parámetros k_p y k_i del controlador, se realiza igualando el denominador de la función de transferencia del sistema controlado en lazo cerrado:

$$\frac{i_L}{i_{ref}} = \frac{C_i(s)G_i(s)}{1 + C_i(s)G_i(s)}, \quad (9)$$

calculado como:

$$s^3 + (1041.67 + 10714.29k_p)s^2 + (4.46 \times 10^5 + 10714.29k_i + 2.23 \times 10^7k_p)s + 2.23 \times 10^7k_i, \quad (10)$$

con un polinomio del mismo orden:

$$(s + \alpha)(s^2 + 2\zeta\omega_n s + \omega_n^2), \quad (11)$$

construido a partir de los parámetros ζ (12), ω_n (13) y α propuestos por Roa y Ayala en ³³.

$$\zeta = \frac{1}{\sqrt{\frac{\pi^2}{(\ln M_p)^2} + 1}} \quad (12)$$

³³ Gustavo Roa y Andruv Ayala. *Control en espacio de estados para un dron tipo cuadrotor*. Trabajo de grado (Ingeniero Electrónico). Bucaramanga, Colombia: Universidad Industrial de Santander, 2016.

$$\omega_n = \frac{4}{t_s \zeta} \quad (13)$$

Para asignar ζ y ω_n se consideraron características deseadas en la respuesta escalón dadas por: $M_p = 5\%$ y $t_s = 31 \text{ ms}$, como valores apropiados para una respuesta dinámica de corriente rápida y con poca sobre elongación. Por su parte, el valor de α se asignó de manera tal que las raíces obtenidas fueran estables según el criterio de *Routh-Hurwitz*, el define que todos los polos del sistema en lazo cerrado estén en el semiplano izquierdo.

A partir de ello, fue posible resolver el sistema de ecuaciones (10)-(11) para $\zeta = 0.69$, $\omega_n = 186.98 \text{ rad/s}$ y $\alpha = 662.86$, permitiendo obtener:

$$k_p = 0.0113, \quad k_i = 1.038.$$

Resultados de simulación en *PSIM* para el lazo de control configurado en la Fig. 13 se presentan en la Fig. 14 ante el escenario de perturbaciones considerado en la *Sección 2.2*. Como se observa, el sistema realimentado intenta mantener regulado el valor de corriente ante los cambios de carga respecto a un valor de referencia:

$$i_{ref} = \frac{V_c}{R(1 - \bar{u})} = \frac{120}{9.6(1 - 0.5)} = 25 \text{ [A]}, \quad (14)$$

correspondientes con la condición nominal deseada en estado estacionario (ver Anexo 1). Adicionalmente, es evidente que dicha referencia no puede mantenerse al momento de aplicarse cambios en la tensión de suministro E , justificando la necesidad de incorporar un lazo externo de voltaje. Todo lo anterior se consigue a partir de un esfuerzo de control no saturado en términos de los límites de rango para la señal de ciclo útil.

Figura 14. Respuesta temporal ante perturbaciones en R y E para lazo interno de corriente: (a) i_L , (b) U_i

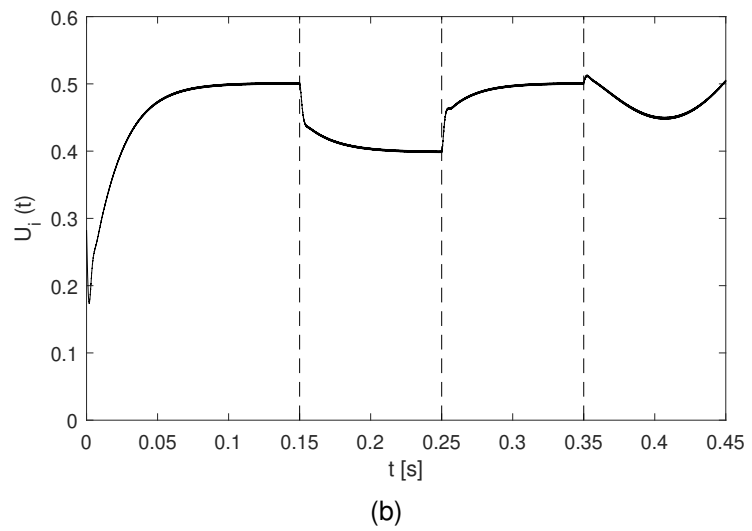
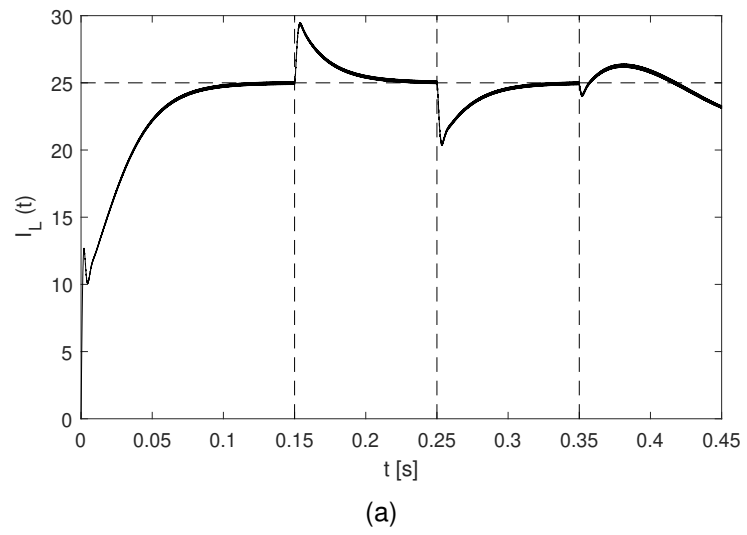
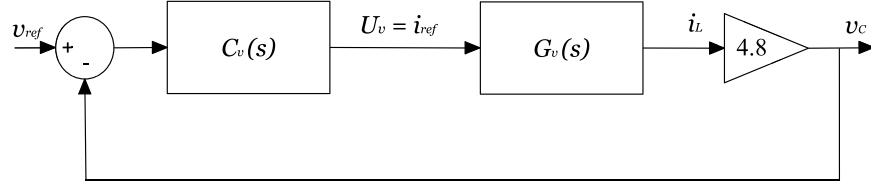


Figura 15. Lazo para regulación de v_C



3.1.2. Lazo de control para v_C Para regular la tensión de salida del circuito convertidor de potencia se configura el lazo de control ilustrado en la Fig. 15, siendo $G_v(s)$ la función de transferencia para el lazo de corriente previamente definida en (9) y que reemplazando valores puede escribirse como:

$$G_v(s) = \frac{121.07(s + 2083)(s + 97.19)}{(s + 36.63)(s^2 + 1126s + 6.692 \times 10^5)} \quad (15)$$

De otro lado, a partir de las condiciones de estado estacionario del sistema (ver Anexo 1), la relación entre i_L y v_C viene dada como:

$$\begin{aligned} \bar{i}_L &= \frac{\bar{v}_C}{R(1 - \bar{u})} \\ &= \frac{\bar{v}_C}{9.6 \times (1 - 0.5)} \\ &= \frac{\bar{v}_C}{4.8}, \end{aligned}$$

justificando el bloque de ganancia en cascada incluido en la trayectoria directa.

Ahora bien, siguiendo un procedimiento similar al ilustrado en la *Sección* anterior fue posible determinar los siguientes parámetros para el controlador PI:

$$k_p = -0.08, \quad k_i = 65.46,$$

asumiendo una respuesta escalón del sistema controlado con $M_p = 5\%$ y $t_s = 45ms$, como valores apropiados para una respuesta dinámica de voltaje en la carga suficientemente rápida y con poca variación en su transitorio inicial.

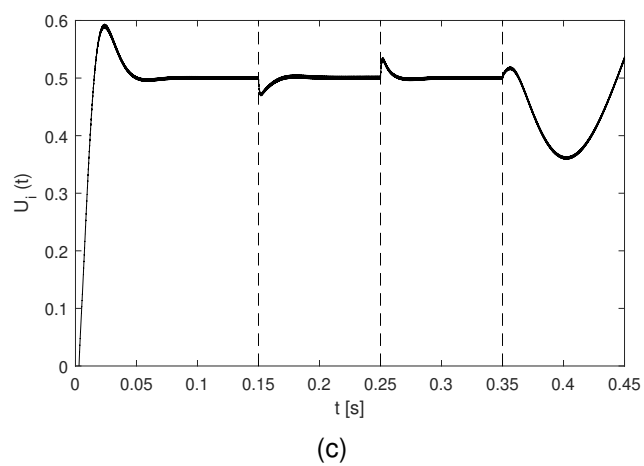
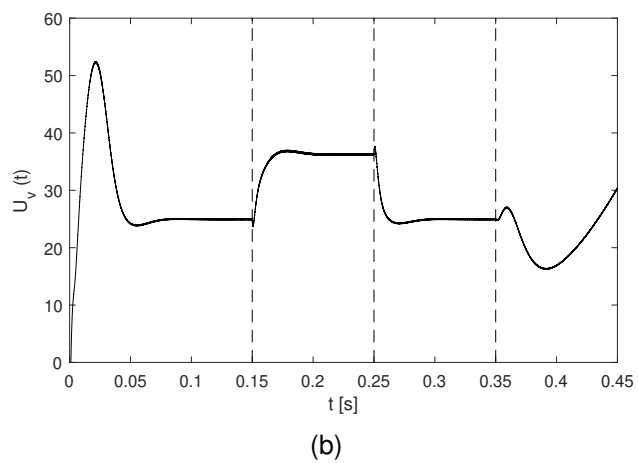
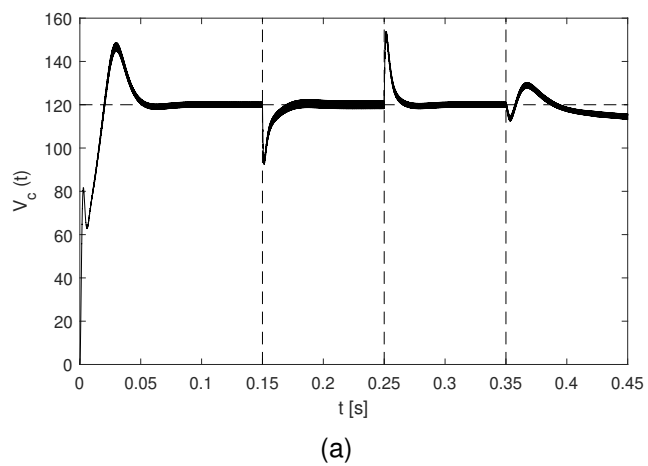
Resultados de simulación en *PSIM* para el lazo de control de voltaje se presentan en la Fig. 16 ante el escenario de perturbaciones considerado en la *Sección 2.2*. A partir de ello se observa que los niveles de tensión de salida en el circuito convertidor satisfacen el valor de referencia $v_{ref} = 120 [VDC]$ ante cambios de carga, siguiendo una dinámica satisfactoria en términos de los requerimientos del diseño. También es evidente que no existe saturación en la señal de control del lazo externo U_v ni tampoco en el esfuerzo de control interno U_i y que además dichas señales tienden a sus valores nominales en estado estacionario.

Sin embargo, es interesante notar la incapacidad de la configuración de doble lazo para corregir variaciones en la tensión de suministro E debido principalmente a que el controlador PI utilizado está concebido para tareas de regulación (i.e. perturbaciones de tipo escalón). El estudio de controladores PI para tareas de seguimiento supera el alcance del presente trabajo de grado. Se recomienda al lector interesado consultar literatura relacionada con los denominados *controladores resonantes*.

3.1.3. Control pre-droop Con el fin de abordar el efecto de la resistencia virtual en la regulación de las variables eléctricas a la salida del convertidor se emplea término *pre-droop*, puesto que no se puede hablar de un reparto de potencias con un sólo generador.

De acuerdo con lo anterior y, retomando las ideas expuestas en la *Sección 3.1.4* se puede considerar un circuito convertidor de potencia con desviación máxima de tensión en el bus $\Delta V = 3 [V]$, potencia máxima de entrada $P_\sigma = 1500 [W]$ y vol-

Figura 16. Respuesta temporal ante perturbaciones en R y E para lazo externo de voltaje: (a) v_C , (b) U_v , (c) U_i



taje mínimo $V_\sigma = 117 [V]$. A partir de la expresión (4) su resistencia *droop* puede calcularse como:

$$R_d = \frac{3 \times 117}{1500} = 0.234 [\Omega]. \quad (16)$$

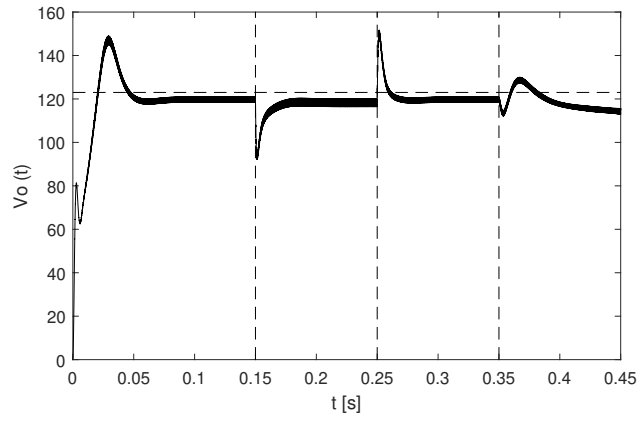
La configuración del lazo de control presentado previamente en la Fig. 11 con el valor de resistencia apenas calculado y para los lazos de corriente y voltaje sintonizados, permite obtener los resultados de simulación en PSIM presentados en la Fig. 17.

De ellos, se observa cómo el voltaje V_o de salida en el convertidor alcanza el valor deseado para el voltaje de bus $V = 120 [V]$, cuando la referencia $\bar{V}_o$ del lazo se elige en un valor mayor que compensa la caída virtual en la resistencia *droop* (ver Fig. 18(a)). Para el caso particular considerado, asumiendo $\Delta V = 3 [V]$ este voltaje corresponde con $\bar{V}_o = 123 [V]$ y así la corriente que circula en la salida del convertidor debe corresponder con $\Delta V / R_d = 12.82 [A]$ tal y como se verifica de los resultados en estado estacionario para la Fig. 18(b). Finalmente, la Fig. 18(c) corrobora el suministro de potencia en la carga a pesar de sus alteraciones nominales.

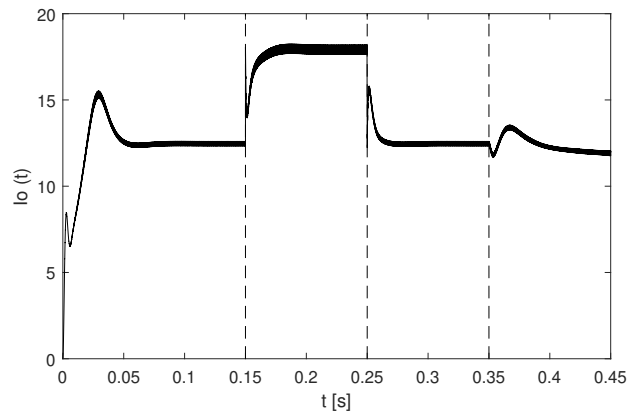
3.1.4. Lazo de control *droop* Empleando como base el análisis denominado control *pre-droop*, considere dos generadores configurados como en la Fig. 12 para realizar un despacho de potencias con las siguientes proporciones: 53.33 % y 46.67 %, lo cual para una potencia nominal de $P = 1500 [W]$ corresponde con $P_{\sigma 1} = 800 [W]$ y $P_{\sigma 2} = 700 [W]$, respectivamente.

De esta manera, ante $\Delta V = 3 [V]$ y $V_\sigma = 117 [V]$ las resistencias *droop* correspon-

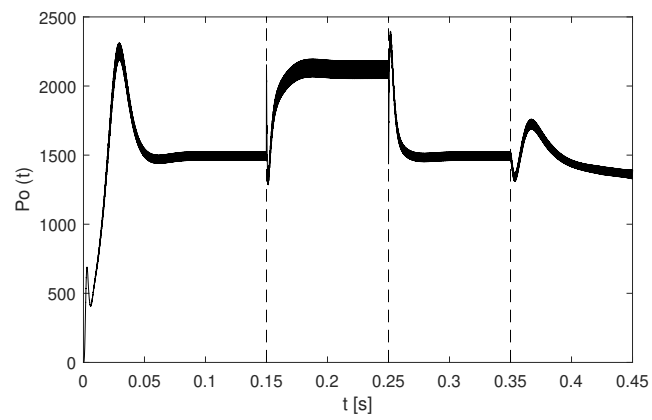
Figura 17. Resultados de simulación para control *pre-droop* en R



(a)



(b)



(c)

dientes pueden calcularse de (4) como:

$$\begin{aligned} R_{d1} &= \frac{3 \times 117}{800} \\ &= 0.4387 [\Omega]; \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} R_{d2} &= \frac{3 \times 117}{700} \\ &= 0.5014 [\Omega]. \end{aligned}$$

A partir de ello, la Fig. 19 muestra resultados de simulación en PSIM para la distribución de corrientes y potencias realizada entre ambos generadores mediante el esquema *droop*, de lo cual se aprecia la tendencia complementaria de las curvas para aportar en sus justas proporciones valores que permitan satisfacer las condiciones nominales de operación del sistema.

El intervalo más interesante de las curvas se muestra a partir de $t = 0.35[s]$ donde se aplica la variación de la tensión de suministro en el *Generador 1*. La Fig. 18 muestra el perfil de simulación, se agregó más tiempo de simulación intentando reflejar una situación extrema en la cual dicha variación alcanzara valores mínimos, notándose por tanto una mayor actividad de los generadores para compensar las variaciones de tensión en la fuente.

Precisamente, la superposición para estas contribuciones individuales se presenta en la Fig. 20, donde se observa que a pesar de las variaciones, los valores nominales de voltaje, corriente y potencia se preservan en la carga. De esta manera se verifica, no solamente la efectividad de la estructura de control jerárquico implementada en términos de su comportamiento dinámico, sino también a partir de la distribución energética entre generadores para satisfacer una demanda uniforme de

Figura 18. Perfil de simulación

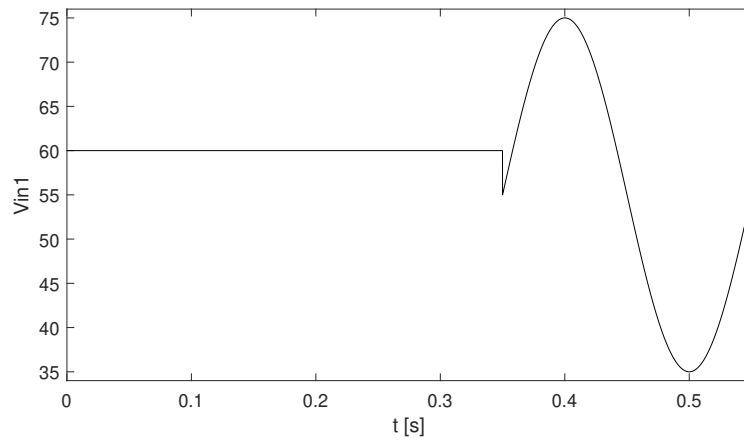
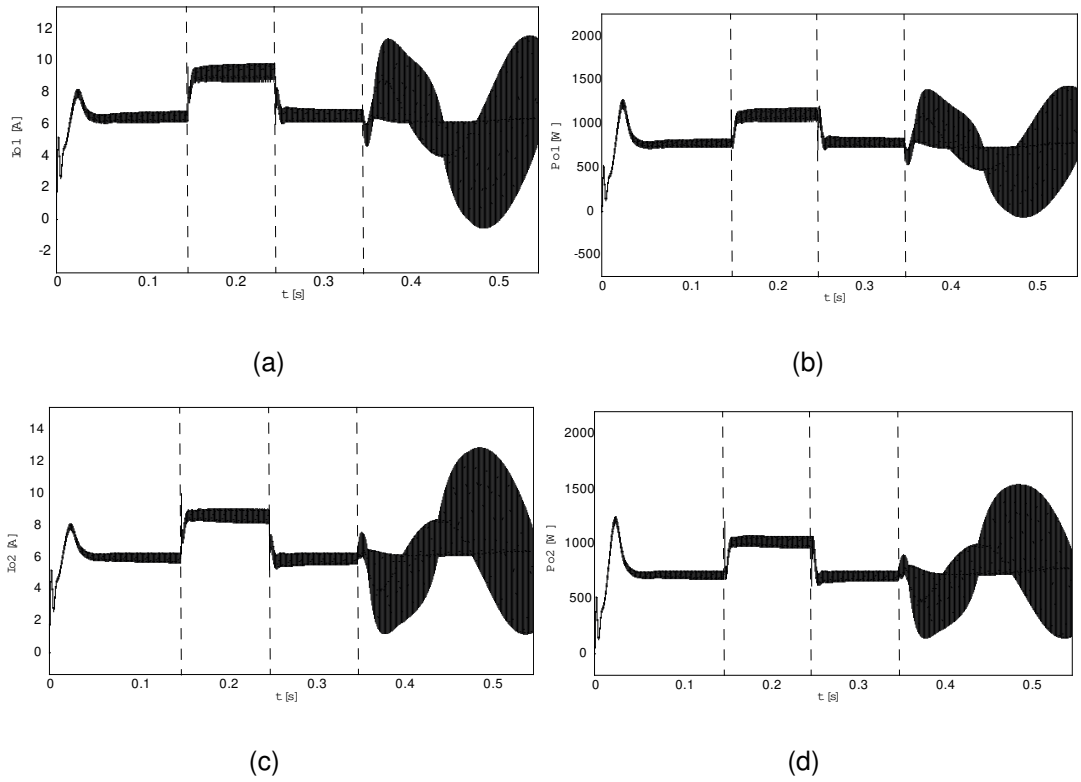


Figura 19. Distribución de corrientes y potencias ante control *droop*: (a)-(b) Generador 1, (c)-(d) Generador 2



energía a pesar de las alteraciones del entorno.

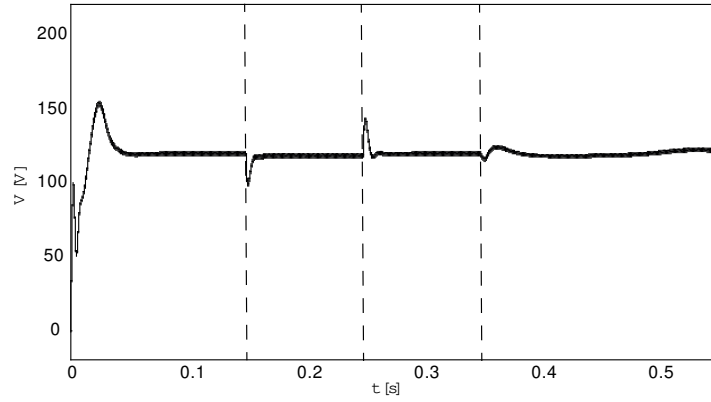
Esta última observación es importante en el contexto del caso de ejemplo considerado en la *Sección 2.2* para dimensionar la microrred, puesto que proveer de carga a una batería de automovil en una zona no interconectada requiere una inyección de flujo de potencia uniforme a pesar de eventuales modificaciones debidas a la conexión simultánea de varios vehículos y/o cambios climáticos que alteren la generación en unidades fotovoltaicas.

También es importante mencionar que el valor de referencia del lazo *droop* se puede controlar mediante el denominado *control secundario*, permitiendo variar las proporciones de potencia entre generadores con base en criterios como puede ser el costo en una estrategia de *despacho económico* ³⁴.

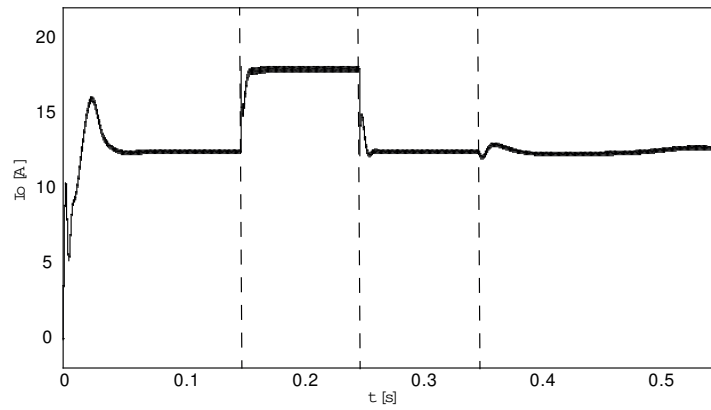
El esquema circuital para el control droop simulado en PSIM se presenta en la Fig. 21, mientras que el detalle de los bloques correspondientes a las realizaciones del control en cascada para el circuito convertidor de potencia y el lazo *droop* se presentan en la Fig. 22.

³⁴ Diana M. Hernández Vargas. *Despacho económico y su aplicación en microrredes eléctricas*. Trabajo de grado (Ingeniero Electricista). Bucaramanga, Colombia: Universidad Industrial de Santander. Facultad de Ingenierías Físico-Mecánicas. Escuela de ingenierías Eléctrica, Electrónica y Telecomunicaciones, 2019.

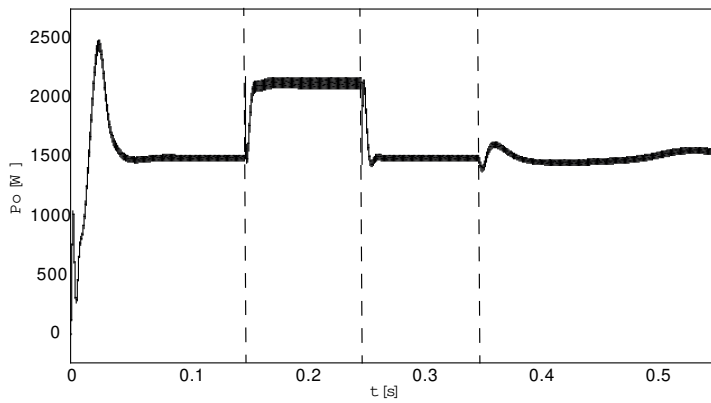
Figura 20. Comportamiento temporal de magnitudes eléctricas en R ante control *droop*: (a) $V(t)$, (b) $I(t)$ y (c) $P(t)$



(a)



(b)



(c)

Figura 21. Realización circuital para microrred aislada, en lazo cerrado controlado

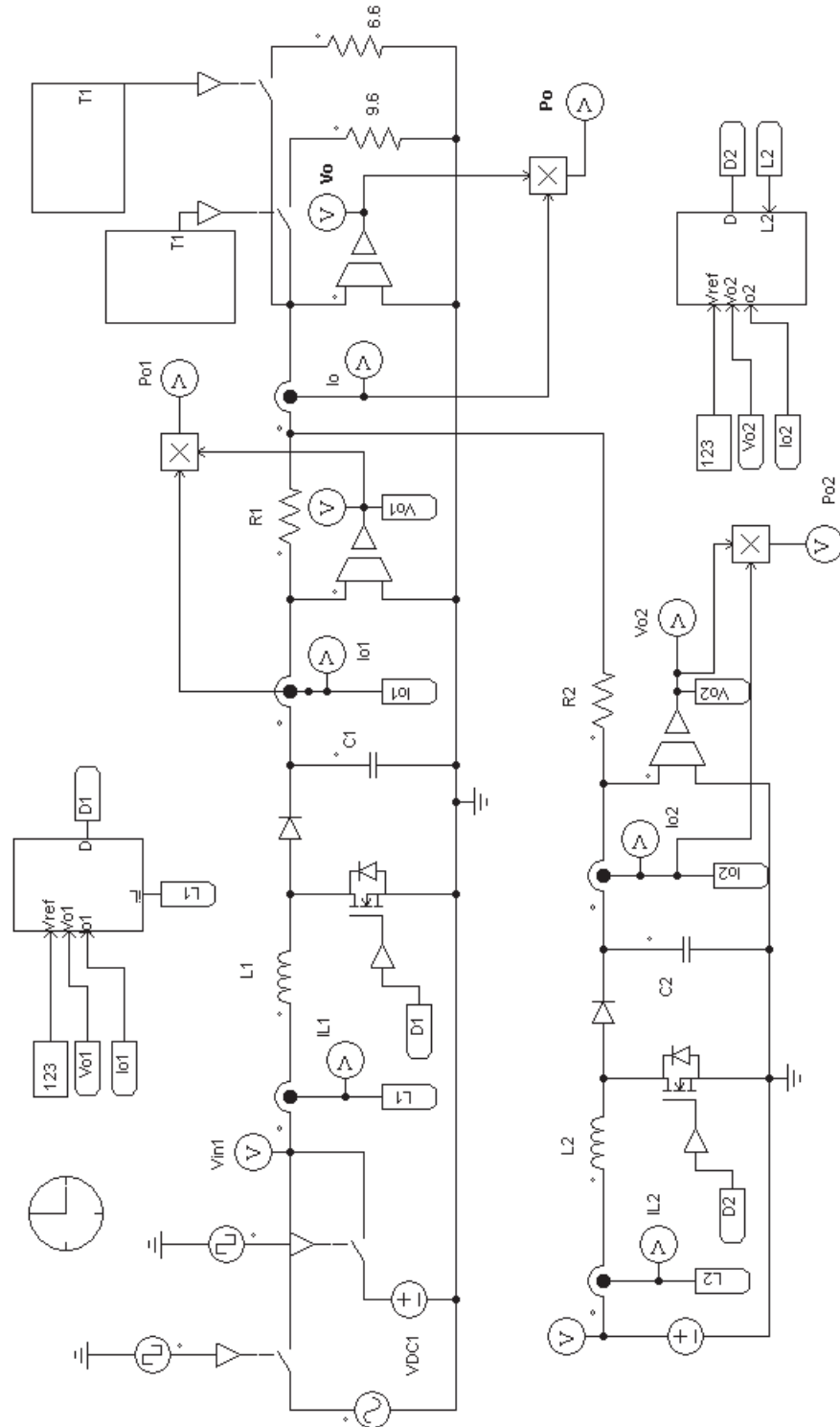
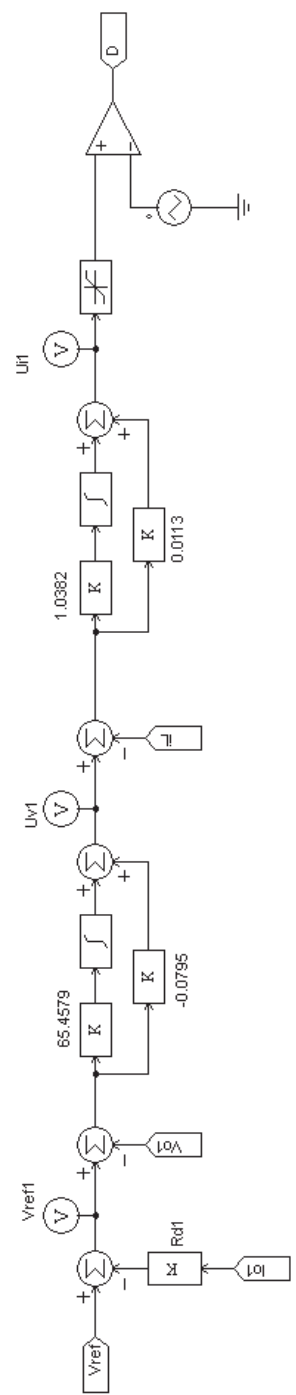


Figura 22. Realización en PSIM para control jerárquico droop más doble lazo en cascada



4. RECOMENDACIONES

Como recomendación derivada tras la realización del presente trabajo de grado, se sugiere realizar una verificación de la estabilidad de los lazos PI diseñados mediante métodos convencionales basados en el modelo, pues los cálculos preliminares realizados no presentaban un desempeño favorable, lo cual fue explicado y corregido a través de un análisis del criterio de *Routh-Hurwitz*.

5. TRABAJO FUTURO

Como trabajo futuro se propone el análisis de *controladores resonantes* para corregir las desviaciones de la tensión de suministro y el diseño e implementación de una estrategia de control *droop* para generadores en AC.

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 una estrategia de control *droop* aplicada a una *microrred* DC simple, empleando como base un circuito convertidor de potencia elevador regulado a partir de una estructura de control en cascada, complementada por un lazo *droop* para efectuar el reparto de potencias entre dos generadores sometidos a perturbaciones de carga y variaciones en la tensión de suministro, a manera de modelo simplificado para una estación de carga de vehículos eléctricos en zonas aisladas.

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 *droop*. Tal y como fue abordado en la *Sección 2.2*, se consideró una estación de carga para vehículos eléctricos en una zona no interconectada de Colombia con potencial solar de 1.5 kW y un módulo de

almacenamiento por baterías de capacidad nominal similar. La configuración para la microrred aislada diseñada se presenta en la Fig. 3 y su realización circuital en lazo abierto en la Fig. 4.

- Se diseñó y aplicó la técnica de control *droop* sobre la *microrred* en un entorno de simulación. En particular, el *Capítulo 3* fue dedicado a la estructuración de una estrategia de control jerárquico, donde inicialmente se configuró el control en cascada para la regulación de las variables eléctricas de un circuito convertidor de potencia elevador (*Secciones 3.1.1 y 3.1.2*), que posteriormente fue nivelado en términos de una resistencia virtual mediante el denominado control pre-*droop* (*Sección 3.1.3*), para finalmente ser acoplado en paralelo con otra estructura similar en la topología *droop* formal y estricta abordada en la *Sección 3.1.4*.
- Se analizó la operación del sistema controlado bajo el esquema *droop* ante cambios en los valores de suministro y/o los perfiles de carga. Inicialmente, se definió un escenario de simulación en PSIM para el sistema considerando alteraciones en los valores nominales de la carga y de la tensión de suministro al circuito convertidor de potencia (ver *Sección 2.2.2*). Este escenario fue analizado en las configuraciones de lazo de control de corriente, de voltaje, pre-*droop* y finalmente *droop*. La Fig. 19 ilustra la distribución de corrientes y potencias para cada generador ante el control *droop* mientras que la Fig. 20 muestra el comportamiento temporal de magnitudes eléctricas en la resistencia de carga, permitiendo evidenciar un suministro constante de potencia.

BIBLIOGRAFÍA

- Alzate, R. y col. "Double-loop control design for boost converters based on frequency response data". En: *20th World Congress of the international federation of automatic control (IFAC)*. 2017 (vid. págs. 39, 40).
- Archila Valderrama, John Edinson. *Implementación de un convertidor SEPIC para el seguimiento del punto de máxima potencia en sistemas fotovoltaicos*. Tesis de Maestría (Magister en Ingeniería Electrónica). Bucaramanga, Colombia: Universidad Industrial de Santander, 2016 (vid. pág. 21).
- Barrera Lobo, Felipe Andrés. *Control primario con pendiente variable aplicado en microrredes aisladas*. Trabajo de Grado (Ingeniero Civil Eléctrico). Santiago de Chile: Universidad de Chile, Facultad de Físicas y Matemáticas, Departamento de Ingeniería Eléctrica, 2016 (vid. pág. 15).
- Blasi, Bronson Richard. *DC microgrids: review and applications*. Tesis de Maestría (Magister en Ciencias). Manhattan, Kansas - USA: Kansas State University, College of Engineering, Master of Science, 2013 (vid. pág. 25).
- Caballero, Juan Carlos y Juan Darío Acosta. *Lógica para cambio de estado de operación Isochronous/Droop de dos turbogeneradores de una red de autogeneración propietaria con conexión al sistema interconectado nacional (SIN) según el estado de los interruptores de las líneas de transmisión o distribución asociadas*. Monografía (Especialista en Sistemas de Distribución de Energía Eléctrica). Bucaramanga, Colombia: Universidad Industrial de Santander, 2016 (vid. pág. 21).

Cuchimaque, Leidy Johana y Ana María Montagut. *Caracterización de acumuladores de energía en el ámbito de micro redes inteligentes*. Trabajo de grado (Ingeniera Electrónica y Electricista). Bucaramanga, Colombia: Universidad Industrial de Santander, 2014 (vid. pág. 21).

Gaona García, Elvis Eduardo, César Leonardo Rodríguez Trujillo y Herbert Enrique Rojas Cubides. “Infraestructura de comunicaciones en microrredes eléctricas”. En: *Revista Electrónica Redes de Ingeniería* 5.2 (2014), págs. 28-38 (vid. pág. 19).

García Arbeláez, C. y col. *El acuerdo de París: Así actuará Colombia frente al cambio climático*. Cali: WWF - Colombia, 2016 (vid. pág. 15).

Garzón Yusti, Daniel. *Operación y control de sistemas HVDC multiterminal*. Trabajo de Grado (Ingeniería Eléctrica). Pereira, Colombia: Universidad Tecnológica de Pereira, Programa de Ingeniería Eléctrica, 2015 (vid. pág. 20).

Guerrero Torres, Fernando. *Estudio de la operación de las microrredes con convertidores back to back*. Trabajo de Grado (Ingeniero Electricista. Santiago de Cali, Colombia: Universidad Autónoma de Occidente, Facultad de Ingeniería, Departamento de Energética y Mecánica, 2016 (vid. pág. 19).

Hatziargyriou, Nikos. *Microgrids: architectures and control*. John Wiley & Sons, 2014 (vid. págs. 16, 24, 25).

Hernández, Oscar Mauricio y Camilo Andrés Sanabria. *Diseño y prueba de inversores independientes con capacidad de conexión en paralelo para alimentar cargas lineales y no lineales*. Tesis de Maestría (Magister en Ingeniería Electrónica).

Santafé de Bogotá, Colombia: Pontificia Universidad Javeriana, Facultad en Ingeniería, Maestría en Ingeniería Electrónica., 2013 (vid. pág. 20).

Hernández Vargas, Diana M. *Despacho económico y su aplicación en microrredes eléctricas*. Trabajo de grado (Ingeniero Electricista). Bucaramanga, Colombia: Universidad Industrial de Santander. Facultad de Ingenierías Físico-Mecánicas. Escuela de ingenierías Eléctrica, Electrónica y Telecomunicaciones, 2019 (vid. pág. 52).

Lu, Xiaonan 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. 19).

Mantilla Villalobos, María Alejandra. "Control de generadores fotovoltaicos con funciones de filtrado activo en sistemas trifásicos distorsionados y desequilibrados". Doctor en Ingeniería Área Ingeniería Electrónica. Universidad Industrial de Santander, Facultad de Ingenierías Físico-Mecánicas, 2016 (vid. pág. 21).

Medina, Ricardo David. "Microrredes basadas en electrónica de potencia: parte II: control de potencia activa y reactiva". En: *Ingenius* 12 (2014), págs. 24-34 (vid. pág. 20).

Mendoza, Nasser y John Pardo. *Convertidor directo de potencia aplicado a inversores trifásicos conectados a la red*. Trabajo de grado (Ingeniero Electricista). Bucaramanga, Colombia: Universidad Industrial de Santander, 2013 (vid. pág. 21).

Morales Rodríguez, Jairo Andrés. *Operación y control de micro-redes operando en modo aislado*. Trabajo de Grado (Ingeniería Eléctrica. Pereira, Colombia: Uni-

versidad Tecnológica de Pereira, Programa de Ingeniería Eléctrica, 2015 (vid. pág. 19).

Muñoz Moreno, Ignacio Javier. *Modelo y control de un sistema híbrido PV-Eólico para una micro-red eléctrica DC*. Tesis de Maestría (Magister en Ingeniería Electrónica). Santafé de Bogotá, Colombia: Pontificia Universidad Javeriana, Facultad de Ingeniería, Departamento de Ingeniería Electrónica, 2015 (vid. pág. 20).

Osorio Silva, Fausto. *Control de sistema fotovoltaico conectado a la red trifásica considerando inversor multinivel con diodos anclados al neutro*. Tesis de Maestría (Magister en Ingeniería Electrónica). Bucaramanga, Colombia: Universidad Industrial de Santander, 2017 (vid. pág. 21).

Pereira Henrique, Douglas. *Análise de um controlador Drop de potência integrado ao controle em modo conectado de um inversor de tensão trifásico balanceado*. Trabajo de grado (Graduação em Engenharia Elétrica com ênfase em Sistemas de Energia e Automação). São Carlos, Brasil: Escola de Engenharia de São Carlos da Universidade de São Paulo, 2017 (vid. pág. 19).

Planas, Estefanía 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. 16).

Planas Fullaondo, Estefanía. "Aportaciones al diseño del control jerárquico de micro-redes eléctricas". Ph.D. Departamento de Tecnología Electrónica. Universidad del País Vasco, Escuela Técnica Superior de Ingeniería de Bilbao, 2013 (vid. págs. 16, 19).

- Rashid, Mohammad H. *Electrónica de potencia, circuitos, dispositivos y aplicaciones*. Vol. 2. Prentice-Hall Inc., 2001 (vid. págs. 28, 29).
- Rizqiawan, Arwindra 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. 36, 37).
- Roa, Gustavo y Andruv Ayala. *Control en espacio de estados para un dron tipo cuadrotor*. Trabajo de grado (Ingeniero Electrónico). Bucaramanga, Colombia: Universidad Industrial de Santander, 2016 (vid. pág. 42).
- Sadiku, Matthew Alexander. *Fundamentos de circuitos eléctricos*. Vol. 5. McGraw-Hill, 2006 (vid. pág. 27).
- Tayab, Usman Bashir y col. "A review of droop control techniques for microgrid". En: *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 76 (2017), págs. 717-727 (vid. pág. 19).
- Torres Pinzón, Carlos Andrés. *Sistemas distribuidos para el control del modo de operación en micro-redes inteligentes basados en técnicas multiAgente*. Propuesta de Investigación. Santafé de Bogotá, Colombia: Universidad Santo Tomas, Programa de Ingeniería Electrónica, 2016 (vid. pág. 20).
- Vargas, Lady y Sergio Rodriguez. *Convertidor DC/DC dual intercalado para aplicaciones en sistemas fotovoltaicos*. Trabajo de grado (Ingeniero Electricista). Bucaramanga, Colombia: Universidad Industrial de Santander, 2017 (vid. pág. 21).

Yu, Seung-Yeong y col. "SoC-based output voltage control for BESS with a lithium-ion battery in a stand-alone DC microgrid". En: *Energies* 9 (2016), págs. 924-939 (vid. págs. 33, 35).

ANEXOS

Anexo A. Modelo linealizado para el convertidor elevador

El modelo dinámico para un circuito convertidor de potencia elevador puede ser escrito como:

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

constituyendo un sistema no lineal con respecto a la entrada u del ciclo útil de conmutación (modulado en ancho de pulso).

Para obtener una representación del sistema en función de transferencia debe hacerse uso de la serie de *Taylor*:

$$f(x) = \sum_{n=0}^{\infty} \frac{f^{(n)}(a)}{n!} (x-a)^n,$$

que truncada al término de primer orden, para el caso bivariado, corresponde con:

$$f(x, u) = f(\bar{x}, \bar{u}) + \left. \frac{\partial f}{\partial x} \right|_{\bar{x}, \bar{u}} (x - \bar{x}) + \left. \frac{\partial f}{\partial u} \right|_{\bar{x}, \bar{u}} (u - \bar{u}).$$

Donde $\bar{x}$ y $\bar{u}$ corresponden con los valores nominales del sistema.

Ahora bien, seleccionando como variables de estado:

$$x_1 = i_L, \quad x_2 = v_C,$$

la representación en el espacio de estados para el modelo dinámico del circuito

puede escribirse como:

$$\begin{aligned}\dot{x}_1 &= \frac{E}{L} - \frac{(1-u)}{L}x_2 \\ \dot{x}_2 &= \frac{(1-u)}{C}x_1 - \frac{x_2}{RC},\end{aligned}$$

y su expansión en serie de *Taylor* truncada:

$$\begin{bmatrix} \dot{x}_1 \\ \dot{x}_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{d}{dx_1}\dot{x}_1 & \frac{d}{dx_2}\dot{x}_1 \\ \frac{d}{dx_1}\dot{x}_2 & \frac{d}{dx_2}\dot{x}_2 \end{bmatrix} \bigg|_{\bar{x}_1, \bar{x}_2, \bar{u}} \begin{bmatrix} x_1 - \bar{x}_1 \\ x_2 - \bar{x}_2 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \frac{d}{du}\dot{x}_1 \\ \frac{d}{du}\dot{x}_2 \end{bmatrix} \bigg|_{\bar{x}_1, \bar{x}_2, \bar{u}} [u - \bar{u}],$$

tomando en cuenta que por definición $(\dot{\bar{x}}_1, \dot{\bar{x}}_2) = f(\bar{x}_1, \bar{x}_2, \bar{u}) = (0, 0)$.

A partir de esta última expresión es posible calcular los valores de equilibrio como sigue:

$$\begin{aligned}\frac{E}{L} - \frac{(1-\bar{u})}{L}\bar{x}_2 &= 0 \quad \Rightarrow \quad \bar{x}_2 = \frac{E}{1-\bar{u}} \\ \frac{(1-\bar{u})}{C}\bar{x}_1 - \frac{\bar{x}_2}{RC} &= 0 \quad \Rightarrow \quad \bar{x}_1 = \frac{\bar{x}_2}{R(1-\bar{u})},\end{aligned}$$

y por tanto:

$$\begin{aligned}\begin{bmatrix} \dot{x}_1 \\ \dot{x}_2 \end{bmatrix} &= \begin{bmatrix} 0 & \frac{-(1-\bar{u})}{L} \\ \frac{(1-\bar{u})}{C} & -\frac{1}{RC} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_1 - \bar{x}_1 \\ x_2 - \bar{x}_2 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \frac{\bar{x}_2}{L} \\ -\frac{\bar{x}_1}{C} \end{bmatrix} [u - \bar{u}] \\ \begin{bmatrix} \dot{\tilde{x}}_1 \\ \dot{\tilde{x}}_2 \end{bmatrix} &= \begin{bmatrix} 0 & \frac{-(1-\bar{u})}{L} \\ \frac{(1-\bar{u})}{C} & -\frac{1}{RC} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \tilde{x}_1 \\ \tilde{x}_2 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \frac{\bar{x}_2}{L} \\ -\frac{\bar{x}_1}{C} \end{bmatrix} [\tilde{u}] \\ &= \mathbf{A}\tilde{\mathbf{x}} + \mathbf{B}\tilde{\mathbf{u}},\end{aligned}$$

tras definir la siguiente notación en términos de desviaciones alrededor de los valores de equilibrio: $\tilde{x}_1 = x_1 - \bar{x}_1$, $\tilde{x}_2 = x_2 - \bar{x}_2$ y $\tilde{u} = u - \bar{u}$.

De esta manera, asumiendo como salida a la corriente del inductor:

$$\begin{aligned} y &= \begin{bmatrix} 1 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \tilde{x}_1 \\ \tilde{x}_2 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 \end{bmatrix} [\tilde{u}] \\ &= \mathbf{C}\tilde{\mathbf{x}} + \mathbf{D}\tilde{\mathbf{u}}, \end{aligned}$$

la función de transferencia puede obtenerse evaluando la expresión:

$$\begin{aligned} G(s) &= \frac{\tilde{I}_L(s)}{\tilde{U}(s)} \\ &= \mathbf{C}(\mathbf{sI} - \mathbf{A})^{-1}\mathbf{B} + \mathbf{D}, \end{aligned}$$

para obtener:

$$G(s) = \frac{E(CRs + (1 + 2\bar{u}))}{RLCs^2 + Ls + R(1 - \bar{u})^2}.$$