



UNIVERSIDAD UTE

**FACULTAD DE CIENCIAS DE LA INGENIERÍA E
INDUSTRIAS CARRERA DE INGENIERÍA
MECATRÓNICA**

**MODELADO Y SIMULACIÓN DEL COMPORTAMIENTO
DINÁMICO DE LA SMART GRID LAB VOLT 46801-32.**

**TRABAJO PREVIO A LA OBTENCIÓN DEL TÍTULO
DE INGENIERO EN MECATRÓNICA**

WASHINGTON ADRIAN LUDEÑA PRIETO

DIRECTOR: ING. PABLO VELARDE. PhD.

Quito, septiembre 2019

© Universidad UTE 2019.
Reservados todos los derechos de reproducción

FORMULARIO DE REGISTRO BIBLIOGRÁFICO PROYECTO DE TITULACIÓN

DATOS DE CONTACTO	
CÉDULA DE IDENTIDAD:	172287178-5
APELLIDO Y NOMBRES:	LUDEÑA PRIETO WASHINGTON ADRIAN
DIRECCIÓN:	Santa Anita 2, Pasaje S13C y Oe5X, lote 20
EMAIL:	walp1@hotmail.es
TELÉFONO FIJO:	023101110
TELÉFONO MOVIL:	0987889956

DATOS DE LA OBRA	
TÍTULO:	MODELADO Y SIMULACIÓN DEL COMPORTAMIENTO DINÁMICO DE LA SMART GRID LAB VOLT 46801-32
AUTOR O AUTORES:	WASHINGTON ADRIAN LUDEÑA PRIETO
FECHA DE ENTREGA DEL PROYECTO DE TITULACIÓN:	15/09/2019
DIRECTOR DEL PROYECTO DE TITULACIÓN:	PhD. PABLO VELARDE
PROGRAMA	PREGRADO <input checked="" type="checkbox"/> POSGRADO <input type="checkbox"/>
TÍTULO POR EL QUE OPTA:	INGENIERO MECATRÓNICO
RESUMEN: Mínimo 250 palabras	<p>La generación y suministro de energía eléctrica se ha vuelto indispensable en el desarrollo de la sociedad. La población se encuentra en constante crecimiento y el aumento de la demanda energética. La generación distribuida y las redes eléctricas inteligentes se presentan como una alternativa a las formas convencionales de generación considerando el incremento de las necesidades de energía eléctrica de sus clientes. El uso de energías renovables no convencionales como la solar, eólica, biomasa entre otras; en conjunto con sistemas de almacenamiento de energía permiten mitigar la creciente demanda eléctrica y disminuir el uso de combustibles con origen fósil. Una microrred es una red de generación eléctrica que puede aprovechar varias fuentes de energía renovables, para satisfacer la demanda del consumidor trabajando en conjunto con la red centralizada o autónomamente. El problema de control en una microrred es satisfacer la demanda de electricidad en condiciones económicas y óptimas a pesar de las</p>

incertidumbres y las perturbaciones que podrían aparecer en estos procesos. Los modelos matemáticos disponibles representan la dinámica principal y la carga de estos sistemas. El presente trabajo tuvo como objetivo modelar el comportamiento eléctrico de los diferentes subsistemas de la microrred de generación eléctrica en diferentes condiciones y sus resultados con la finalidad de conocer su dinámica, aporte y uso como una forma óptima de gestión de la energía eléctrica. El modelo matemático se obtuvo siguiendo un compromiso de simplicidad y precisión, ignorando ciertas propiedades físicas del sistema, teniendo así, un modelo sencillo y a la vez útil como base para el diseño de controladores. Se realizaron simulaciones que validaron el modelo propuesto de los elementos del sistema por separado, y del sistema en conjunto.

PALABRAS CLAVES:

Energía Renovable, microrred, gestión de energía, electricidad.

ABSTRACT:

The generation and supply of electricity has become indispensable in the development of society. The population is constantly growing and energy demand is increasing. Distributed generation and smart power grids are presented as an alternative to conventional forms of generation considering the increase in the electricity needs of its customers. The use of unconventional renewable energies such as solar, wind, biomass among others; in conjunction with energy storage systems, they can mitigate the growing electricity demand and reduce the use of fossil fuels. A microgrid is a power generation network that can use several renewable energy sources, in order to satisfy consumer's demand, working together with the network centrally or autonomously. The control's problem in a microgrid is to satisfy the demand of electricity in economic and optimal conditions despite the uncertainties and disturbances that could appear in these processes. The available mathematical models represent the main dynamics and the charge of these systems. This work aimed to model the electrical behavior of the different subsystems of the microgrid of electricity generation in different conditions and their results in order to know their dynamics, contribution and use

	The mathematical model was obtained following a compromise of simplicity and precision, ignoring some physical properties of the system, thus having a simple and at the same time useful model as base for controller design. Simulations were performed that validated the proposed model of the system elements separately, and of the system as a unit.
KEYWORDS	Renewable energy, energy management, electricity, micro grid.

Se autoriza la publicación de este Proyecto de Titulación en el Repositorio Digital de la Institución.



Washington Adrian Ludeña Prieto

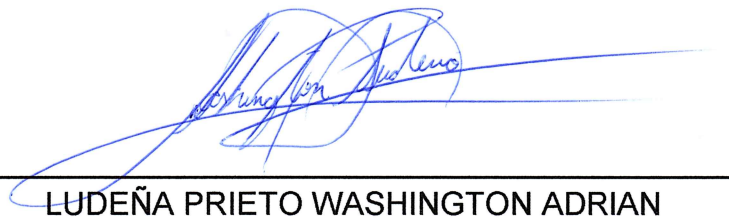
C.I. 172287178-5

DECLARACIÓN Y AUTORIZACIÓN

Yo, **LUDEÑA PRIETO WASHINGTON ADRIAN**, CI 172287178-5 autor del proyecto titulado: **MODELADO Y SIMULACIÓN DEL COMPORTAMIENTO DINÁMICO DE LA SMART GRID LAB VOLT 46801-32** previo a la obtención del título de **INGENIERO EN MECATRÓNICA** en la Universidad UTE.

1. Declaro tener pleno conocimiento de la obligación que tienen las Instituciones de Educación Superior, de conformidad con el artículo 144 de la Ley Orgánica de Educación Superior, de entregar a la SENESCYT en formato digital una copia del referido trabajo de graduación para que sea integrado al Sistema Nacional de información de la Educación Superior del Ecuador para su difusión pública respetando los derechos de autor.
2. Autorizo a la BIBLIOTECA de la Universidad UTE a tener una copia del referido trabajo de graduación con el propósito de generar un Repositorio que democratice la información, respetando las políticas de propiedad intelectual vigentes.

Quito, 25 de septiembre de 2019



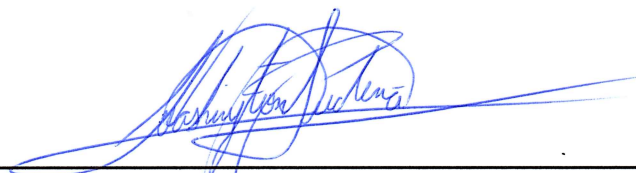
LUDEÑA PRIETO WASHINGTON ADRIAN

172287178-5

DECLARACIÓN

Yo, **WASHINGTON ADRIAN LUDEÑA PRIETO**, declaro que el trabajo aquí descrito es de mi autoría; que no ha sido previamente presentado para ningún grado o calificación profesional; y, que he consultado las referencias bibliográficas que se incluyen en éste documento.

La Universidad UTE puede hacer uso de los derechos correspondientes a este trabajo, según lo establecido por la Ley de Propiedad Intelectual, por su Reglamento y por la normativa institucional vigente.

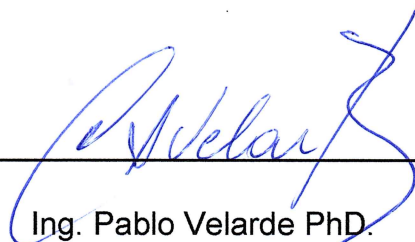


Washington Adrian Ludeña Prieto

C.I. 172287178-5

CERTIFICACIÓN

Certifico que el presente trabajo que lleva por título "**Modelado y simulación del comportamiento dinámico de la smart grid lab volt 46801-32**", que, para aspirar al título de **Ingeniero en Mecatrónica** fue desarrollado por **Washington Adrian Ludeña Prieto**, bajo mi dirección y supervisión, en la Facultad de Ciencias de la ingeniería e Industrias; y cumple con las condiciones requeridas por el reglamento de Trabajos de Titulación artículos 19, 27 y 28.



Ing. Pablo Velarde PhD.
DIRECTOR DEL TRABAJO
C.I. 1718907478

DEDICATORIA

El presente trabajo va dedicado a mis padres, por su sacrificio, esfuerzo y apoyo durante mi formación, y han sido un ejemplo a seguir para el desarrollo de mi vida profesional.

A mis familiares y seres queridos, con quienes he compartido conocimientos, emociones y experiencias que me han ayudado a perseverar y culminar esta etapa de mi vida.

AGRADECIMIENTOS

A mis padres por impulsarme a cumplir con mis metas, gracias a ellos por confiar, creer en mí, por sus consejos, valores y principios que me han permitido crecer como profesional y como ser humano.

A mis maestros, que me entregaron los conocimientos necesarios para poder formarme profesionalmente; A mi director, Pablo Velarde, por su apoyo y contribución para alcanzar con esta meta.

ÍNDICE DE CONTENIDOS

	PÁGINA
RESUMEN	1
ABSTRACT	2
1. INTRODUCCIÓN.....	3
2. METODOLOGÍA Y DISEÑO	9
2.1. DESCRIPCIÓN DE COMPONENTES DEL SISTEMA LAB VOLT	11
2.1.1. MÓDULO SOLAR FOTOVOLTAICO	12
2.1.1. LÁMPARA REFLECTORA DE AC (SIMULADOR SOLAR)	12
2.1.2. CONTROLADOR DE CARGA SOLAR	12
2.1.3. CONTROLADOR DE CARGA POR DERIVACIÓN.....	13
2.1.4. RESISTENCIA DE DESCARGA	14
2.1.5. BANCO DE BATERÍAS.....	14
2.1.6. INVERSOR DE POTENCIA	15
2.1.7. DISYUNTORES	15
2.1.8. MÓDULO DE BLOQUEO Y ETIQUETADO	16
2.1.9. BARRA DE DISTRIBUCIÓN DE ENERGÍA	16
2.1.10. CARGAS RESISTIVAS.....	17
2.1.11. ELEMENTOS DE MEDICIÓN DE VOLTAJE Y CORRIENTE	17
2.2. ESTRUCTURA DEL SISTEMA DIDÁCTICO DE ENERGÍA SOLAR...	17
2.3. MODELADO DINÁMICO DE LA MICRORRED.....	18
2.3.1. MÓDULO SOLAR FOTOVOLTAICO	19
2.3.2. CONTROLADOR DE CARGA SOLAR	22
2.3.3. BANCO DE BATERÍAS.....	25
2.3.4. INVERSOR DE POTENCIA	27
3. RESULTADOS Y DISCUSIÓN.....	30
3.1. IMPLEMENTACIÓN DEL MODELO DEL MÓDULO SOLAR	30
3.2. VERIFICACIÓN DEL COMPORTAMIENTO DE MÓDULO SOLAR....	31
3.3. IDENTIFICACIÓN DE MODELO DE ALMACENAJE DE ENERGÍA ...	32
3.3.1. DISEÑO DEL CONTROLADOR PARA LA BATERÍA	34
3.4. COMPARATIVA DE MODELO CON PRUEBAS REALIZADAS.....	37
3.5. CONTROL DE CARGA SOLAR	39
3.6. INTERACCIÓN DEL SISTEMA CON CARGAS EN DC	41
3.7. CONTROL DE CARGA POR DERIVACIÓN	42
3.8. INFORMACIÓN ADICIONAL.....	42
4. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES	43
CONCLUSIONES	43
RECOMENDACIONES.....	43

BIBLIOGRAFÍA..... 45

ÍNDICE DE FIGURAS

	PÁGINA
Figura 1. Subsistemas de la microrred de la UPB	4
Figura 2. Microrred experimental Hylab	4
Figura 3. Microrred con control basado en redes neuronales	5
Figura 4. Horno solar para el secado de plantas y vegetales	5
Figura 5. Esquema de la planta didáctica de intercambio térmico	6
Figura 6. Esquema de la planta de destilación por membrana	6
Figura 7. Diagrama de Requerimientos de la microrred Lab Volt.....	9
Figura 8. Estructura de la función y elementos solución del sistema.....	10
Figura 9. Diagrama de definición de bloques de la microrred Lab Volt.....	10
Figura 10. Sistema didáctico Lab Volt con sus componentes	11
Figura 11. Respuesta de irradiancia de los paneles solares FV.	12
Figura 12. Lámpara reflectora de AC (simulador solar)	12
Figura 13. Controlador de carga solar.....	13
Figura 14. Resistencia de descarga.....	14
Figura 15. Banco de baterías	15
Figura 16. Inversor de potencia.....	15
Figura 17. Módulo de bloqueo y etiquetado	16
Figura 18. Barra de distribución de energía	16
Figura 19. Conexiones entre los componentes de la microrred.	17
Figura 20. Esquema eléctrico para una célula solar	19
Figura 21. Circuito equivalente para un convertidor buck	22
Figura 22. Modos de operación del convertidor	22
Figura 23. Esquema circuital de la batería, propuesta en	26
Figura 24. Esquema eléctrico para un inversor de puente completo	27
Figura 25. Modelo equivalente en el punto de operación de un inversor	28
Figura 26. Modelo en pequeña señal del inversor	29
Figura 27. Curva corriente-voltaje con variación de la irradiancia solar.	30
Figura 28. Curva voltaje-potencia con variación de la irradiancia solar.	31
Figura 29. Señal de entrada al sistema en lazo abierto.	33
Figura 30. Respuesta del sistema.....	33
Figura 31. Comportamiento del sistema ante una entrada tipo escalón.	34
Figura 32. Diagrama de bloques del sistema como regulador.	35
Figura 33. Diagrama de bloques del sistema con control óptimo.....	36
Figura 34. Respuesta del sistema con control lqr ante diferentes entradas.36	36
Figura 35. Modelo completo de la microrred en Simulink ®.....	37
Figura 36. Respuesta del sistema en simulación.	38
Figura 37. Comparativa de datos medidos con datos simulados.	38
Figura 38. Corriente entregada a la batería por el panel solar	40
Figura 39. Voltaje entregado a la batería por el panel solar.....	40
Figura 40. Conexión en paralelo de lámparas en DC	41

Figura 41. Corriente consumida por las lámparas en DC	41
Figura 42. Potencia absorbida por las lámparas en DC.....	42

ÍNDICE DE TABLAS

	PÁGINA
Tabla 1. Estados del LED intermitente	13
Tabla 2. Características eléctricas del módulo solar	21
Tabla 3. Ventajas y desventajas de los modelos de baterías existentes.....	25
Tabla 4. Valores de V_{c-a} e I_{c-c} del módulo FV	31
Tabla 5. Radiación solar 26/07/2019	39
Tabla 6. Valores obtenidos de potencia del panel	40

RESUMEN

La generación y suministro de energía eléctrica se ha vuelto indispensable en el desarrollo de la sociedad. La población se encuentra en constante crecimiento y el aumento de la demanda energética. La generación distribuida y las redes eléctricas inteligentes se presentan como una alternativa a las formas convencionales de generación considerando el incremento de las necesidades de energía eléctrica de sus clientes. El uso de energías renovables no convencionales como la solar, eólica, biomasa entre otras; en conjunto con sistemas de almacenamiento de energía permiten mitigar la creciente demanda eléctrica y disminuir el uso de combustibles con origen fósil. Una microrred es una red de generación eléctrica que puede aprovechar varias fuentes de energía renovables, para satisfacer la demanda del consumidor trabajando en conjunto con la red centralizada o autónomamente. El problema de control en una microrred es satisfacer la demanda de electricidad en condiciones económicas y óptimas a pesar de las incertidumbres y las perturbaciones que podrían aparecer en estos procesos. Los modelos matemáticos disponibles representan la dinámica principal y la carga de estos sistemas. El presente trabajo tuvo como objetivo modelar el comportamiento eléctrico de los diferentes subsistemas de la microrred de generación eléctrica en diferentes condiciones y sus resultados con la finalidad de conocer su dinámica, aporte y uso como una forma óptima de gestión de la energía eléctrica. El modelo matemático se obtuvo siguiendo un compromiso de simplicidad y precisión, ignorando ciertas propiedades físicas del sistema, teniendo así, un modelo sencillo y a la vez útil como base para el diseño de controladores. Se realizaron simulaciones que validaron el modelo propuesto de los elementos del sistema por separado, y del sistema en conjunto.

Palabras claves: Energía renovable, microrred, gestión de energía, electricidad.

ABSTRACT

The generation and supply of electricity has become indispensable in the development of society. The population is constantly growing and energy demand is increasing. Distributed generation and smart power grids are presented as an alternative to conventional forms of generation considering the increase in the electricity needs of its customers. The use of unconventional renewable energies such as solar, wind, biomass among others; in conjunction with energy storage systems, they can mitigate the growing electricity demand and reduce the use of fossil fuels. A microgrid is a power generation network that can use several renewable energy sources, in order to satisfy consumer's demand, working together with the network centrally or autonomously. The control's problem in a microgrid is to satisfy the demand of electricity in economic and optimal conditions despite the uncertainties and disturbances that could appear in these processes. The available mathematical models represent the main dynamics and the charge of these systems. This work aimed to model the electrical behavior of the different subsystems of the microgrid of electricity generation in different conditions and their results in order to know their dynamics, contribution and use as an optimal way of management electrical energy. The mathematical model was obtained following a compromise of simplicity and precision, ignoring some physical properties of the system, thus having a simple and at the same time useful model as base for controller design. Simulations were performed that validated the proposed model of the system elements separately, and of the system as a unit.

Keywords: Renewable energy, energy management, electricity, micro grid.

1. INTRODUCCIÓN

Una Microrred es un sistema de interconexión con la capacidad de autoabastecerse y operar de forma aislada, abarcando tres aspectos principales: la generación, almacenamiento y el transporte eléctrico. (Llano, 2015). La generación de energía eléctrica se logra por medio de fuentes de energía renovable: eólica, fotovoltaica, hidroeléctrica, entre otros, con el objeto de garantizar la continuidad en el suministro eléctrico.

Un aspecto importante es la incorporación de tecnología que permite la existencia de un flujo de información bidireccional entre generadores y consumidores, diferenciándose así de las redes eléctricas actuales, y reduciendo pérdidas y costos de generación y transmisión energética (Fossati, 2011).

Una planta didáctica es un sistema que imita diferentes procesos existentes en la industria, escalándolos para cumplir con un fin específico. Dichas estaciones son utilizadas para la preparación de estudiantes y entrenamiento de personal vinculado a la tecnología que se utiliza en el sistema didáctico, esto se debe a que cuentan con instrumentación, protecciones, equipos de monitoreo y control que aseguran su correcto funcionamiento.

Las estaciones didácticas son utilizadas en la actualidad como una forma más efectiva de aprendizaje, estableciendo relaciones entre conocimientos impartidos, en su mayoría teóricos, con la práctica de estos, con mira a cumplir con los requerimientos reales dentro de la industria creciente y competitiva (Españeira, 2016).

En diferentes lugares del mundo, se diseñan y emplean microrredes, adecuadas a necesidades de cada cliente. A continuación, se detallan algunas plantas desarrolladas en los últimos años.

En Colombia, el Grupo de Investigación en Transmisión y Distribución de Energía Eléctrica de la UPB (Universidad Pontificia Bolivariana) desarrolló el proyecto energético auto-gestionable. Esta microrred está constituida por 10 subsistemas integrados con los que se gestiona energía eléctrica, no en forma de una enorme central eléctrica, “sino en forma de una red, que convierte el entorno en el que funciona, en una ciudad inteligente en miniatura” (Llano, 2015). Los subsistemas que forman parte de esta red didáctica y de investigación de la UPB son: tres generadores solares; tres estaciones meteorológicas, que evalúan la disponibilidad de los recursos solares y eólicos; medidores de radiación solar, entre otras variables; sistema de control de temperatura e iluminación; un biodigestor; un circuito de alumbrado público; y una estación de carga para vehículos eléctricos.



Figura 1. Subsistemas de la microrred de la UPB
(Llano, 2015)

“HyLab”, es una instalación experimental de gestión de energía renovable, y de almacenamiento basado en hidrógeno. El sistema consiste en una fuente electrónica programable, que simula diversas fuentes de energía renovable; un electrolizador tipo PEM (Proton Exchange Membrane), y un depósito de hidrógeno utilizados para la producción y almacenamiento de hidrógeno; un banco de baterías; una pila de combustible tipo PEM; y una carga electrónica programable, que simula diferentes condiciones de demanda (Valverde, 2013).

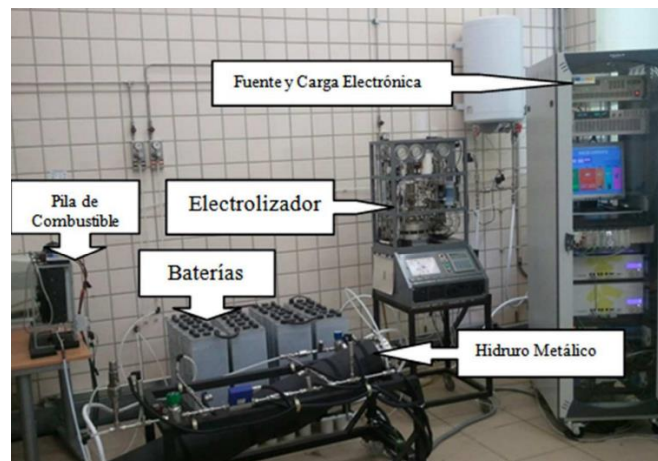


Figura 2. Microrred experimental Hylab
(Valverde, 2013)

La implementación de una *Smartgrid* con un sistema de control con base en redes neuronales artificiales para la regulación de la generación de energía y su integración con la red eléctrica marca el inicio de la búsqueda de sistemas que permitan adaptarse a la variación del recurso y el ruido que pueda existir en la red eléctrica (Sun et al., 2016).

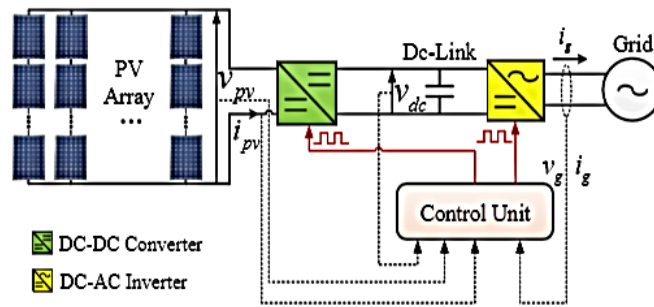


Figura 3. Microrred con control basado en redes neuronales
(Sun et al., 2016)

Existe un horno solar para el secado de plantas y vegetales expuesto en (Miranda, Gonzáles, Guzmán, & Ibarra, 2012). Este es un sistema térmicamente controlado mediante técnicas de control difuso, con lo que se permite optimizar el tiempo de secado, asegurando la adecuada conservación de las plantas y reduciendo los tiempos de deshidratación de los mismos.

El horno que se muestra en la Figura 4, consta de un colector solar, un sistema de transmisión por medio de una banda transportadora y un contenedor de aceite, utilizado para calentar el producto y dar inicio al proceso de deshidratación (Miranda, Gonzáles, Guzmán, & Ibarra, 2012).

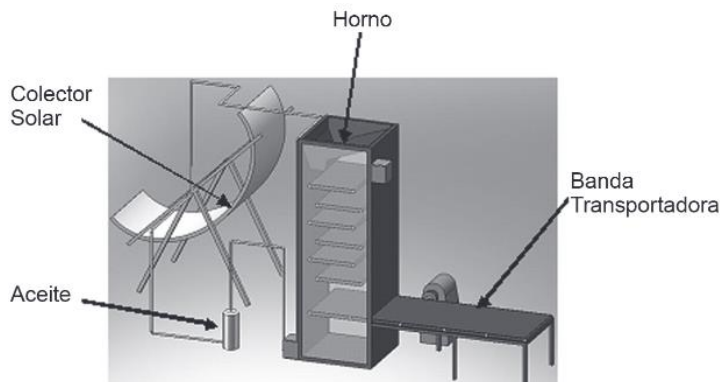


Figura 4. Horno solar para el secado de plantas y vegetales
(Miranda, Gonzáles, Guzmán, & Ibarra, 2012)

Planta didáctica de intercambio térmico a escala piloto. Desarrollada en Cali, Colombia; su objetivo es realizar un intercambio de calor y enfriamiento, con base en un control de temperatura (García Sánchez & Fernando, 2015). Esta planta consiste en un circuito cerrado de agua fría y caliente como se muestra en la Figura 5. El agua dedicada para el proceso se adquiere de la red de acueducto de agua potable. Se realiza un tratamiento a esta agua para retirar los sólidos suspendidos que se encuentran en la misma. A continuación, se utilizan resinas de intercambio catiónico que retiran los iones de calcio y magnesio en el agua. El agua es utilizada como recurso de calefacción y enfriamiento de la planta.

El tratamiento térmico que se le da al recurso es llevado a cabo en un intercambiador de calor en donde los fluidos están a diferentes temperaturas y separados por una pared sólida.

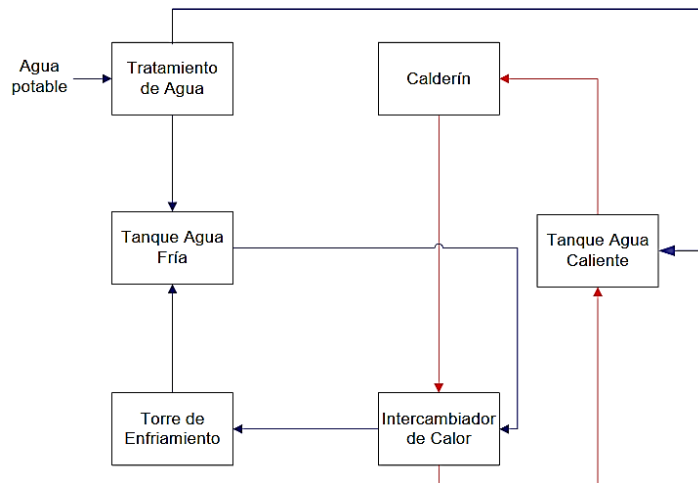


Figura 5. Esquema de la planta didáctica de intercambio térmico (García Sánchez & Fernando, 2015)

Planta de destilación por membrana con apoyo de energía solar. Es una estación de tecnología en proceso de investigación, de desalación de agua, en zonas con adecuadas condiciones de radiación solar.

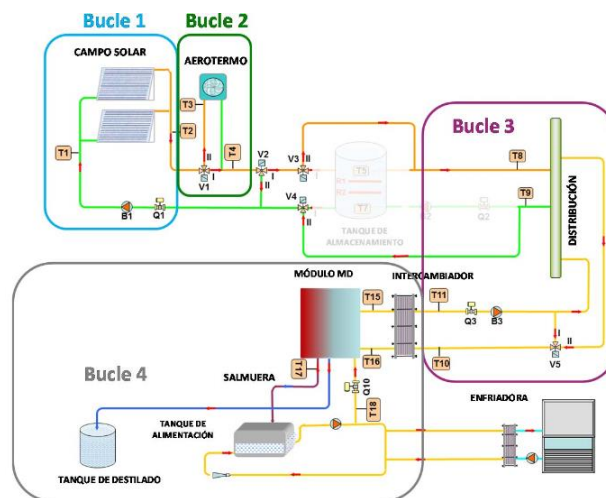


Figura 6. Esquema de la planta de destilación por membrana (Juan D. Gil1, Roca, Zaragoza, Berenguel, & Guzmán, 2015)

El esquema de la planta se muestra en la Figura 6. Esta investigación se fundamenta en el estudio y desarrollo de una arquitectura básica de control de temperatura en la entrada de un módulo MD¹, ubicado en la plataforma solar de Almería que comprende “el control de temperatura del campo solar, de un bloque de enfriamiento aerostermo y de un sistema de mezcla a la entrada de la unidad md, con el fin de reducir el uso de energía no proveniente

¹ MD es un proceso de separación impulsado térmicamente producido por una membrana porosa hidrofóbica

de fuentes renovables” (Juan D. Gil1, Roca, Zaragoza, Berenguel, & Guzmán, 2015).

En España existen varios proyectos implementados de *Smartgrids*, con el fin de conseguir una transformación tecnológica, y la implementación de sensores inteligentes en la red de suministro energético (Vázquez, 2016).

Algunos de estos son: Proyecto de desarrollo “STAR”, manejado por el grupo Iberdrola en 2018 en Castellón. Proyecto “PRICE” en la comunidad de Madrid y la provincia de Guadalajara, en el Corredor de Henares en 2014, el proyecto “MONICA” en Málaga en 2016.

Existen varias *Smartgrids* implementadas, efectuando distintos intereses de las personas o grupos de interés, que las han realizado. En este trabajo se busca hacer un análisis, y descripción de la microrred LAB VOLT 46801-32, a partir de un modelo dinámico; la cual permite la generación y distribución de energía de manera autónoma, basada en energía renovable solar. El sistema genera energía por medio de módulos solares que convierten los fotones provenientes de la luz solar en electricidad, por medio del efecto fotovoltaico. El sistema presenta módulos controladores, de carga solar, y de carga por derivación, que permiten gestionar y almacenar eficientemente la energía proveniente de las fuentes alternativas renovables. (Lab-Volt, 2012). Luego de una exhaustiva revisión del estado del arte, no existen trabajos donde se exponga una descripción detallada del funcionamiento de la misma. Por lo tanto, el aporte de este trabajo consiste en describir detalladamente cada uno de los componentes de la esta microrred, así como obtener un modelo que gobierne el comportamiento dinámico de la misma, y exponer las pruebas y resultados que han sido llevados a cabo. Con esto se busca ayudar a investigadores que trabajen y piensen en desarrollar pruebas en esta planta didáctica. Las pruebas y su funcionamiento han sido detalladas, así como un análisis de los resultados obtenidos.

El objetivo general de este proyecto es modelar el sistema de generación y distribución de energía Lab Volt, mediante ecuaciones matemáticas, para comprender el comportamiento dinámico del sistema.

Para cumplir con el objetivo general, se plantearon los siguientes objetivos específicos:

- Sintetizar el comportamiento de la generación de energía renovable obtenida por un módulo fotovoltaico.
- Modelar individualmente los elementos principales que conforma el sistema.
- Diseñar e implementar técnicas de control para optimizar el uso del excedente de energía renovable.

- Validar el comportamiento del sistema y de los modelos, mediante simulación en software.

El proyecto se encuentra estructurado de la siguiente manera. En la etapa inicial, se implementará el “Sistema didáctico de Energía Solar Lab Volt” en el laboratorio de mecanismos de la Universidad UTE, el cual permitirá la generación y distribución de energía de manera autónoma, basada en energía solar. Posteriormente se analizarán todos los elementos que componen el sistema, con el fin de comprender todas sus características, modos de operación y funciones individuales y sinérgicas.

La finalidad del proyecto es obtener modelos matemáticos que expresen el comportamiento dinámico de los elementos principales del sistema (panel solar, banco de baterías, inversor y transformadores) y, finalmente del sistema en conjunto. Adicionalmente se implementará técnicas de control mediante estructuras avanzadas para tratar retardos y perturbaciones. De esta manera se gestionará y usará el total de excedente de energía renovable, evitando así, desperdicios de energía. Finalmente, todo el estudio se realizará mediante simulación en software de entorno de diagrama de bloques.

2. METODOLOGÍA Y DISEÑO

Para estructurar el desarrollo del proyecto se utilizaron los diagramas presentes en la metodología en V. Estos diagramas permitieron definir los requerimientos funcionales que tiene el sistema, los elementos de los que está compuesto y sus relaciones.

En la Figura 7 se presentan los requerimientos fundamentales para la puesta en marcha del proyecto, considerando propiedades del sistema como la generación, almacenaje, control energético, que permitirán una eficiente gestión de la energía obtenida. Asimismo, se proponen los requerimientos en función del tipo de consumo y demanda que se solicitará al sistema.

Todos los requerimientos son de fundamental importancia para el reconocimiento de elementos y variables que se requieran en la obtención del modelo dinámico del sistema.

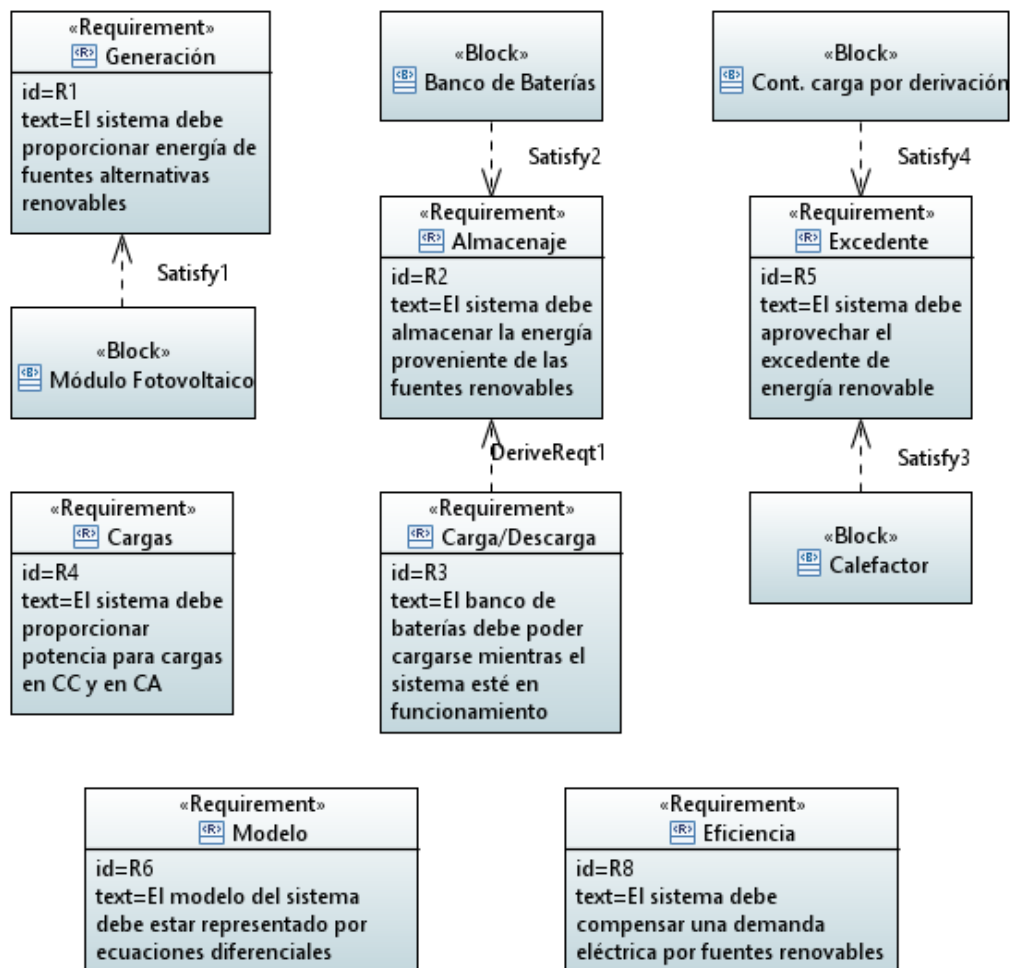


Figura 7. Diagrama de Requerimientos de la microrred Lab Volt

Para comprender la función general del sistema se aplica la estructura de la función y elementos solución. Con esto se describen y dividen las subfunciones y el comportamiento a cumplir por parte del sistema. Finalmente

se indican los elementos solución, son módulos que cumplen con las funciones específicas del sistema (Deutscher, 2004).

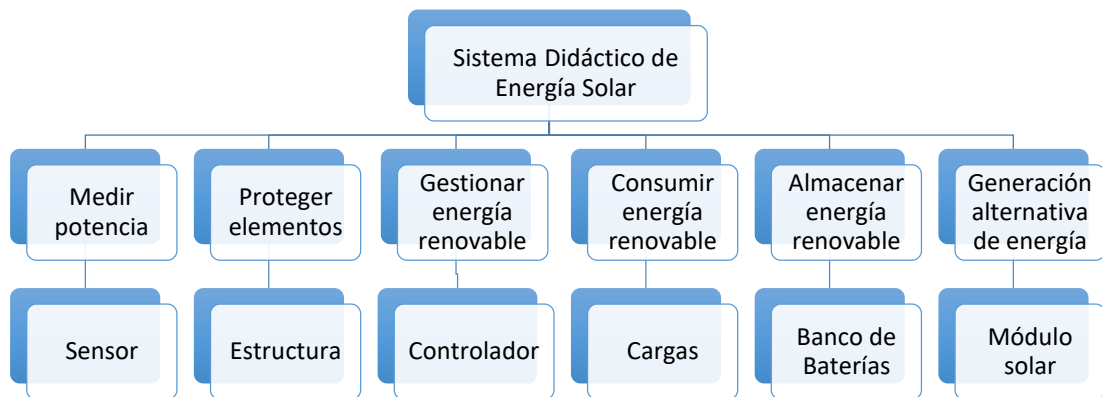


Figura 8. Estructura de la función y elementos solución del sistema

La estructura se presenta en la Figura 8. Para cumplir con las funciones de medir potencia y gestionar la energía proveniente de fuentes alternativas renovables se utilizan los módulos controladores, de carga solar y de carga por derivación, en los que están incorporados los sensores necesarios. Al ser un sistema didáctico, cuenta con sistemas de protección, la estructura o chasis que protege a los elementos de impactos, y con protecciones de sobrecargas, como son los disyuntores. La última función a cumplir es el aprovechamiento de la energía renovable, se realiza por medio de cargas en AC DC y resistencias de descarga.

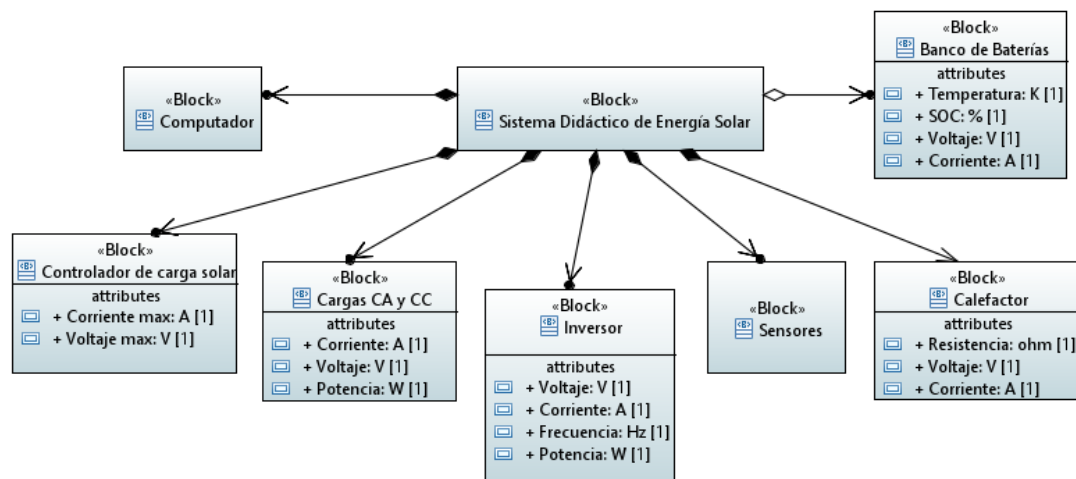


Figura 9. Diagrama de definición de bloques de la microrred Lab Volt

En la Figura 9 se presenta la estructura general de la microrred. En él se expone todos los componentes que son parte del sistema. Debido a que se trabaja con un sistema ya existente, previo a la realización de mencionado diagrama se identificaron los elementos existentes de la planta.

2.1. DESCRIPCIÓN DE COMPONENTES DEL SISTEMA LAB VOLT

La microrred en estudio consta de un panel solar, un banco de baterías para la alimentación del sistema, módulos de seguridad para la protección de cada uno de los elementos del sistema, un inversor, una resistencia de descarga y dos controladores. El sistema puede trabajar para cargas en AC y cargas en DC debido a su flexibilidad y a sus componentes. Las cargas utilizadas para esta planta son lámparas incandescentes. Al tratarse de una planta didáctica, cuenta con indicadores de seguridad. Este sistema didáctico también está compuesto por un chasis donde se realizan las conexiones ya que se trata de una planta modular.

La Figura 10 describe los componentes de la microrred utilizada.

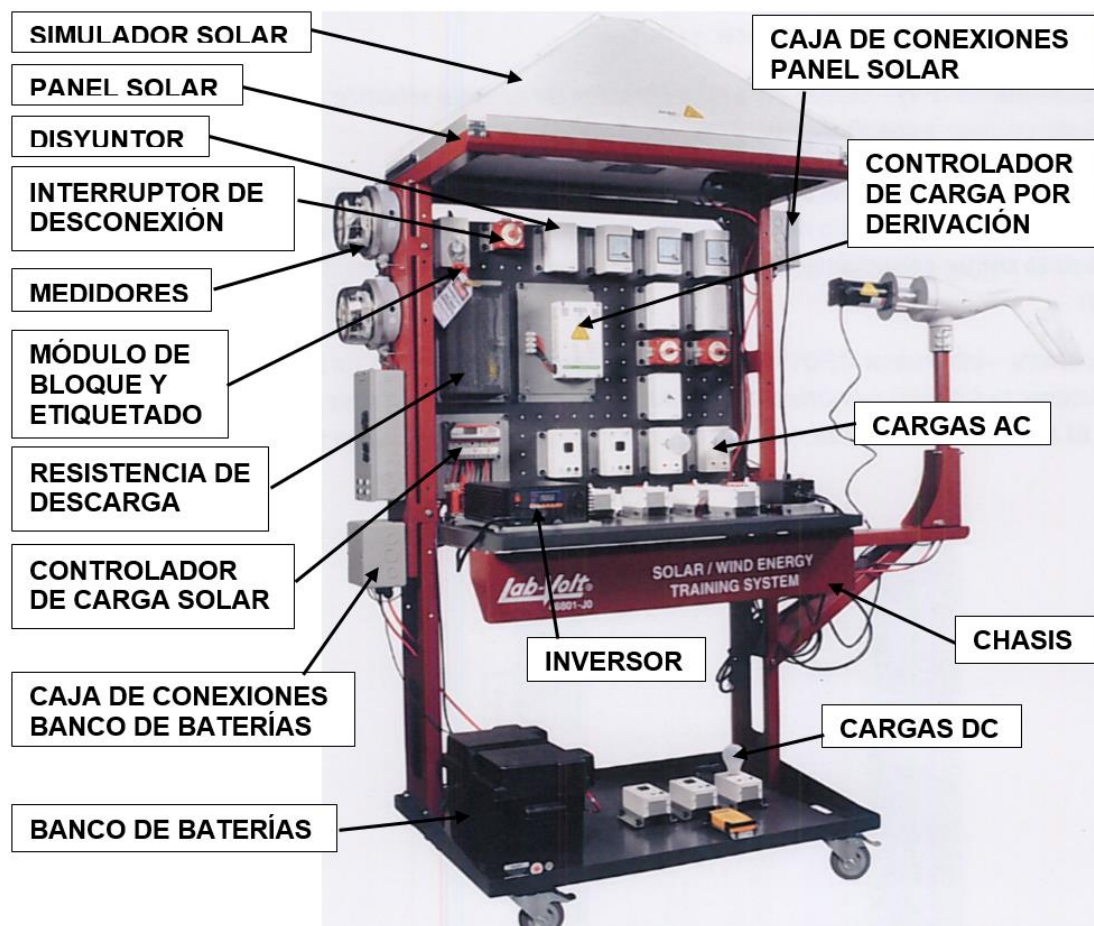


Figura 10. Sistema didáctico Lab Volt con sus componentes
(Lab-Volt, 2012)

Los elementos que conforman el sistema didáctico de energía solar se describen a continuación:

2.1.1. MÓDULO SOLAR FOTOVOLTAICO

Constituido por celdas solares conectadas eléctricamente entre sí, se caracteriza por convertir los fotones provenientes de la luz solar en electricidad por medio del efecto fotovoltaico. La potencia de salida en el módulo depende de la irradiación solar (Sun et al., 2016).

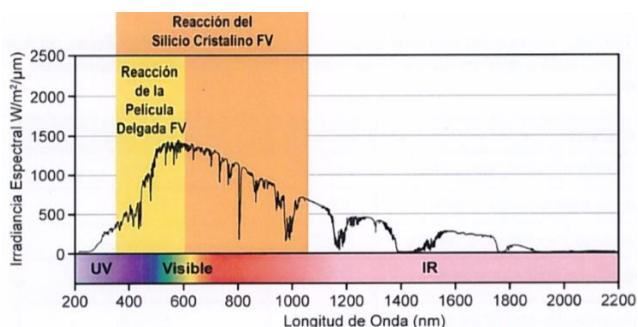


Figura 11. Respuesta de irradiancia de los paneles solares FV.
(Lab-Volt, 2012)

En la Figura 11 se muestra la respuesta espectral de energía radiante de un panel solar. El módulo solar fotovoltaico (FV) utilizado es del fabricante SOLARTECH, versión SPM085P-TS-N. Consta de 36 celdas solares, además proporciona una potencia máxima de 85W.

2.1.1. LÁMPARA REFLECTORA DE AC (SIMULADOR SOLAR)

Está constituido por una lámpara de 600W, utilizado para iluminar el panel solar, cumpliendo la función de simular energía solar. La lámpara se encuentra dentro de un chasis con forma de una pirámide truncada, como se aprecia en la Figura 12, que permite que se ilumine el panel uniformemente.



Figura 12. Lámpara reflectora de AC (simulador solar)
(Lab-Volt, 2012)

2.1.2. CONTROLADOR DE CARGA SOLAR

Dispositivo electrónico que tiene la finalidad de regular y acondicionar los voltajes y corrientes de un sistema de energía solar. Su objetivo principal es cargar el banco de baterías, desde una fuente de energía solar, evitando sobrecargas y sobredescargas. Trabaja por modulación de ancho de pulso (PWM), con el que se abre y cierra el circuito de la fuente de energía

fotovoltaica a un ritmo acelerado. La regulación es producida emitiendo impulsos intermitentes que conmuta la corriente de carga completa ajustando el ancho del impulso para cambiar la corriente de carga promedio que fluye hacia el banco de baterías (Lab-Volt, 2012). En la Figura 13 se encuentra el controlador de carga solar perteneciente al sistema Lab Volt.

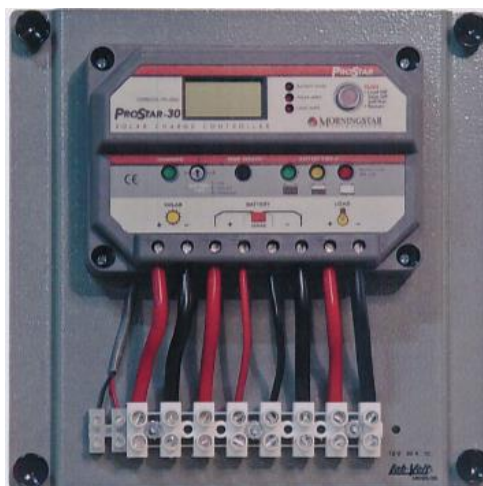


Figura 13. Controlador de carga solar
(Lab-Volt, 2012)

2.1.3. CONTROLADOR DE CARGA POR DERIVACIÓN

Este dispositivo evita la sobrecarga de las baterías del sistema, desviando el excedente de energía alternativa a otras áreas o cargas de potencia. Trabaja con modulación por ancho de pulso, manejando hasta 35 A. Tiene 6 estados de funcionamiento que son interpretados mediante parpadeos de una lámpara LED. La cantidad de parpadeos indica el valor de carga que posee la batería, expresados respectivamente en la Tabla 1 (Lab-Volt, 2012).

Tabla 1. Estados del LED intermitente

Voltaje de la Batería	Estado del LED Verde
Igual al nivel de carga FLOTANTE	Encendido
Igual al nivel de carga EN BRUTO	5 Parpadeos
0,25 V por debajo del nivel de carga EN BRUTO	4 Parpadeos
0,5 V por debajo del nivel de carga EN BRUTO	3 Parpadeos
0,75 V por debajo del nivel de carga EN BRUTO	2 Parpadeos
>0,75 V por debajo del nivel de carga EN BRUTO	1 Parpadeo

(Lab-Volt, 2012)

2.1.4. RESISTENCIA DE DESCARGA

Es un resistor de 600W, con el que se aprovecha el excedente de energía renovable proveniente del panel fotovoltaico. La Figura 14 presenta la resistencia de descarga utilizada en la microrred. Su principal función es evitar la sobrecarga de las baterías, consumiendo el excedente de energía renovable, aprovecha esta energía calentando agua o aire. Es necesario trabajar con una resistencia de descarga de valores óptimos, caso contrario, si la resistencia es muy pequeña, se podría sobrecargar el banco de baterías, o si excede el valor nominal del controlador por derivación de 35 A, el controlador podría cerrarse, y no regular, debido a la protección de sobrecarga. (Lab-Volt, 2012).



Figura 14. Resistencia de descarga
(Lab-Volt, 2012)

2.1.5. BANCO DE BATERÍAS

Es una fuente de alimentación de DC compuesta por una batería de almacenamiento de plomo-ácido, utilizada para almacenar la energía renovable del sistema. La batería posee una capacidad nominal de 110 Ah con un voltaje de 12V DC. Con respecto al proceso de carga de las baterías, para que pueda aceptar corriente durante el proceso de carga, el voltaje en los terminales de la batería debe ser sustancialmente mayor que el voltaje nominal sin carga, a circuito abierto (Lab-Volt, 2012).

Para realizar este proceso se consideran 3 estados para lograr la condición de carga completa, y son: en bruto (estado de carga rápida hasta alcanzar el 80% o 90% de su capacidad máxima), por absorción (estado de carga del 5% o 10% restante) y flotante (la batería se carga hasta el 100% de su capacidad, el voltaje y la corriente de carga disminuyen para evitar una condición de sobrecarga).

En la Figura 15 se exhibe el depósito que contiene la batería de almacenamiento.



Figura 15. Banco de baterías
(Lab-Volt, 2012)

2.1.6. INVERSOR DE POTENCIA

El objetivo es transformar un voltaje de entrada en DC a un voltaje de salida en AC. El inversor proporciona el acondicionamiento de energía necesario para proveer potencia en AC monofásica (Lab-Volt, 2012). El inversor del equipo didáctico tiene una capacidad de 1000 W de operación continua, con un máximo de 2000 W en picos repentinos. Para que los electrodomésticos y equipos electrónicos de un hogar típico funcionen, el inversor brinda un voltaje de 120V AC.

En la Figura 16 se presenta el inversor de potencia modelo SUNFORCE 11240, empleado en el sistema.



Figura 16. Inversor de potencia
(Lab-Volt, 2012)

2.1.7. DISYUNTORES

Son elementos utilizados para protección de circuitos, su principio de funcionamiento se basa en desconectar los circuitos bajo condiciones de corriente nominal, vacío o cortocircuito, es decir, con condiciones normales o anormales (Enriquez, 2011). Se utilizan disyuntores específicos para proteger el circuito del sistema de 12V DC. Asimismo, se emplea disyuntores para protección del circuito del sistema de 120V AC.

2.1.8. MÓDULO DE BLOQUEO Y ETIQUETADO

Es un interruptor de tipo DPDT (Double Pole Double Throw), empleado para la implementación de normas de seguridad (Lab-Volt, 2012). Es utilizado para permitir el paso de corriente alterna a las cargas; está conectado a 110 V AC. Posee un cerrojo, manifestado en la Figura 17, que fija la posición de apagado, con lo que se impide el paso de corriente al sistema.

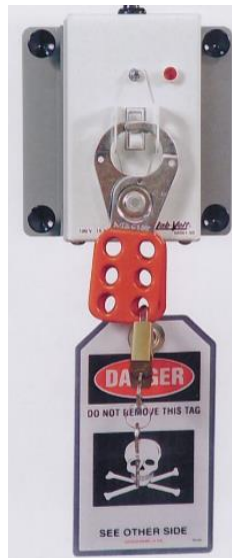


Figura 17. Módulo de bloqueo y etiquetado
(Lab-Volt, 2012)

2.1.9. BARRA DE DISTRIBUCIÓN DE ENERGÍA

Barra que consiste en dos rieles conductivos, tal como se contemplan en la Figura 18. Dichos rieles son utilizados en conexiones de 12V DC, un riel para positivos y el otro para negativos. Su finalidad es distribuir el voltaje de la batería a los diferentes puntos del sistema (Lab-Volt, 2012).



Figura 18. Barra de distribución de energía
(Lab-Volt, 2012)

2.1.10. CARGAS RESISTIVAS

Son dispositivos que convierten la energía eléctrica en lumínica por el efecto Joule mediante el calentamiento al rojo vivo de un filamento de metal en su interior. El calentamiento de este filamento produce una radiación visible al ojo humano (Real Academia Española, 2011).

En la microrred se implementaron tres lámparas leds de 8w cada una como carga en AC; y dos lámparas incandescentes de 25w cada una como carga de DC.

2.1.11. ELEMENTOS DE MEDICIÓN DE VOLTAJE Y CORRIENTE

Se implementó dispositivos de medición en diferentes puntos de la microrred, para la identificación y validación del sistema. Se utilizó sensores de corriente modelo ACS712 con un rango de medición de -30 a 30 A DC, poseen una sensibilidad de 66 mV/A y una tolerancia de $\pm 1.5\%$ (Allegro, 2019). Se empleó sensores de voltaje modelo FZ0430, posee un rango de medición de 0 a 25 V DC, además presenta una resolución de 0.00489 V. Se utilizó un Arduino MEGA 2560 como tarjeta de adquisición de datos.

2.2. ESTRUCTURA DEL SISTEMA DIDÁCTICO DE ENERGÍA SOLAR

El sistema dispone de módulos, que interactúan entre sí con el fin de aprovechar la eléctrica proveniente de la fuente solar. En la Figura 19, se presenta el diagrama de configuración del sistema.

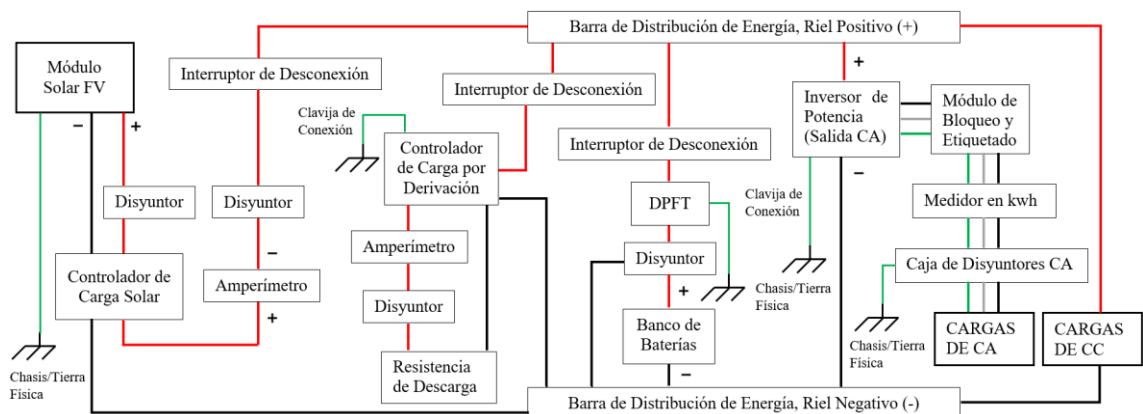


Figura 19. Conexiones entre los componentes de la microrred.
(Lab-Volt, 2012)

La interacción entre elementos comienza con el simulador solar que ilumina el panel solar por medio de una lámpara reflectora de 600 watts. En el momento que el panel recepta la luz artificial, se imita el efecto fotovoltaico. El

módulo fotovoltaico se encuentra conectado a una caja de conexiones que consiste en un arreglo de disyuntores de 8A DC, que funcionan como elemento de protección, y trabajan como un interruptor de desconexión. A partir de este punto se obtiene toda la energía eléctrica que alimentará a los demás elementos del sistema.

A continuación de la caja de conexiones del módulo fotovoltaico se encuentra conectado un controlador de carga solar, para que las señales de voltaje y corriente a la salida sean homogéneas. En la salida del controlador se encuentran conectados un elemento de medida de corriente, protecciones (un disyuntor y un interruptor de desconexión) y finalmente una barra de distribución de energía. La barra de distribución de energía es el medio clave por el cual se puede cargar el banco de baterías y consumir la energía almacenada en esta.

A partir de la barra de distribución se encuentran los siguientes elementos:

- Interruptor de desconexión y una caja de conexiones del banco de baterías, que consiste en un disyuntor de 30A DC y un dispositivo de protección de falla a tierra de 0.5A DC. A la salida se encuentra conectado el banco de baterías.
- Panel de distribución de energía DC, como elemento de interconectividad para las cargas de DC, y cuenta con un fusible de 10A.
- Inversor, que convierte la energía del banco de baterías de 12V DC a energía de 120V AC. Seguido, se encuentra un módulo de bloqueo y etiquetado, para el cumplimiento de normas de seguridad. Seguidamente están conectados los medidores y un panel de disyuntores de AC como protección del circuito del sistema de 120V AC.
- Controlador de carga por derivación, que desvía el excedente de energía renovable a una resistencia de descarga. Además, se encuentra conectado un elemento de medida de corriente (Amperímetro), y elementos de protección (interruptor de desconexión y un disyuntor).

2.3. MODELADO DINÁMICO DE LA MICRORRED

Se presenta el modelo dinámico de la microrred de energía renovable. Para efectuar esto, se han desarrollado modelos dinámicos de los principales componentes del sistema, basándose en trabajos existentes en la literatura. Los elementos que fueron modelados son:

- Módulo solar fotovoltaico
- Controlador de carga solar
- Banco de Baterías
- Inversor de Potencia

2.3.1. MÓDULO SOLAR FOTOVOLTAICO

Para modelar el módulo solar fotovoltaico, se parte del esquema eléctrico equivalente a una celda fotovoltaica, presente en la Figura 20 (Valverde, 2013).

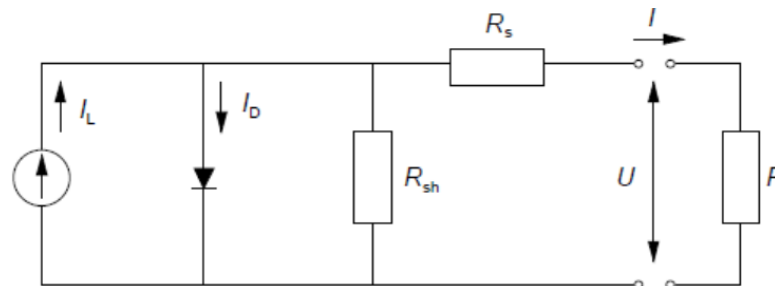


Figura 20. Esquema eléctrico para una célula solar (Valverde, 2013)

Donde:

$I_L = I_{PH}$ es la corriente fotogenerada

R_{SH} es la resistencia shunt

R_S es la resistencia en serie

R es la resistencia de la carga

I_D es la corriente en el diodo

$I = I_{cel}$ respresenta la corriente generada por el panel

I_{SH} es la corriente en la resistencia shunt

$U = V_{cel}$ es el voltaje de salida del panel

Como parte del circuito equivalente, se tiene un diodo semiconductor, cuyas características generales se pueden definir mediante la ecuación de Shockley (Boylestad & Nashelsky, 2009).

$$I_D = I_o \left(e^{\frac{V_D}{n \cdot V_T}} - 1 \right) \quad [1]$$

Donde I_o representa la corriente de saturación en inversa, V_D es el voltaje de polarización en directa, n es un factor de idealidad (varia entre 1 y 2), y V_T es el voltaje térmico, el cual está representado por la expresión:

$$V_T = \frac{kT}{q} \quad [2]$$

Siendo k la constante de Boltzmann, cuyo valor es $1.38 \cdot 10^{-23}$ [J/K], T representa la temperatura absoluta en kelvin y es igual $273 + T$ [°C], y q es la magnitud de la carga del electrón, y es de $1.6 \cdot 10^{-19}$ C.

Aplicando la ley de corriente de Kirchhoff en el esquema eléctrico de la Figura 3. Se tiene las ecuaciones (3) y (4).

$$I_{cel} = I_{PH} - I_D - I_{SH} \quad [3]$$

$$V_D = V_{RS} + V_{cel} = V_{RSH}$$

$$I_{SH} = \frac{I_{cel} * R_s + V_{cel}}{R_{SH}} \quad [4]$$

Sustituyendo I_{SH} , e I_D en la ecuación (3).

$$I_{cel} = I_{PH} - I_o \left(e^{\frac{V_D}{n * V_T}} - 1 \right) - \frac{I_{cel} * R_s + V_{cel}}{R_{SH}} \quad [5]$$

Remplazando V_T y V_D en la ecuación (5), se puede escribir esta, de la manera siguiente:

$$I_{cel} = I_{PH} - I_o \left(e^{q * \frac{I_{cel} * R_s + V_{cel}}{n * k * T}} - 1 \right) - \frac{I_{cel} R_s + V_{cel}}{R_{SH}} \quad [6]$$

La corriente fotogenerada I_{PH} varía en función de la radiación solar, y de la temperatura de la celda, y está dada por la ecuación (7)

$$I_{PH} = \frac{S}{S_{ref}} - [I_{ref} + U_{isc} * (T_C - T_{Cref})] \quad [7]$$

Donde:

S es la radiación solar medida en el instante

S_{ref} es la radiación solar en condiciones estándar igual a 1000 [W/m²]

I_{lref} es la corriente fotogenerada en condiciones de referencia $I_{lref} = I_{sc}$

U_{ISC} es el coeficiente de temperatura de corriente de corto circuito

T_{Cref} es la temperatura de trabajo de la celda en condiciones estándar, igual a 298K, y

T_C es la temperatura de la celda

La corriente de saturación inversa está definida por la ecuación (8).

$$I_0 = I_{Oref} * \left(\frac{T_c}{T_{cref}} \right) * \left(e^{q * E_g * \left(\frac{1}{T_{cref}} - \frac{1}{T_c} \right)} \right) \quad [8]$$

Siendo I_{Oref} la corriente de saturación inversa en condiciones de referencia, y E_g la energía del semiconductor.

Tabla 2. Características eléctricas del módulo solar

Características Eléctricas	
Potencia máxima	85 [W]
Voltaje máximo de potencia	17.9 [V]
Corriente máxima de potencia	4.84 [A]
Corriente en corto circuito	5.17 [A]
Voltaje en circuito abierto	21.9 [V]
Eficiencia del módulo	12.53%
Tolerancia	±5%

(Lab-Volt, 2012)

Los parámetros expuestos del módulo solar, proporcionados por el fabricante se presentan en la Tabla 2. Como la resistencia en serie del esquema eléctrico no es proporcionada por el fabricante, con base en el comportamiento de un dispositivo ideal, (Green, 1982) presenta una relación empírica entre el voltaje en cortocircuito, y el factor de forma del panel, expuesta en las ecuaciones (9), (10) y (11).

$$FF = \frac{I_M * V_M}{I_{sc} * V_{oc}} = \frac{P_{max}}{I_{sc} * V_{oc}} \quad [9]$$

$$FF_0 = \frac{V_{oc} - \ln(V_{oc} + 0.72)}{V_{oc} + 1} \quad [10]$$

$$R_s = \left(1 - \frac{FF}{FF_0} \right) \left(\frac{V_{oc}}{I_{sc}} \right) \quad [11]$$

El factor de forma relaciona la potencia máxima que se puede obtener del panel solar, con respecto al producto de la corriente en corto circuito y el voltaje en circuito abierto. FF_0 Representa el factor de forma para un dispositivo ideal (Valverde, 2013).

2.3.2. CONTROLADOR DE CARGA SOLAR

Para obtener su modelo matemático y, porque la función principal del elemento es acondicionar el voltaje para una carga constante, es representado por un circuito convertidor de potencia tipo buck, para su análisis. El diagrama del circuito equivalente se presenta en la Figura 21.

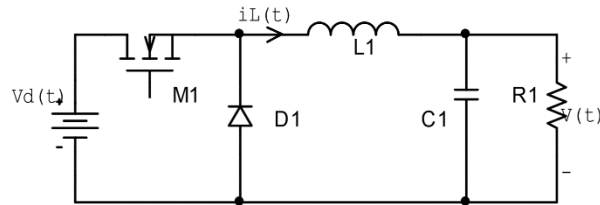
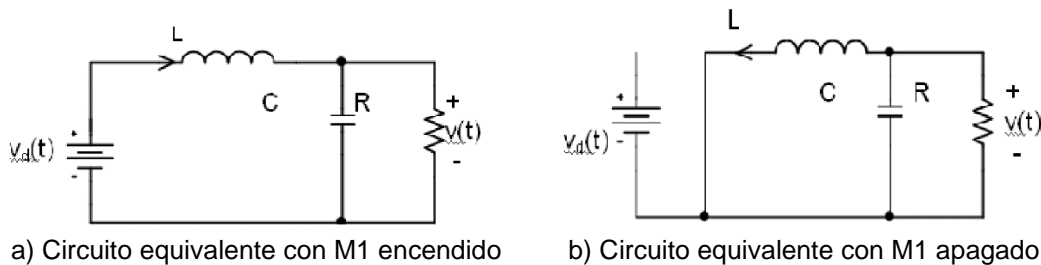


Figura 21. Circuito equivalente para un convertidor buck (Quiroga, 2010)

El modelo matemático del convertidor se representará por medio de la técnica de espacio-estado. En la que las ecuaciones de estados están determinadas por el interruptor M1, cuyos modos de operación son encendido y apagado (Vargas, Pérez, & Cota, 2015).

La dinámica del convertidor se ve afectada en función de una variable de control k (ciclo de trabajo), que define el estado del interruptor obteniendo los valores de $k = 1$ para el estado de encendido, y $k = 0$ para apagado.



a) Circuito equivalente con M1 encendido b) Circuito equivalente con M1 apagado

Figura 22. Modos de operación del convertidor

(Quiroga, 2010).

Para su análisis se seleccionan los estados independientes que el sistema tendrá, siendo estos la corriente del inductor (i_L), y el voltaje en el capacitor (v_c), el vector de estado queda de la forma siguiente:

$$x(t) = \begin{bmatrix} i_L(t) \\ v_c(t) \end{bmatrix} \quad [12]$$

La entrada independiente al sistema está representada por su fuente de alimentación, por ende, se tiene como vector de entradas:

$$u(t) = [V_d(t)] \quad [13]$$

En el primer modo de operación, el interruptor se encuentra encendido. El circuito equivalente se ve en la Figura 22 a). Aplicando las leyes de Kirchhoff y modelado de sistemas eléctricos se obtiene

$$\begin{aligned} V_d &= Lx_1' + x_2 \\ x_1' &= -\frac{1}{L}x_2 + \frac{1}{L}V_d \end{aligned} \quad [14]$$

$$\begin{aligned} Cx_2' &= x_1 - \frac{1}{R}x_2 \\ x_2' &= \frac{1}{C}x_1 - \frac{1}{RC}x_2 \end{aligned} \quad [15]$$

Las ecuaciones (14) y (15), escritas en la forma matricial del modelo espacio-estado es:

$$\begin{bmatrix} x_1' \\ x_2' \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & -\frac{1}{L} \\ \frac{1}{C} & -\frac{1}{RC} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_1 \\ x_2 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \frac{1}{L} \\ 0 \end{bmatrix} [u] \quad [16]$$

Para el segundo modo de operación, el interruptor se encuentra apagado. El circuito equivalente se ve en la Figura 22 b). Aplicando las leyes de voltaje y corriente de Kirchhoff, y modelado de sistemas eléctricos se tiene:

$$\begin{aligned} 0 &= Lx_1' + x_2 \\ x_1' &= -\frac{1}{L}x_2 \end{aligned} \quad [17]$$

$$\begin{aligned} Cx_2' &= x_1 - \frac{1}{R}x_2 \\ x_2' &= \frac{1}{C}x_1 - \frac{1}{RC}x_2 \end{aligned} \quad [18]$$

Las ecuaciones (17) y (18), escritas en la forma matricial del modelo espacio-estado es:

$$\begin{bmatrix} x_1' \\ x_2' \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & -\frac{1}{L} \\ \frac{1}{C} & -\frac{1}{RC} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_1 \\ x_2 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \end{bmatrix} [u] \quad [19]$$

Debido a que en los sistemas con retroalimentación, el ciclo de trabajo k es una función de x y de u , la forma matricial del modelo, se obtiene promediando

en estado-espacio (Rashid, 2004). Las matrices promediadas se representan por las ecuaciones (20) y (21):

$$A = A_1k + A_2(1 - k) \quad [20]$$

$$B = B_1k + B_2(1 - k) \quad [21]$$

Al sustituir A_1 y B_1 de la ecuación 16, y A_2 y B_2 de la ecuación (19) resultan las matrices:

$$A = \begin{bmatrix} 0 & -\frac{1}{L} \\ \frac{1}{C} & -\frac{1}{RC} \end{bmatrix} \quad [22]$$

$$B = \begin{bmatrix} k \\ \frac{1}{L} \\ 0 \end{bmatrix} \quad [23]$$

El modelo promediado del convertidor está dado por:

$$\begin{bmatrix} x_1' \\ x_2' \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & -\frac{1}{L} \\ \frac{1}{C} & -\frac{1}{RC} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_1 \\ x_2 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} k \\ \frac{1}{L} \\ 0 \end{bmatrix} [u] \quad [24]$$

La ecuación representa un modelo no lineal en vista de que k es una función de x_1 , x_2 y u . En efecto, es necesario emplear aproximaciones de pequeña señal, con el fin de obtener el comportamiento linealizado con pequeña señal del convertidor (Rashid, 2004). Las ecuaciones que describen el modelo lineal son:

$$x_1' = -\frac{1}{L}x_2 + \frac{V_d}{L}k + \frac{\widehat{V}_d}{L}u \quad [25]$$

$$x_2' = \frac{1}{C}x_1 - \frac{1}{RC}x_2 \quad [26]$$

El valor del voltaje de salida v está dado por $k * V_d$, al sustituir este valor en las ecuaciones (25) y (26), pueden ser expresadas en el modelo lineal en espacio-estados.

$$\begin{bmatrix} x_1' \\ x_2' \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & -\frac{1}{L} \\ \frac{1}{C} & -\frac{1}{RC} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_1 \\ x_2 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} V_d \\ \frac{1}{L} \\ 0 \end{bmatrix} [\hat{k}] + \begin{bmatrix} k \\ \frac{1}{L} \\ 0 \end{bmatrix} [\hat{u}] \quad [27]$$

$$y = [0 \quad 1] \begin{bmatrix} x_1 \\ x_2 \end{bmatrix} \quad [28]$$

Escribiendo de manera escalar las ecuaciones de espacio estados del sistema linealizado, y aplicando la transformada de Laplace, se puede obtener las funciones de transferencia que definen el comportamiento del convertidor.

La función de transferencia $G_1(s)$ de la ecuación (29) representa la relación del ciclo de trabajo con respecto al voltaje de salida del convertidor.

$$G_1(s) = \frac{\hat{v}(s)}{\hat{u}(s)} = \frac{v}{U} * \frac{\frac{1}{LC}}{s^2 + \frac{1}{RC}s + \frac{1}{LC}} \quad [29]$$

La función de transferencia $G_2(s)$ en la ecuación (30) representa la relación del voltaje de salida, con relación al voltaje de entrada.

$$G_2(s) = \frac{\hat{v}(s)}{\hat{v}_d(s)} = U * \frac{\frac{1}{LC}}{s^2 + \frac{1}{RC}s + \frac{1}{LC}} \quad [30]$$

2.3.3. BANCO DE BATERÍAS

Los modelos de baterías existentes se pueden clasificar en cinco categorías como presenta (Peña & Santos, 2016) en la Tabla 3.

Tabla 3. Ventajas y desventajas de los modelos de baterías existentes.

Tipo de Modelo	Ventajas	Desventajas
Electroquímico	Seguimiento de SOC, SOH y dinámica V-I.	Alta complejidad, alta demanda computacional.
Analítico	Simple. Describe procesos de descarga a corriente constante.	Incapaz de capturar la característica V-I ni otros efectos.
Estocástico	Puede modelar procesos no lineales, buen seguimiento de SOC.	Alta complejidad, difícil implementación.
Inteligencia Computacional	Buen seguimiento de SOC y SOH.	Complejos y difíciles de implementar.
Circuito Eléctrico	Sencillos, capacidad de modelar o no fenómenos externos y de envejecimiento además de la dinámica. V-I y seguimiento de SOC	Deben modificarse para modelar fenómenos externos y pueden complicarse rápidamente.

(Peña & Santos, 2016)

Para el estudio se utiliza el modelo de batería desarrollado por Tremblay (Tremblay & Dessaint, 2009), el cual se expone en la Figura 23. Este modelo emplea una fuente de tensión controlada, que simula el comportamiento exponencial del voltaje de las baterías, y una resistencia en serie, utilizada para modelar la caída de tensión y la resistencia interna de la batería (Valverde, 2013), (Peña & Santos, 2016).

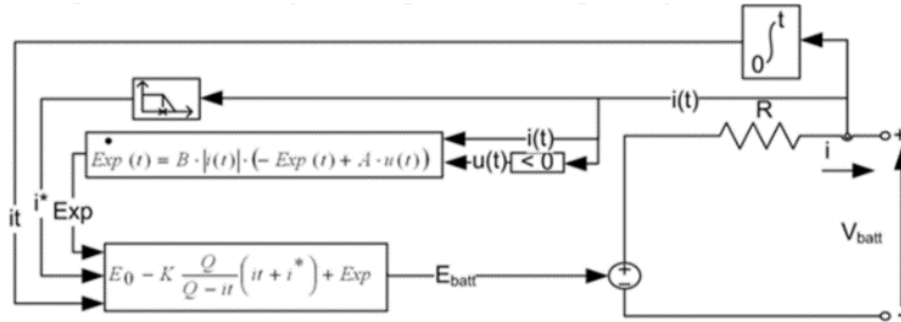


Figura 23. Esquema circuitual de la batería, propuesta en (Tremblay & Dessaint, 2009).

El proceso de descarga de la batería está definido por la ecuación (31).

$$V_{bat} = E_o - R \cdot i - K \frac{Q}{Q - it} [it + i'] + Exp_{d_t}(t) \quad [31]$$

Siendo:

V_{bat} el voltaje en los bornes de la batería

E_o constante que indica el voltaje interno de la batería, cuando no circula ninguna corriente a través de la batería

K representa la constante de polarización

Q es la capacidad de la batería, e

i es la corriente de la batería

it representa la integral de la corriente durante la carga/descarga de la batería

i' componente de baja frecuencia de i

R representa la Resistencia interna

La función $Exp_{d_t}(t)$ esta determinanda por la ecuación (32).

$$Exp_{d_t}(t) = -B * |i(t)| Exp_{d_{t-1}}(t) \quad [32]$$

Donde B es una constante inversa de carga.

Finalmente, la resistencia de polarización indica el incremento de rápido de tensión cuando se alcanza un estado de carga alto de la batería (Peña & Santos, 2016).

$$K \frac{Q}{Q - it} \quad [33]$$

2.3.4. INVERSOR DE POTENCIA

Debido a que un inversor de potencia DC/AC presenta un comportamiento no lineal, se busca linealizar en torno a un punto de operación, con el circuito equivalente que se obtiene se realiza un análisis de pequeña señal y de gran señal. Para linealizar, se sustituyen los elementos no lineales (interruptores), por un circuito equivalente lineal llamado “Modelo del Conmutador PWM”. En la Figura 24 se presenta el esquema circuital, con el que se obtendrá el modelo matemático.

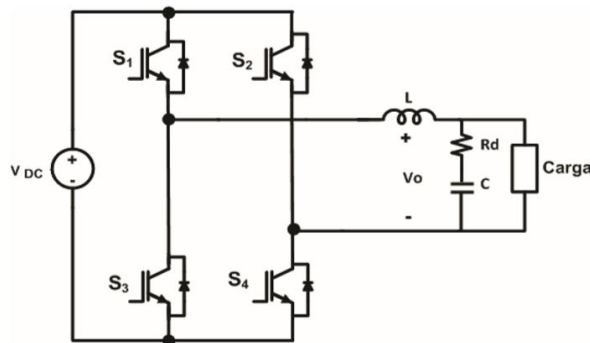


Figura 24. Esquema eléctrico para un inversor de puente completo (Ortega, Carranza, Sosa, García, & Hernández, 2016).

“La dinámica del inversor es similar a la de un circuito Buck, considerando que en el punto de operación se maneja señales periódicas variantes en el tiempo de 60Hz, que depende del ciclo de trabajo (d), del voltaje de salida (V_o) y de la corriente en el inductor del filtro de salida del inversor (I_L)” (Ortega, Carranza, Sosa, García, & Hernández, 2016).

En la ecuación (34) se expone la relación de el voltaje de salida del inversor (V_o), con el voltaje en la entrada (V_{DC}), en términos del ciclo de trabajo d .

$$V_o = V_{DC} * (2 * d - 1) \quad [34]$$

Una variable promediada x , puede ser presentada como $x = X + \hat{x}$. Donde X es el valor de la variable en el punto de operación, y \hat{x} representa un incremento en pequeña señal entorno al punto de operación. Como consecuencia a lo anterior, la ecuación (34) puede reescribirse como:

$$V_o + \widehat{v}_o = (V_{DC} + \widehat{v}_{DC}) * (2 * (D + \widehat{d}) - 1) \quad [35]$$

Al separar los términos en el punto de operación y valores incrementales se tiene:

$$V_o = V_{DC} * (2 * D - 1) \quad [36]$$

$$\widehat{v}_o = \widehat{v}_{DC} * (2 * D - 1) + 2 * V_{DC} * \widehat{d} \quad [37]$$

Así mismo, se presentan las ecuaciones (38) y (39) que relacionan la corriente de entrada y de salida en el punto de operación.

$$I_i = I_L * (2 * D - 1) \quad [38]$$

$$\widehat{i}_i = \widehat{i}_L * (2 * D - 1) + 2 * I_L * \widehat{d} \quad [39]$$

Gracias a las ecuaciones (36) - (39) se presenta un modelo equivalente del punto de operación del inversor en la Figura 25. Donde $D(t)$ es el ciclo de trabajo en el punto de operación y $D'(t) = 2 * D(t) - 1$.

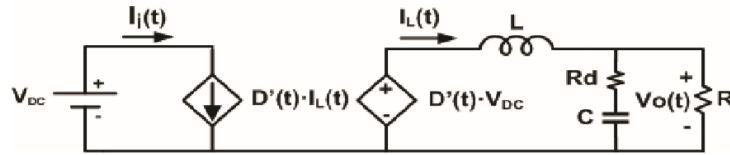


Figura 25. Modelo equivalente en el punto de operación de un inversor (Ortega, Carranza, Sosa, García, & Hernández, 2016)

(Ortega, Carranza, Sosa, García, & Hernández, 2016) expone las ecuaciones que representan la corriente en el inductor, $I_L(t)$, y el ciclo de trabajo, $D(t)$, en el punto de operación:

$$I_L(t) = \frac{\sqrt{2} * V_{oRMS}}{R} * \cos \cos(\omega t) + \frac{\sqrt{2} * V_{oRMS}}{|Z_c|} * \cos(\omega t - \varphi_c) \quad [40]$$

$$D(t) = \frac{1}{2} + \frac{V_{oRMS}}{\sqrt{2} * V_{DC}} * \left(-\frac{\omega * L}{R} * \text{sen}(\omega t) - \frac{\omega * L}{|Z_c|} * \text{sen}(\omega t - \varphi_c) + \cos \cos(\omega t) \right) \quad [41]$$

Donde:

$$Z_c = \sqrt{(R_d)^2 + \left(\frac{1}{\omega * C}\right)^2} \quad [42]$$

$$\varphi = \arctan \left(-\frac{1}{1W * C * R_d} \right) \quad [43]$$

El modelo en pequeña señal se presenta en la Figura 26.

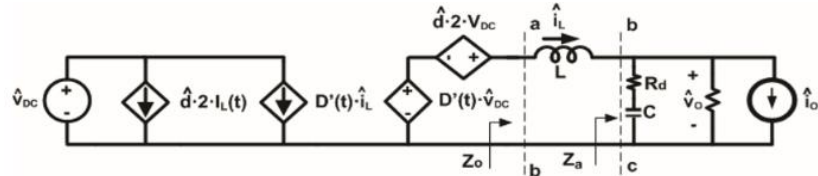


Figura 26. Modelo en pequeña señal del inversor
(Ortega, Carranza, Sosa, García, & Hernández, 2016).

Las funciones de transferencia en lazo abierto de la etapa de potencia que relacionan el voltaje de salida del inversor con el ciclo de trabajo, y corriente del inductor de salida con el ciclo de trabajo según (Ortega, Carranza, Sosa, García, & Hernández, 2016), están representadas a continuación:

$$G_{v_o d}(s) = \frac{\widehat{v}_o}{\widehat{d}} = \frac{2 * V_{DC} * Z_a}{Z_a + s * L} \quad [44]$$

$$G_{i_L d}(s) = \frac{\widehat{i}_L}{\widehat{d}} = \frac{2 * V_{DC}}{Z_a + s * L} \quad [45]$$

Donde Z_a es la impedancia de carga, y V_{DC} es voltaje en la DC_Link. La impedancia Z_a está definida por:

$$Z_a = \left(R_d + \frac{1}{s * C} \right) \quad [46]$$

$$R = \frac{(s * C * R_d + 1) * R}{s * C * (R_d + R) + 1} \quad [47]$$

3. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

La sección explica el comportamiento del sistema didáctico de energía solar, en el que se han realizado pruebas para exponer el funcionamiento de cada uno de sus elementos, hasta contemplar la interacción del sistema en conjunto.

3.1. IMPLEMENTACIÓN DEL MODELO DEL MÓDULO SOLAR

Las ecuaciones descritas en la sección 2.3.1 fueron implementadas como diagramas de bloques en un programa en Matlab-Simulink®, con el objetivo de contemplar el desempeño del módulo solar FV. Este programa permite calcular la curva de funcionamiento del campo fotovoltaico a distintos niveles, en función de la temperatura e irradiancia receptada por el sistema.

Se tomó las siguientes variables para el trazado de las gráficas: temperatura uniforme en toda la superficie del panel, equivalente a 25 grados Celsius; tres valores de irradiancia [100, 500, 1000] (W/m^2); asimismo se consideró los parámetros establecidos por el fabricante, presentes en la Tabla 2.

En la Figura 27 se presenta la curva I-V del panel fotovoltaico generada con el modelo para distintos niveles de irradiancia. El punto de máxima potencia es el punto de inflexión de la curva, señalado por un círculo para una irradiancia de 1000 (W/m^2).

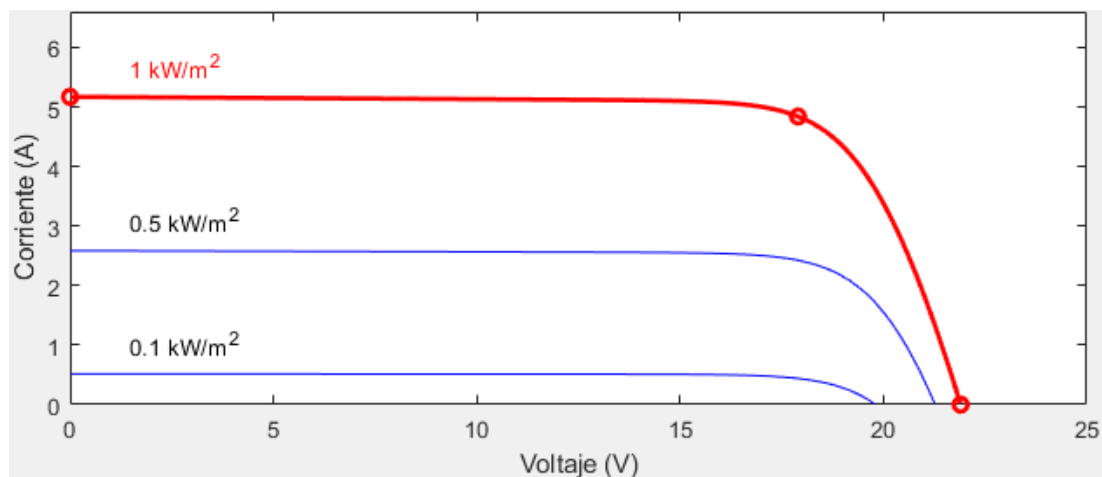


Figura 27. Curva corriente-voltaje con variación de la irradiancia solar.

En la Figura 28 se presenta la curva que relaciona el voltaje con la potencia del panel fotovoltaico para distintos niveles de irradiancia. Al igual que en la curva I-V, el punto máximo de potencia está dado por el punto de inflexión de la curva.

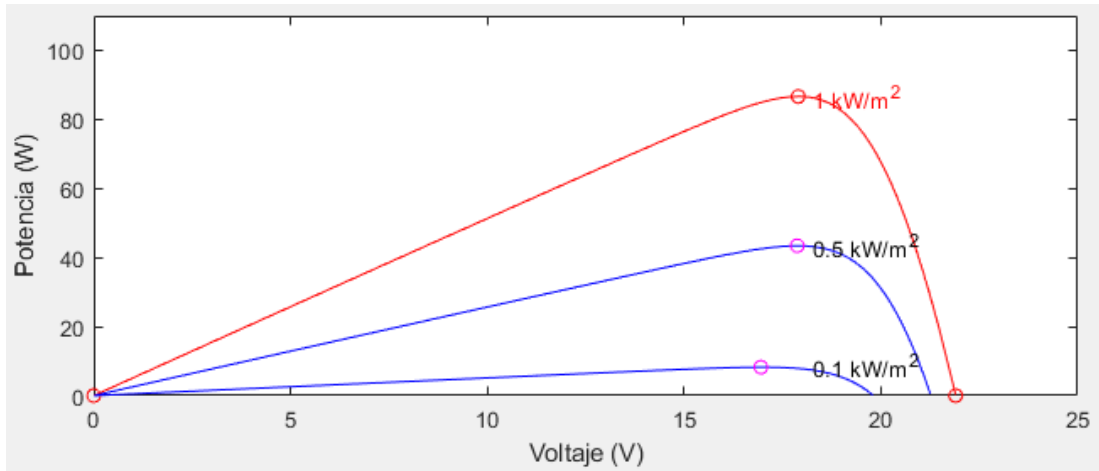


Figura 28. Curva voltaje-potencia con variación de la irradiancia solar.

3.2. VERIFICACIÓN DEL COMPORTAMIENTO DE MÓDULO SOLAR

El desempeño del módulo solar se obtiene por medio del voltaje en circuito abierto (V_{c-a}) y de la corriente en cortocircuito (I_{c-c}).

Para obtener el voltaje en circuito abierto, se mide el voltaje en el módulo fotovoltaico, sin que se encuentre ninguna carga conectada a la salida del módulo. Este valor representa el voltaje máximo de salida que se puede obtener. La corriente en cortocircuito se obtiene al conectar una carga de resistencia cero en la salida del módulo. Este valor indica la corriente máxima de salida que el módulo puede entregar.

Para el caso en estudio, el módulo fotovoltaico está conectado a un simulador solar, que imita la energía solar. Realizando tres pruebas, se tomaron mediciones para conocer el I_{c-c} y el V_{c-a} en condiciones normales e imitando el efecto sombra, para el cuál se cubrieron dos celdas solares juntas, de las treinta y seis que posee el módulo FV, aleatoriamente en cada prueba. Los valores medidos se presentan en la Tabla 4.

Tabla 4. Valores de V_{c-a} e I_{c-c} del módulo FV

Número de Prueba	Número de celdas disponibles	Voltaje en circuito abierto	Corriente en corto circuito
1	36	21.01 V	1.10 A
	34	20.34 V	1.10 A
2	36	21.32 V	1.00 A
	34	20.30 V	1.00 A
3	36	21.20 V	1.00 A
	34	20.32 V	1.00 A
Media	36	21.18 V	1.03 A
	34	20.32 A	1.03 A

Los valores máximos de voltaje y corriente que se puede lograr con el módulo son de 21.32 V y de 1.1 A, respectivamente. Al cubrir dos celdas solares del módulo FV, se observa que disminuye el voltaje máximo de salida llegando a tener un promedio de 20.32V. Esto se debe a que las celdas son extremadamente sensibles a sombras generadas por objetos o por partículas que reposan sobre su superficie. Además, las celdas se encuentran conectadas en serie, por lo que el voltaje que entregan es la suma del voltaje individual de cada una. Como consecuencia las celdas ocultas no trabajan igual que el resto y limitan la sinergia del módulo FV. La corriente máxima de salida se mantiene porque la corriente en un circuito en serie es la misma.

3.3. IDENTIFICACIÓN DE MODELO DE ALMACENAJE DE ENERGÍA

Debido a que no se conocen los parámetros expuestos en las ecuaciones (31)-(33), que reflejan el comportamiento dinámico del banco de baterías, y no son proporcionados por el fabricante, se consideró otro método para la obtención del modelo de este elemento del sistema.

Para la identificación del sistema se analizó el proceso de carga del banco de baterías. Durante este proceso se relacionaron 2 variables, la corriente que es entregada a la batería, y la variación del voltaje en los bornes de esta. La finalidad fue encontrar la respuesta del sistema en lazo abierto, y así obtener su función de transferencia. Se considera un modelo semi-empírico del sistema, porque se trabaja con datos experimentales en cierto rango de su comportamiento, y únicamente se consideran 2 parámetros para su obtención, ignorando variables como la temperatura del sistema, resistencia interna de la batería entre otras.

La Figura 29, muestra la señal de entrada que se le dio al sistema. Como entrada se tiene la corriente que es entregada a la batería, empieza desde un valor de cero, hasta que empieza el proceso. La corriente aumenta a 15 A, proporcionados por el controlador de carga solar, pero disminuye drásticamente hasta 3 A, al valor disminuye porque el controlador proporciona una intensidad de corriente adecuada para la carga de la batería durante la etapa de carga en que se encuentre y, este valor va disminuyendo hasta que el sistema tenga su capacidad de carga completa.

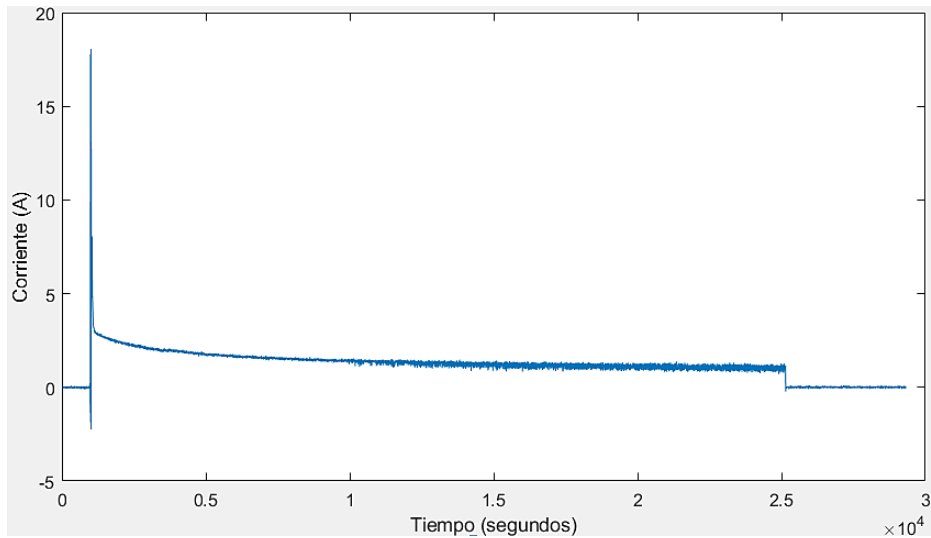


Figura 29. Señal de entrada al sistema en lazo abierto.

En la Figura 30 se presenta la respuesta del sistema ante la entrada de corriente, el banco de baterías comienza con un voltaje de 12.76 V entre sus bornes, una vez que es aplicada la entrada, este voltaje aumenta a los 14.58V, valor que aumenta progresivamente por la existencia de un flujo de corriente. Al final del proceso se desconecta la corriente de carga, por lo que el voltaje desciende hasta un valor de 12.95 V, esto indica que realmente existe un almacenaje de energía en el sistema.

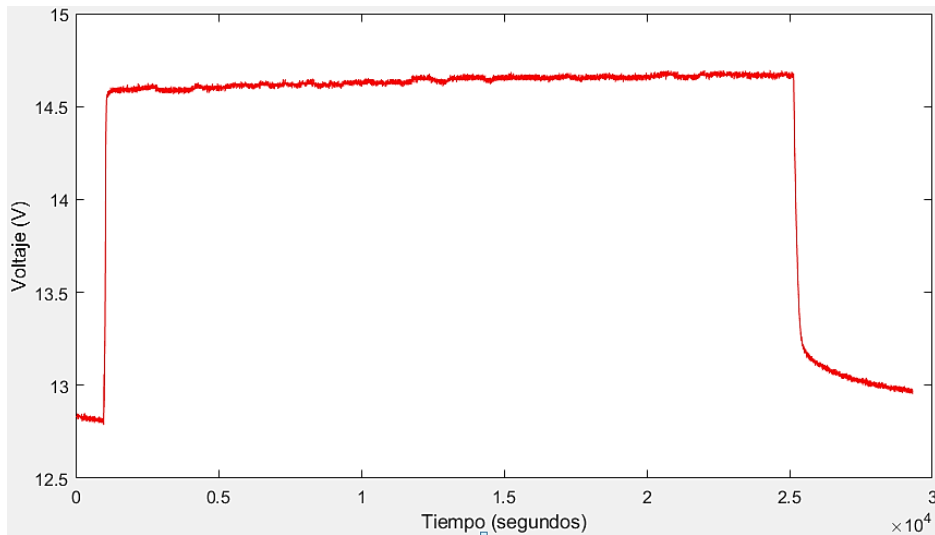


Figura 30. Respuesta del sistema.

Dados los valores de entrada y de la salida del sistema en lazo abierto, se utilizó la herramienta "ident" de Matlab® para obtener la función de transferencia que describe al sistema, presente en la ecuación (48), este modelo es expresado en variables de estado en las ecuaciones por motivos de diseño del controlador para el sistema. En la Figura 31 se exhibe el comportamiento del modelo obtenido con la herramienta ident, ante una entrada tipo escalón.

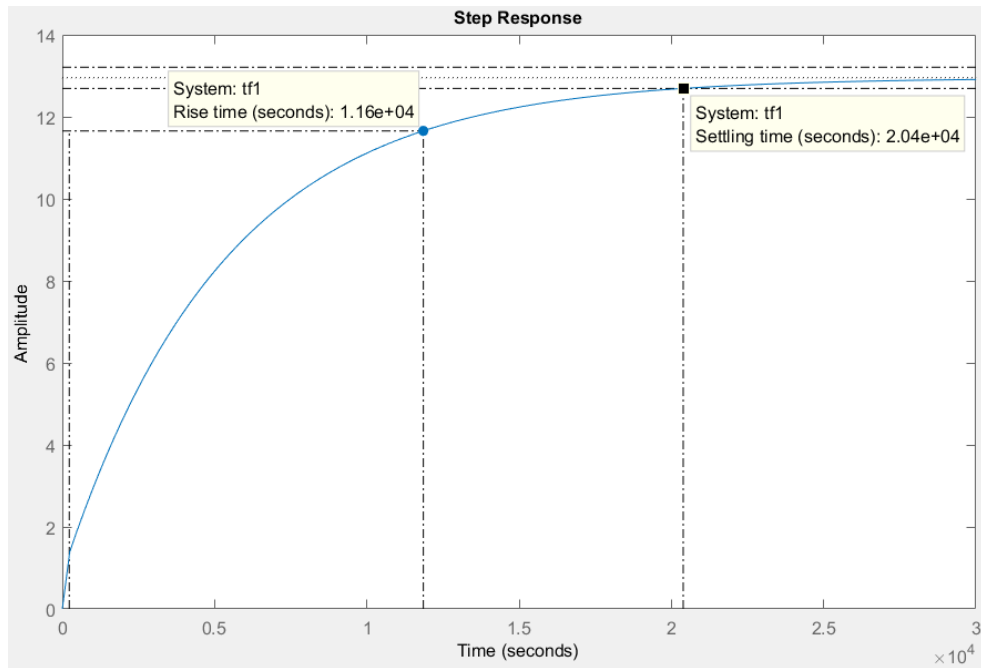


Figura 31. Comportamiento del sistema ante una entrada tipo escalón.

Función de transferencia del banco de baterías:

$$G(s) = \frac{0.05115s + 0.0001404}{s^2 + 0.05768s + 1.084e - 05} \quad [48]$$

Variables de estado del sistema

$$A = \begin{bmatrix} -0.0577 & -1.0840e - 05 \\ 1 & 0 \end{bmatrix} \quad [49]$$

$$B = \begin{bmatrix} 1 \\ 0 \end{bmatrix} \quad [50]$$

$$C = [0.0512 \quad 0.0001] \quad [51]$$

$$D = 0 \quad [52]$$

3.3.1. DISEÑO DEL CONTROLADOR PARA LA BATERÍA

Se aplica la técnica de control óptimo (linear quadratic regulator-LQR) para diseñar un controlador que pueda gestionar la carga de la batería según el modelo semi-empírico expuesto en la ecuación (48).

Dadas las variables de estado expuestas en (49) - (52), se diseñó el regulador de estados. En esta etapa se calcula la matriz de pesos para el estado (Q), la matriz de pesos para la acción de control, y la ganancia de K.

$$Q = C' * C$$

$$Q = \begin{bmatrix} 0.0026 & 0 \\ 0 & 0 \end{bmatrix} \quad [53]$$

$$R = 1 \quad [54]$$

$$K = [0.0211 \quad 0.0001] \quad [55]$$

En la Figura 32 se expone el diagrama de bloques del sistema solo como regulador.

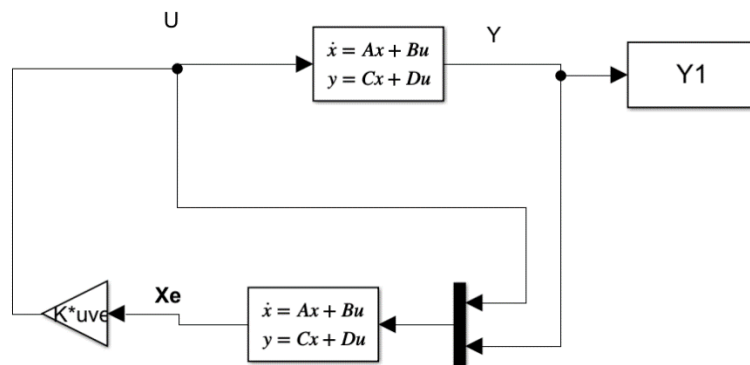


Figura 32. Diagrama de bloques del sistema como regulador.

A continuación, se realizó un seguimiento con integrador, en el que presentan las matrices:

$$Aa = \begin{bmatrix} -0.0577 & 0 & 0 \\ 1 & 0 & 0 \\ -0.0512 & -0.0001 & 0 \end{bmatrix} \quad [56]$$

$$Ba = \begin{bmatrix} 1 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} \quad [57]$$

$$Qa = \begin{bmatrix} 0.0026 & 7.1815e-06 & 0 \\ 7.1815e-06 & 1.9712e-08 & 0 \\ 0 & 0 & 1000 \end{bmatrix} \quad [58]$$

$$ka = [1.7453 \quad 0.0049 \quad -31.6228] \quad [59]$$

$$ka = [1.7453 \quad 0.0049] \quad [60]$$

$$Ki = 31.6228 \quad [61]$$

Creación de nuevas matrices de pesos Q y R para el cálculo de la matriz L.

$$Qo = \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \quad [62]$$

$$Ro = 0.1000 \quad [63]$$

$$L = \begin{bmatrix} 2.2350 \\ 15.9232 \end{bmatrix} \quad [64]$$

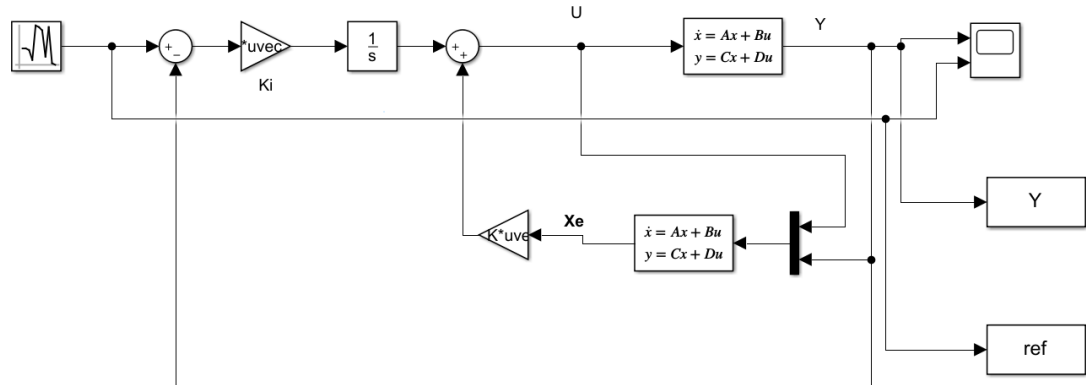


Figura 33. Diagrama de bloques del sistema con control óptimo

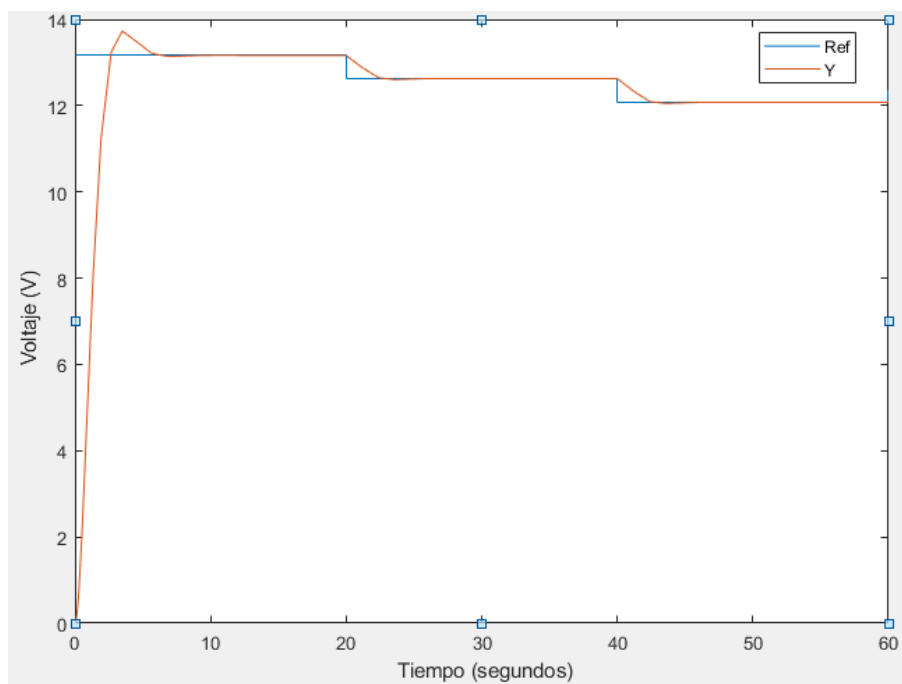


Figura 34. Respuesta del sistema con control lqr ante diferentes entradas.

La Figura 34 presenta el comportamiento del sistema ante tres entradas diferentes en un tiempo de simulación de 60 segundos. Donde la línea azul representa la entrada, y la línea tomate indica el comportamiento de la salida (Y) del sistema.

Se puede apreciar que el sistema con el controlador se estabiliza en un tiempo de establecimiento (t_s) menor a 10 segundos, y un sobreimpulso máximo (mp) menor al 5%.

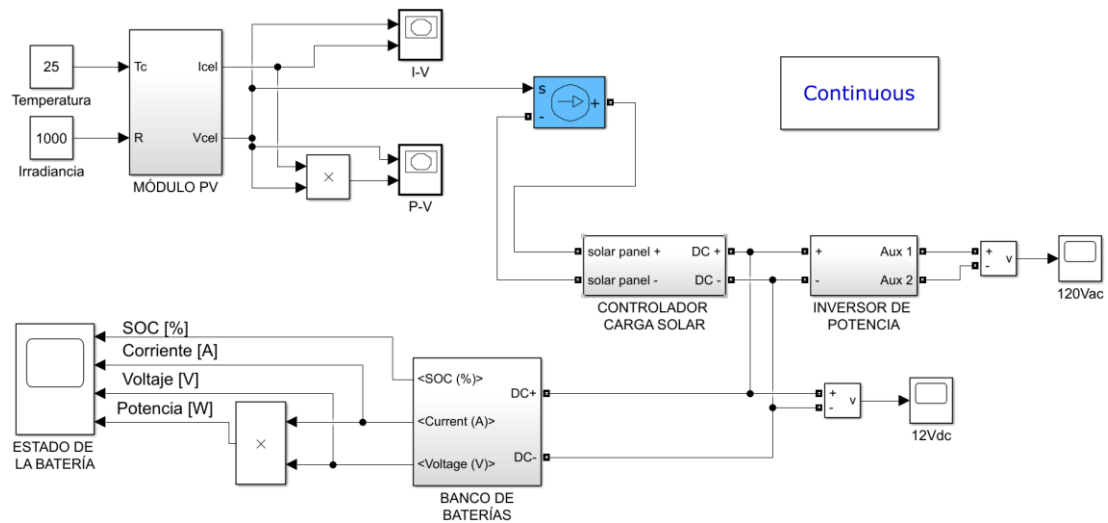


Figura 35. Modelo completo de la microrred en Simulink ®

En la Figura 35 se indica el modelo completo de la microrred, en la que se muestran sus diferentes modelos interconectados.

El Módulo PV contiene el modelo del panel fotovoltaico, tiene como entradas la temperatura en la superficie del panel, y la irradiancia existente en el ambiente, como salida se obtiene la potencia generada por el panel. El controlador de carga solar, decide el reparto de potencia entre los diferentes equipos de la microrred (banco de baterías e inversor de potencia). La potencia a la salida del controlador, ingresa al bloque del inversor de potencia, como salida de este modelo se tiene un voltaje en AC. Asimismo, la salida del controlador es la entrada para el bloque del banco de baterías, que presenta el modelo de la batería plomo-ácido modelada.

3.4. COMPARATIVA DE MODELO CON PRUEBAS REALIZADAS

Para validar el modelo del sistema de almacenaje de energía presente en la ecuación (48), se simuló la prueba del proceso de carga solar expuesta en la sección 3.3., y se comparó los resultados obtenidos con las mediciones realizadas.

Al igual que en la prueba de carga, se añade el flujo de corriente de la Figura 29 en la entrada del modelo, y se exhibe como respuesta los cambio de voltaje que sufre la planta en lazo abierto.

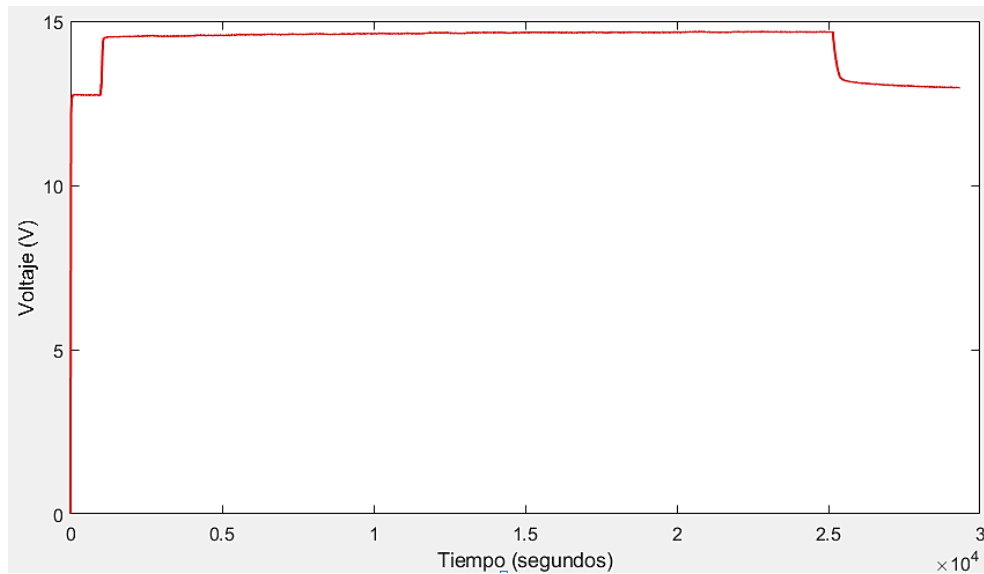


Figura 36. Respuesta del sistema en simulación.

En la Figura 36 se presenta la respuesta del modelo ante la entrada de corriente, a diferencia de los valores medidos, el sistema empieza con un valor de 0V, el cual se eleva a 12.72V para representar el voltaje presente en el banco de baterías. La respuesta asciende a un valor de 14.49V conforme se inyecta corriente en la señal de entrada en la simulación. Finalmente, el valor de la corriente regresa a cero, y el voltaje desciende a un valor de 12.95 V, por lo que el modelo representa el proceso de almacenaje de energía.

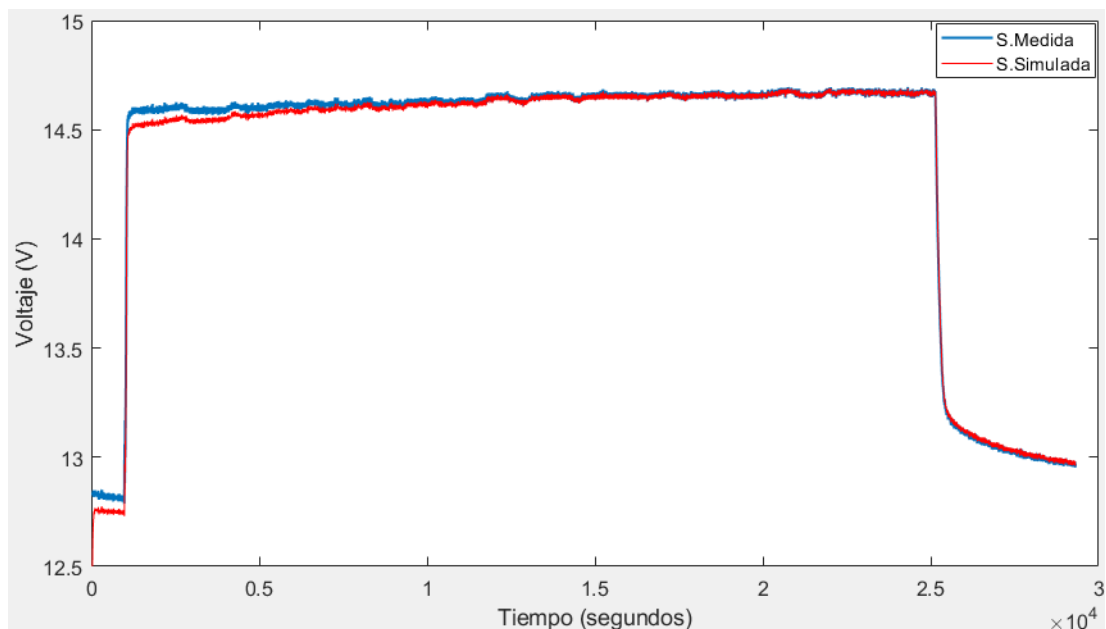


Figura 37. Comparativa de datos medidos con datos simulados.

En la Figura 37 se sobrepone las gráficas de los valores medidos de respuesta del sistema (color azul) manifestados en la Figura 30, con los valores obtenidos durante la simulación (color rojo). A primera instancia se aprecia una notable similitud en su comportamiento. Se realiza un análisis estadístico

multivariante utilizando el método de análisis de Procrustes directamente en el software Matlab®. Este análisis devuelve una medida de desimilitud entre los datos a comparar (MathWorks, 2019).

Se compararon los 29312 datos de hitos correspondientes a la señal medida, y la misma cantidad de datos de la señal obtenida por simulación. La medida de desimilitud atribuida es igual a 0.0371. Esto implica que el modelo matemático presentado tiene un comportamiento 96.29% idéntico al de la señal medida.

La similitud no es igual al 100% debido a que es un modelo semi-empírico, como se mencionó en la sección 3.3. no se considera todas las variables que afectan al sistema. Además, parámetros como el ruido en los valores medidos, la resolución y la tolerancia de los sensores afectaron en la obtención del modelo. Sin embargo, el porcentaje de similitud es aceptable para el proceso de carga en bruto para el sistema de almacenamiento de energía solar.

3.5. CONTROL DE CARGA SOLAR

Para acondicionar el voltaje y corriente proveniente del módulo solar, y proporcionar un correcto y eficiente proceso de carga en el banco de baterías se utiliza un controlador de carga.

Para estudiar el funcionamiento real del sistema, se realizó una prueba, posicionando el panel solar en el exterior, en la terraza del bloque G del campus occidental UTE, durante 9 horas seguidas. La prueba se realizó el 26 de julio del 2019, en un horario de 7h00 hasta las 16h00. La prueba realizada muestra valores experimentales del sistema para un día soleado. Los valores de radiación solar obtenidas por la secretaría del ambiente, con el sensor ubicado en el Colegio San Gabriel, se presentan en la Tabla 5.

Tabla 5. Radiación solar 26/07/2019

TIEMPO INICIAL (h)	TIEMPO FINAL (h)	RAD/SOLAR (W/m ²)
7h00	8h00	277,10
8h00	9h00	508,74
9h00	10h00	681,56
10h00	11h00	685,43
11h00	12h00	654,82
12h00	13h00	681,00
13h00	14h00	674,83
14h00	15h00	472,13
15h00	16h00	232,99

(Meteored, 2019)

En la Tabla 6. Se presentan los valores promedio de potencia suministrada por el módulo solar fotovoltaico, al banco de baterías durante la prueba. Con esto, se pudo diagnosticar el comportamiento del sistema.

Tabla 6. Valores obtenidos de potencia del panel

TIEMPO INICIAL (h)	TIEMPO FINAL (h)	Potencia (W)
7h00	8h00	15,3401
8h00	9h00	35,2727
9h00	10h00	55,1726
10h00	11h00	43,8376
11h00	12h00	34,2694
12h00	13h00	49,9459
13h00	14h00	27,9752
14h00	15h00	20,5053
15h00	16h00	17,6969

Asimismo, se afirma que gracias a la potencia suministrada por el módulo FV, el banco de baterías está siendo cargado, porque existe un flujo de corriente hacia la batería, que demuestra el proceso de carga de esta, presentado en la Figura 38. También se pueden apreciar los picos, y variantes en la corriente, debido a la variación de la irradiancia en el transcurso de tiempo de la prueba, y al efecto sombra provocado por nubes u obstáculos presentes en el cielo.

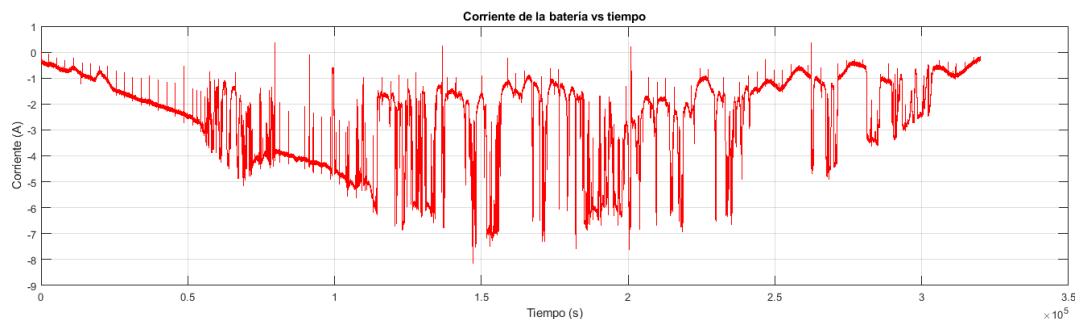


Figura 38. Corriente entregada a la batería por el panel solar

En la Figura 39 se indica la variación en el comportamiento del voltaje de la batería debido a la corriente de carga proporcionada por el módulo solar.

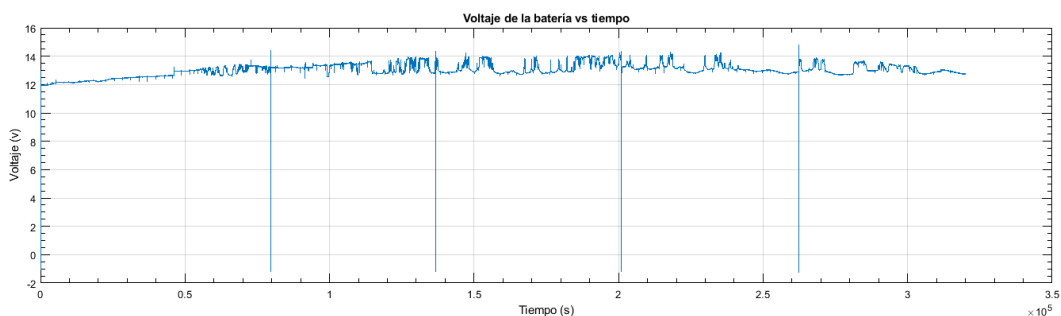


Figura 39. Voltaje entregado a la batería por el panel solar

3.6. INTERACCIÓN DEL SISTEMA CON CARGAS EN DC

Como dispositivos de consumo energético se utilizaron dos lámparas incandescentes de 12V y 25W, cada una. La fuente de alimentación entrega inicialmente 12.6V.

Los dispositivos de consumo energético empleados fueron dos lámparas incandescentes de 12V y 25W. Se realizó un arreglo de conexión de cargas en DC, conectándolas en paralelo. Para una conexión en paralelo las cargas se colocaron a la salida de la barra de distribución de energía, como se presenta en la Figura 40.

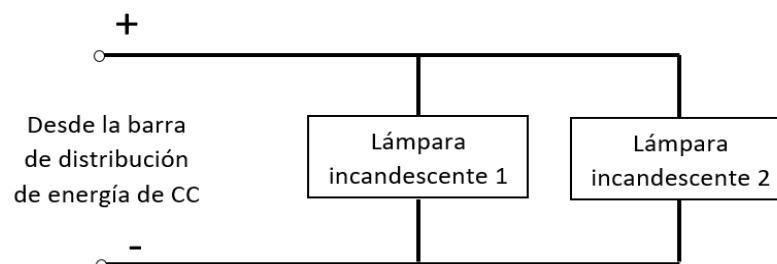


Figura 40. Conexión en paralelo de lámparas en DC
(Lab-Volt, 2012)

Durante la prueba, la fuente de alimentación proporcionó inicialmente 12.6V. Se encendió la lámpara 1 durante un tiempo de 300 segundos, la corriente que consumida por esta carga fue de 2.1 [A]. A continuación, se encendió la lámpara 2, consiguiendo así, un consumo de corriente total es de 4.2 A, presentado en la Figura 41.

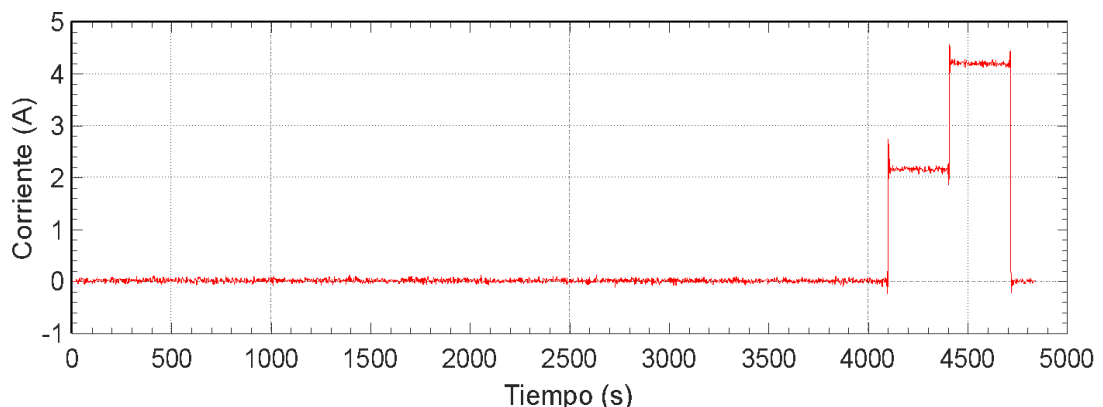


Figura 41. Corriente consumida por las lámparas en DC

En la Figura 42 se expone la potencia consumida por cada carga, teniendo así, un consumo de 23.5 W por cada lámpara, y 47 W en total.

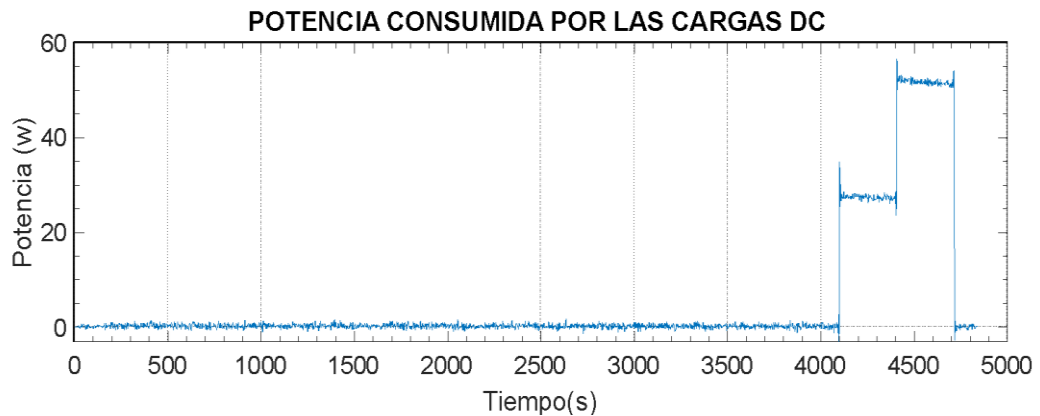


Figura 42. Potencia absorbida por las lámparas en DC

3.7. CONTROL DE CARGA POR DERIVACIÓN

La resistencia de descarga disipa la energía en forma de calor. Con el controlador por derivación se cierra el circuito para conectar la resistencia de descarga al banco de baterías, cuando exista un excedente de energía renovable. También se controla la potencia en la carga, variando el voltaje, si es necesario

Debido a que el tipo de control por derivación se utiliza con mayor frecuencia con aerogeneradores, en el caso de estudio, su funcionamiento está limitado por la corriente de entrega de 1A del módulo solar. Como consecuencia trabaja por un lapso de tiempo de 2 segundos, ya que el excedente de energía renovable es reducido. El controlador de carga entrega hasta 0.6V y 1.5A., La potencia absorbida por la resistencia de descarga es de 0.9 W.

3.8. INFORMACIÓN ADICIONAL

El equipo se beneficia de normas de seguridad y de norma eléctrica NEMA/ANSI que define el color y la simbología de cableado que debe ser utilizado en las conexiones de la microrred. Así mismo el cableado es “plug & play” y consta de normas de seguridad AWG que definen el calibre del cable dependiendo el uso y corrientes máximas toleradas.

La microrred cuenta con sistemas de protección de sobrecargas que deben ser conectados en todas las pruebas que se realicen (Lab-Volt, 2012).

Los valores obtenidos en las pruebas realizadas pueden variar dependiendo de la ubicación de la microrred.

4. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

CONCLUSIONES

- El desempeño del módulo solar fotovoltaico se vio afectado por los parámetros de irradiancia, espectro y temperatura. En esencia la corriente máxima que el panel puede proporcionar depende del área de las celdas, y debido a que las celdas del módulo se encuentran conectadas en serie, el voltaje máximo que se puede obtener depende del material con el que estén fabricadas.
- Se estableció un modelo semi-empírico del sistema con una similitud del 96.29%, porque se trabajó con datos experimentales dentro de rangos específicos del comportamiento de los elementos, considerando solamente parámetros esenciales del sistema, obteniendo así una relación de simplicidad y precisión en el modelo.
- El modelo matemático de la microrred contribuye a la ejecución de simulaciones que demuestran el comportamiento del sistema en condiciones de referencia establecidos, además permite el desarrollo y aplicación de técnicas de control, que permiten mejorar y optimizar su funcionamiento.
- No se realizaron pruebas físicas, ni implementación de la estructura de control desarrollada para gestionar la energía renovable, porque dentro del alcance del presente trabajo se estipula que todo el estudio, se realizará únicamente mediante simulación en software de entorno de diagrama de bloques. Además para la implementación del control se necesita el diseño y desarrollo de un convertidor DC-DC, lo que está fuera del alcance de este proyecto.
- La potencia de salida del panel solar se ve afectada por obstáculos periféricos con el potencial de generar sombra sobre este ya que las celdas solares son extremadamente sensibles a partículas que obstaculicen el paso de luz solar. Además su conexión en serie ocasiona una dependencia entre celdas que pueden limitar la potencia.
- Las pruebas y simulaciones de energía eólica no se realizaron debido a la carencia de la turbina de la microrred.

RECOMENDACIONES

- Se recomienda la utilización de sensores que sean de mayor resolución para obtener una lectura más exacta de los voltajes y corrientes del sistema, y consecuentemente tener un modelo y un control más exacto.
- Previo a la realización de pruebas en la microrred, se recomienda conectar todas las protecciones, para evitar el daño por sobrecargas el banco de baterías del sistema, y en los circuitos electrónicos de sus componentes. Cuando se realicen las pruebas, se debe asegurar un lugar fijo para la

microrred con las condiciones adecuadas para evitar lecturas de valores erróneos.

- Se aconseja utilizar cargas de bajo consumo energético, que prolonguen la duración de la batería, y mejoren el rendimiento del sistema.
- Se recomienda utilizar el modelo de almacenaje de energía únicamente para el proceso de carga en bruto del banco de baterías, puesto que los procesos de carga por absorción y flotante tienen un comportamiento diferente.

BIBLIOGRAFÍA

- Allegro. (2019, septiembre 20). ACS712. From Fully Integrated, Hall Effect-Based Linear Current Sensor: <https://www.sparkfun.com/datasheets/BreakoutBoards/0712.pdf>
- Boylestad, R., & Nashelsky, L. (2009). *Electrónica: Teoría de Circuitos y Dispositivos Electrónicos* (Décima ed.). México: Prentice Hall.
- Charre, S., Alcalá, J., López, N., & Durán, M. (2014). *Scielo*. From Sistema didáctico de control de presión: https://scielo.conicyt.cl/scielo.php?pid=S0718-50062014000500005&script=sci_arttext
- Deutscher, V. (2004). *Design methodology for mechatronic systems*. Düsseldorf: VDI-RICHTLINIEN.
- Enriquez, G. (2011). *Elementos de Protección de Sistemas Eléctricos*, . México: Limusa.
- Espiñeira, S. (2016, Julio). *Una aplicación de la enseñanza efectiva: Las estaciones de aprendizaje*. From https://cvc.cervantes.es/ensenanza/biblioteca_ele/asele/pdf/16/16_0731.pdf
- Esteban, I. (2014, Mayo 17). Estrategias de negocio para la medición inteligente acoplando energías renovables.
- Fossati, J. P. (2011). Revisión bibliográfica sobre micro redes inteligentes. *Memoria de trabajos de difusión científica y técnica*, 9, 13-20.
- García Sánchez, L., & Fernando, V. W. (2015, Febrero 12). *Universidad del Valle*. From Biblioteca Digital: <http://hdl.handle.net/10893/8021>
- Green, M. (1982). *Solar cells. Operating principles, Technology and System Applications*. Neva Jersey: Prentice-Hall.
- Hernández, J., Trujillo, C., & Vallejo, W. (2013). Modelo de un sistema fotovoltaico . *Tecnura*, 17, 26-34.
- Juan D. Gil1, A. R.-A., Roca, L., Zaragoza, G., Berenguel, M., & Guzmán, J. L. (2015). CONTROL DE PLANTAS DE DESTILACIÓN POR MEMBRANAS. *Actas de las XXXVI Jornadas de Automática*, 937-943.
- Lab-Volt. (2012). *Familiarización con el Sistema Didáctico y Seguridad*. Canadá: Lab-Volt.
- Lab-Volt. (2012). *Sistema Didáctico de Energía Solar y Eólica "Modulo Solar"*. Canadá: Lab-Volt.
- Lab-Volt. (2012). *Sistema Didáctico de Energía Solar y Eólica "Sistemas Solares y Eólicos"*. Canadá: Lab-Volt.
- Llano, M. M. (2015). La Micro-Red Inteligente: una ciudad eficiente, en miniatura. *Universitas Científica*, 18, 24-29.
- MathWorks. (2019, 11 1). *Procrustes*. From Análisis de Procrustes: <https://la.mathworks.com/help/stats/procrustes.html>

- Meteored. (2019, Julio 26). *Meteored*. From https://www.meteored.com.ec/tiempo-en_Quito-America+Sur-Ecuador-Pichincha--1-20242.html?d=meteogramas7
- Miranda, A., Gonzáles, A., Guzmán, R., & Ibarra, O. (2012). Desarrollo de un horno solar para el secado de plantas y vegetales usando control difuso. *Actauniversitaria*, 14-19.
- Ortega, R., Carranza, O., Sosa, J., García, V., & Hernández, R. (2016). Diseño de controladores para inversores monofásicos operando en modo isla dentro de una microrred. *Revista Iberoamericana de Automática e Informática industrial*, 13(1), 115-126.
- Peña, A., & Santos, A. (2016). *Diseño E Implementación De Un Emulador de Baterías de Plomo-Ácido de Propósito General*. Bogotá: Universidad Distrital Francisco José de Caldas .
- Quiroga, L. (2010). *Modelado de Inversores Senoidales Basados en Convertidores cd-cd*. Mexico: UNAM.
- Rashid, M. H. (2004). *Electrónica de potencia: circuitos, dispositivos y aplicaciones* (Tercera ed.). México: Pearson Educación.
- Real Academia Española. (2011). *Diccionario de la lengua castellana*. Madrid: D. Joachin Ibarra.
- Sun, Y., Li, S., Lin, B., Fu, X., Ramenzani, M., & Jaithwa, I. (2016). Artificial Neural Network for Control and Grid Integration of Residential Solar Photovoltaic Systems . *IEEE*.
- Torcida, S., & Perez, I. (2012). Análisis de Procrustes y el estudio de la variación morfológica/ Procrustes analysis and the study of morphological variation. *REVISTA ARGENTINA DE ANTROPOLOGÍA BIOLÓGICA*, 14(1), 131-141.
- Tremblay, O., & Dessaint, L. (2009). Experimental Validation of a Battery Dynamic Model for EV Applications. *Journal*, 3, 289-298.
- Tumbaco, A., & Viña, R. (2015). *Universidad Politécnica Salesiana*. From Diseño e implementación de una planta didáctica industrial con aplicaciones para el control de nivel en un reservorio, para el laboratorio de automatización industrial: <http://dspace.ups.edu.ec/handle/123456789/13455>
- Valverde, L. (2013). Gestión de Energía en Sistemas con Fuentes renovables y Almacenamiento de energía basado en Hidrogeno Mediante control predictivo. *Tesis doctoral*.
- Vargas, I., Pérez, J., & Cota, J. (2015). Control de un convertidor CD-CD tipo buckpor medio del microcontrolador ATMEGA328. *Cultura Científica y Tecnología*, 55(1), 226-237.
- Vázquez, J. C. (2016). *Estudio de la situación actual de las smart grids*. Cantabria.