

**DISEÑO Y SIMULACIÓN DE UNA ESTRATEGIA DE CONTROL PARA  
REGULACIÓN DE TENSIÓN EN UN SISTEMA DE MICROGENERACIÓN  
FOTOVOLTAICO MONOFÁSICO DE BAJA POTENCIA**

**CRISTHIAM JESID GUTIÉRREZ LOZANO  
GESLEY GEYN TARAZONA GUERRERO**

**UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER  
FACULTAD DE INGENIERÍAS FÍSICO-MECÁNICAS  
ESCUELA DE INGENIERÍA ELÉCTRICA, ELECTRÓNICA Y DE  
TELECOMUNICACIONES  
BUCARAMANGA**

**2014**

**DISEÑO Y SIMULACIÓN DE UNA ESTRATEGIA DE CONTROL PARA  
REGULACIÓN DE TENSIÓN EN UN SISTEMA DE MICROGENERACIÓN  
FOTOVOLTAICO MONOFÁSICO DE BAJA POTENCIA**

**CRISTHIAM JESID GUTIÉRREZ LOZANO  
GESLEY GEYN TARAZONA GUERRERO**

**Trabajo de grado presentado como requisito parcial para optar al título de  
Ingeniero Electrónico**

**Director**

**RICARDO ALZATE CASTAÑO, PhD**

**Co-directora**

**MARÍA ALEJANDRA MANTILLA, MSc**

**UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER  
FACULTAD DE INGENIERÍAS FÍSICO-MECÁNICAS  
ESCUELA DE INGENIERÍA ELÉCTRICA, ELECTRÓNICA Y DE  
TELECOMUNICACIONES  
BUCARAMANGA**

**2014**

## **DEDICATORIA**

A Dios todopoderoso que me bendijo con nuevos días de vida para llevar a cabo esta etapa de mi formación profesional.

A mi madre Cecilia y mi padre Hermes quienes con su inmenso apoyo, su inagotable paciencia me llevaron por el camino correcto.

A mis hermanos quienes con buenos consejos y palabras de aliento tomaron parte importante de este proyecto de vida.

**Cristhiam**

A Dios, quien produce así el querer como el hacer, por su buena voluntad e infinita misericordia.

A mis padres, hermanas y hermano, todos mis logros son suyos.

A mis amigas, amigos y todos los que de alguna manera han aportado en la construcción de este logro, gracias infinitas.

**Gesley T.**

## **AGRADECIMIENTOS**

A la UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER y de manera especial a la escuela de ingeniería eléctrica, electrónica y de telecomunicaciones, por brindarnos las herramientas y espacios para trabajar durante este proceso académico.

A nuestro director, el profesor Ricardo Alzate Castaño por guiarnos a lo largo de este proceso, por su paciencia, colaboración y entrega que permitieron el total y satisfactorio desarrollo del proyecto.

A María Alejandra Mantilla, codirectora de este proyecto, por su ayuda y disposición durante este trabajo.

A nuestros compañeros en general por los momentos compartidos a lo largo de esta etapa.

**Cristhiam y Gesley**

## CONTENIDO

	<b>pág.</b>
INTRODUCCIÓN .....	17
1. PROBLEMA DE INVESTIGACIÓN .....	18
1.1 PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA .....	18
1.2 JUSTIFICACIÓN .....	18
1.3 OBJETIVOS .....	20
1.3.1 Objetivo general .....	20
1.3.2 Objetivos específicos. ....	20
2. MARCO DE REFERENCIA .....	21
2.1 MARCO TEÓRICO .....	21
2.1.1 Sistema fotovoltaico .....	21
2.1.2 Sistemas conectados a la red .....	22
2.1.3 Sistemas autónomos (Stand alone) .....	23
2.1.4 Sistemas híbridos .....	24
2.2 ELEMENTOS BÁSICOS DE UN SISTEMA FOTOVOLTAICO. ....	24
2.2.1 Módulos fotovoltaicos .....	25
2.2.2 Convertidor DC-DC .....	27
2.2.3 Convertidor DC-AC .....	28
2.2.4 Baterías .....	29
2.2.5 Regulador de carga .....	30
2.3 PROCESO BASE PARA DIMENSIONAR UN SISTEMA FOTOVOLTAICO MONOFÁSICO DE BAJA POTENCIA .....	30
2.3.1 Diseño del sistema fotovoltaico autónomo .....	30
2.3.2 Condiciones de operación .....	31
2.4 SELECCIÓN DE DISPOSITIVOS COMERCIALES .....	34
2.4.1 Selección del panel .....	34

2.4.2 Selección del regulador.....	35
2.4.3 Selección de las baterías .....	36
2.4.4 Selección del inversor .....	38
3. DISEÑO DEL SISTEMA DE GENERACIÓN FOTOVOLTAICO MONOFÁSICO DE BAJA POTENCIA.....	40
3.1 MODELO DEL PANEL FOTOVOLTAICO.....	40
3.2 MODELO DEL CONVERTIDOR DC-DC.....	42
3.3 MODELO DEL INVERSOR.....	44
3.4 ACOPLAMIENTO DE MODELOS Y ASIGNACIÓN DE PARÁMETROS.....	46
3.4.1 Acople de subsistemas .....	46
3.4.2 Asignación de parámetros en subsistema de panel solar .....	47
3.4.3 Asignación de parámetros en subsistema convertidor DC-DC .....	47
3.4.4 Asignación de parámetros en subsistema inversor.....	49
4. AJUSTE DE RANGO PARA LA SELECCIÓN DEL CONTROLADOR.....	53
4.1 AJUSTE DE RANGOS.....	53
4.2 SELECCIÓN DE GANANCIA PROPORCIONAL.....	57
4.3 SELECCIÓN DE GANANCIA INTEGRAL.....	60
4.4 SELECCIÓN DE GANANCIA DERIVATIVA .....	62
4.5 CONTRASTACIÓN SIMULADOR COMERCIAL Vs. MODELO MATEMÁTICO .....	64
5. RECOMENDACIONES, CONCLUSIONES Y TRABAJO FUTURO.....	66
5.1 CONCLUSIONES .....	66
5.2 RECOMENDACIONES Y TRABAJO FUTURO .....	67
REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	68
BIBLIOGRAFÍA.....	75

## LISTA DE FIGURAS

	<b>Pág.</b>
Figura 1. Sistema fotovoltaico conectado a red .....	22
Figura 2. Sistema fotovoltaico autónomo .....	23
Figura 3. Sistema fotovoltaico híbrido .....	24
Figura 4. Características eléctricas módulo Kyocera KD240GH-2PB. (a) Curva tensión vs corriente a condiciones estándar. (b) Variación de la curva en función de la irradiancia.....	27
Figura 5. Circuito de convertidor elevador .....	28
Figura 6. Circuito de inversor monofásico tipo puente completo.....	29
Figura 7. Diagrama de bloques del sistema dimensionado .....	34
Figura 8. Circuito equivalente de una celda solar .....	41
Figura 9. Modelo de subsistema para Panel Fotovoltaico .....	42
Figura 10. Condiciones de operación del interruptor MOSFET: (a) conducción; (b) no conducción.....	43
Figura 11. Modelo de subsistema para convertidor DC-DC.....	44
Figura 12. Modelo de subsistema para circuito inversor .....	45
Figura 13. Subsistemas acoplados. ....	46
Figura 14. Relación gráfica para tensión de salida vs índice de modulación. ....	51
Figura 15. Espectro de amplitud de la señal a la salida del sistema de microgeneración. ....	52
Figura 16. Respuesta del sistema en lazo abierto ante perturbaciones en la carga. ....	54
Figura 17. Relación lineal entre salida de control y salida de la planta.....	56
Figura 18. Respuesta de sistema en lazo cerrado con ganancia proporcional unitaria con y sin ajuste de rango. ....	57

Figura 19. Respuesta del sistema ante perturbaciones de carga para acción proporcional con $K_p = 1$ : tensión de salida (superior); acción de control (inferior). .....	58
Figura 20. Respuesta del sistema ante perturbaciones de carga para acción proporcional con $K_p = 5$ : tensión de salida (superior); acción de control (inferior). .....	59
Figura 21. Respuesta del sistema ante perturbaciones de carga para acción proporcional con $K_p = 11$ : tensión de salida (superior); acción de control (inferior). .....	59
Figura 22. Respuesta del sistema ante perturbaciones de carga para acción proporcional-integral con $K_p = 5$ y $K_i = 0.1$ : tensión de salida (superior); acción de control (inferior).....	60
Figura 23. Respuesta del sistema ante perturbaciones de carga para acción proporcional-integral con $K_p = 5$ y $K_i = 20$ : tensión de salida (superior); acción de control (inferior).....	61
Figura 24. Respuesta del sistema ante perturbaciones de carga para acción proporcional-integral con $K_p = 5$ y $K_i = 40$ : tensión de salida (superior); acción de control (inferior).....	61
Figura 25. Respuesta del sistema ante perturbaciones de carga para acción proporcional-integral con $K_p = 5$ y $K_i = 60$ : tensión de salida (superior); acción de control (inferior).....	62
Figura 26. Respuesta del sistema ante perturbaciones de carga para acción proporcional-derivativa con $K_p = 5$ y $K_d = 0.1$ : tensión de salida (superior); acción de control (inferior).....	63
Figura 27. Respuesta del sistema ante perturbaciones de carga para acción proporcional-derivativa con $K_p = 5$ y $K_d = 0.000001$ : tensión de salida (superior); acción de control (inferior). .....	63
Figura 28. Respuesta del sistema ante perturbaciones de carga para acción proporcional-integral-derivativa con $K_p = 5$ , $K_i = 60$ y $K_d = 0.000001$ : tensión de salida (superior); acción de control (inferior).....	64

Figura 29. Respuesta del sistema ante perturbaciones de carga para acción proporcional-integral-derivativa con  $K_p = 5$ ,  $K_i = 60$  y  $K_d = 0.000001$ .....65

Figura 30. Respuesta del sistema ante perturbaciones de carga para acción proporcional-integral-derivativa con  $K_p = 5$ ,  $K_i = 60$  y  $K_d = 0.000001$ .....65

## LISTA DE TABLAS

	<b>Pág.</b>
Tabla 1. Parámetros de operación del sistema.....	31
Tabla 2. Consumo de cargas en corriente alterna .....	32
Tabla 3. Especificaciones técnicas de paneles solares comerciales a condiciones estándar.....	35
Tabla 4. Selección del regulador.....	36
Tabla 5. Criterios para determinar la tensión de trabajo del sistema .....	37
Tabla 6. Baterías comerciales disponibles.....	38
Tabla 7. Inversores aislados comerciales disponibles .....	39
Tabla 8. Parámetros característicos del panel solar .....	47
Tabla 9. Valores señales modulación SPWM. ....	50
Tabla 10. Relación tabulada para tensión de salida vs índice de modulación. ....	50

## RESUMEN

**TÍTULO:** DISEÑO Y SIMULACIÓN DE UNA ESTRATEGIA DE CONTROL PARA REGULACIÓN DE TENSIÓN EN UN SISTEMA DE MICROGENERACIÓN FOTOVOLTAICO MONOFÁSICO DE BAJA POTENCIA.\*

**AUTORES:** GUTIÉRREZ LOZANO, Cristhiam Jesid, TARAZONA GUERRERO, Gesley Geyn \*\*

**PALABRAS CLAVES:** Control PID; microgeneración, eléctrica, fotovoltaica; modelos, sistema, simulación, numérica.

### DESCRIPCIÓN

El presente proyecto de grado presenta el diseño, modelado y simulación de un sistema de microgeneración eléctrica de uso doméstico basado en fuentes fotovoltaicas. Primero se hace un estudio de las topologías de sistemas fotovoltaicos y se asumen consideraciones idealizadas de operación en los componentes para obtener los modelos respectivos y asignar los parámetros en los subsistemas que componen las diferentes etapas involucradas en la transformación de la energía, desde la fuente principal dada por la irradiancia solar, hasta la carga final que recibe la potencia eléctrica producida; también se realiza una selección de equipos disponibles en el mercado que satisfagan las especificaciones de diseño requeridas.

Las simulaciones numéricas del modelo obtenido fueron contrastadas con los resultados de simulación generados por el paquete comercial para análisis de circuitos de potencia PSIM, en los casos del sistema operando en condiciones nominales, perturbado tras alteración de valores en la carga y bajo la acción de un controlador PID. A través de los resultados obtenidos es posible verificar una apropiada respuesta del sistema controlado, permitiendo mantener los valores de tensión alterna entregados en la carga, a pesar de la incidencia de perturbaciones. A partir de estos resultados teóricos, se propone la contrastación con medidas reales de laboratorio a manera de trabajo futuro.

---

\* Proyecto de grado

\*\* Universidad Industrial de Santander. Facultad de Ingenierías Físico-Mecánicas. Escuela de Ingeniería Eléctrica, Electrónica y de Telecomunicaciones. Director: Ricardo Alzate Castaño, PhD. Co-directora: María Alejandra Mantilla, MSc.

## ABSTRACT

**TITLE:** SIMULATION AND DESIGN OF A CONTROL ESTRATEGY FOR VOLTAGE REGULATION IN A SINGLE PHASE SYSTEM OF PHOTOVOLTAIC MICROGENERATION.\*

**AUTHORS:** GUTIÉRREZ LOZANO, Cristhiam Jesid, TARAZONA GUERRERO, Gesley Geyn\*\*

**KEY WORDS:** Numerical, analysis, photovoltaic, micro-generation, system, PID control, system modeling.

### DESCRIPTION

This project is aimed at modelling, designing and simulating an electrical micro-generation household system based on photovoltaic sources. First a study of topologies photovoltaic systems is made and idealized considerations operation assumed in the components for the respective models and assign the parameters in the subsystems in the different stages involved in the transformation of energy from the primary source given by the solar irradiance, to the final load that receives the power produced by whole system working in concert; a selection of equipment available on the market that meet required design specifications is also performed.

Numerical model simulations obtained were contrasted with the simulation results generated by the commercial package for circuit power analysis PSIM and the well-known numeric software MATLAB, in cases of system operating under nominal conditions, disturbed after changing values in load and under the action of a PID controller. Through the obtained results it is possible to verify a proper response of the controlled system, thereby maintaining the value of alternating voltage supplied to the load, although the incidence of disturbances added to the system. From these theoretical results, design advanced techniques of control and the test with real laboratory measurements by way of future work is proposed.

---

\*Project degree.

\*\* Industrial University of Santander. Faculty of Mechanical Engineering and Physical. School of Electrical, Electronic and Telecommunication. Directed by Ricardo Alzate Brown, PhD. Co-Director: Alejandra María Mantilla, MSc.

## INTRODUCCIÓN

La energía solar fotovoltaica es una buena alternativa para el abastecimiento energético futuro a nivel mundial, siendo conocida como una energía limpia y renovable que presenta mínimas emisiones para el medio ambiente. Los sistemas fotovoltaicos hacen parte de las tecnologías que generan gran aporte al crecimiento continuo del aprovechamiento de los diferentes recursos renovables en reemplazo de los combustibles fósiles, teniendo la capacidad de transformar la energía del sol en energía eléctrica.

Los sistemas fotovoltaicos pueden dividirse en sistemas conectados a red, sistemas autónomos y sistemas híbridos, siendo el sistema autónomo el que ha tenido lugar para estudio en esta investigación. Estos sistemas autónomos están formados de manera general por un panel solar, un convertidor DC-DC y un convertidor DC-AC.

En el presente trabajo, se tomará como aplicación la regulación de tensión en un sistema fotovoltaico de baja potencia, esto mediante la implementación de una estrategia de control en el inversor de tensión. Se realizó el análisis de modelos matemáticos de los componentes del sistema, y las simulaciones numéricas en MATLAB® y simulaciones circuitales en PSIM® para verificar la implementación equivalente de la estrategia de control diseñada.

El desarrollo del proyecto está estructurado en diferentes capítulos, en los que se estudia uno a uno los componentes del sistema y luego el sistema completo.

# **1. PROBLEMA DE INVESTIGACIÓN**

## **1.1 PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA**

Un regulador de tensión es un sistema que conserva los niveles de suministro energético a una carga, aun cuando existen variaciones en la carga o la fuente de alimentación. Existen diferentes alternativas de regulación que ofrecen soluciones cuya eficiencia de desempeño será medida con base en el contexto particular de aplicación. Una de esas aplicaciones la conforman los sistemas de microgeneración eléctrica basados en fuentes alternativas de energía, en donde no existen condiciones constantes en el suministro de la fuente (de naturaleza fotovoltaica, eólica, etc.). Dadas las condiciones actuales de interés gubernamental y de la comunidad mundial por adoptar el uso de fuentes renovables de energía para uso doméstico, es preciso plantearse algunos interrogantes tales como: ¿Qué topología es más conveniente para configurar un sistema de microgeneración fotovoltaico para uso doméstico? ¿Qué aspectos deben considerarse al momento de realizar el dimensionamiento y la selección comercial de elementos para dichos sistemas? ¿Cuáles son los modelos matemáticos que permiten describir el comportamiento dinámico en esta clase de aplicaciones? ¿Qué consideraciones deben tomarse en cuenta al momento de diseñar estrategias de control para la regulación de tensión en sistemas de generación fotovoltaicos?

## **1.2 JUSTIFICACIÓN**

Un regulador de tensión es un dispositivo diseñado con el objetivo de preservar la integridad funcional de sistemas eléctricos y electrónicos ante variaciones en niveles de alimentación, descargas eléctricas y excesivo rizado de la red de suministro. Esto implica que bajo un esquema de regulación debe mantenerse un

valor de tensión constante a la salida con características que dependen del entorno particular de aplicación. Para tal efecto, se eleva o disminuye la corriente en el sistema haciendo que la tensión llegue a la carga sin ninguna alteración mediante conversiones de potencia [1]. Por otra parte, una acción de control aplicada sobre esta clase de circuitos reguladores, busca primordialmente un flujo de tensión adecuado entre las fuentes y las cargas que componen el sistema a pesar de la influencia de perturbaciones externas, obteniendo así un suministro constante de energía.

Para lograr la eficiencia deseada en un esquema de regulación, es necesario realizar un estudio detallado de los requerimientos del diseño eléctrico con el fin de establecer valores y condiciones operativas apropiadas para el sistema. El uso de dichos reguladores de tensión como estrategia de control hace preciso el análisis de su funcionamiento y de sus características básicas. Se tienen tipos de reguladores lineales en donde la eficiencia depende de la diferencia entre el voltaje de entrada y el voltaje de salida (siendo menor la eficiencia cuanto más grande sea dicha diferencia) y reguladores de conmutación en los que el elemento de control es conectado y desconectado con base en leyes que dependen de las variaciones de línea o de carga [2].

Una aplicación importante de los sistemas de regulación eléctrica aparece en el contexto de los circuitos convertidores de potencia como parte fundamental de los sistemas de microgeneración para uso residencial, y de manera puntual, empleando como fuente la energía solar. Algunos estudios relacionados al respecto incluyen: [3] que amplía el concepto de obtención y utilización de la energía solar, centra su investigación en los sistemas de potencia destinados a la transferencia de energía a una red monofásica; [4] plantea el uso de sistemas fotovoltaicos como sistemas confiables y una alternativa prometedora en la utilización de energías renovables alrededor del mundo; en [5] donde se estudia la utilización de sistemas fotovoltaicos de uso residencial a través del software de

simulación GLIDER; en [6, 7] se enfatiza la necesidad de una inversión inicial elevada para esta clase de sistemas que en ocasiones dificulta su materialización, en [8] se explora un método de seguimiento del punto de máxima potencia.

En el entorno local puede mencionarse el trabajo realizado en [9] por la Universidad Nacional de Colombia, donde se presenta la generación distribuida como una alternativa de producción energética que optimiza recursos, es eficaz y reduce efectos de contaminación ambiental. En la Universidad Industrial de Santander se destacan los trabajos: [10] donde se propone el diseño de un sistema fotovoltaico conectado a una red eléctrica; en [11] se diseña de una herramienta computacional en MATLAB® para simulación de sistemas fotovoltaicos; [12] presenta el diseño de una microrred de baja tensión para el laboratorio del parque tecnológico UIS-Guatigará, realizando también una evaluación del recurso solar y eólico disponible.

### **1.3 OBJETIVOS**

**1.3.1 Objetivo general.** Diseñar una estrategia de control para la regulación de tensión de un sistema de microgeneración fotovoltaico monofásico de baja potencia.

#### **1.3.2 Objetivos específicos.**

- Definir la estructura de un sistema de microgeneración fotovoltaico de uso doméstico.
- Asignar valores de parámetros y obtener un modelo dinámico del sistema para la relación: radiación solar (entrada) vs. voltaje en la carga (salida).
- Diseñar una estrategia de control.
- Validar la estrategia de control.

## 2. MARCO DE REFERENCIA

El presente capítulo presenta las ideas generales que permiten definir el contexto temático sobre el cual se enmarcan los sistemas de microgeneración eléctrica de tipo fotovoltaico. Se definirá la estructura general para este tipo de sistemas identificando los elementos importantes y sus características asociadas. Finalmente se buscará determinar justificadamente una topología para aplicaciones domésticas de baja potencia.

### 2.1 MARCO TEÓRICO

**2.1.1 Sistema fotovoltaico.** El nombre de sistema fotovoltaico se le da al conjunto de dispositivos eléctricos, electrónicos y mecánicos que interconectados apropiadamente entre sí, adquieren la capacidad de transformar la energía entregada por el sol<sup>1</sup> en energía eléctrica, para ser aprovechada en alguna aplicación específica. Algunas de sus aplicaciones incluyen plantas solares a gran escala en algunos desiertos como el atacama en Chile, sistemas aeroespaciales, parqueaderos, electrificación rural, edificios y sistemas de entretenimiento entre otros [13]. Este tipo de energía posee grandes ventajas [14, 15], entre las que se destacan la fuente de energía, la simplicidad de los sistemas, su fácil instalación, vida útil, alto rendimiento y reducido impacto ambiental.

Dependiendo del tipo de aplicación, los sistemas fotovoltaicos pueden requerir de algunos (o todos) de los siguientes elementos: arreglos o módulos de celdas solares; soportes para módulos; reguladores de voltaje; instrumentación para su operación; baterías de almacenamiento; cableado y protecciones [16]. Respecto a

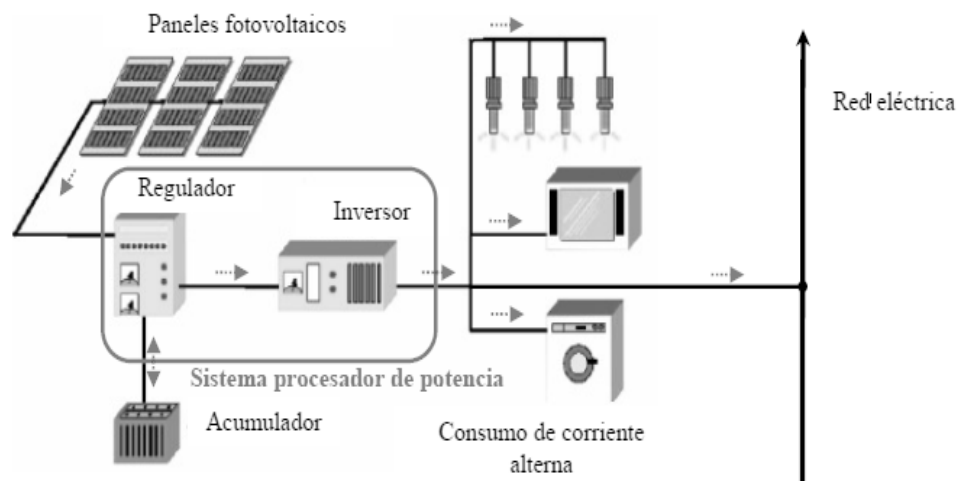
---

<sup>1</sup> La energía solar es la obtenida directamente del sol. Con esta se puede obtener un tipo de energía limpia que no contamina y además a largo plazo resulta ser un gran ahorro de dinero, ya que la fuente de energía es el sol, una fuente infinita que durante gran parte del día nos llega de manera continua.

su interacción con la red eléctrica pueden clasificarse en: conectados a la red; autónomos o aislados e híbridos cuando poseen características adicionales a las anteriores, principalmente ligadas a las fuentes de suministro de energía.

**2.1.2 Sistemas conectados a la red.** Estos sistemas son utilizados principalmente para inyectar a la red la máxima energía posible, por lo que no necesitan sistemas de almacenamiento (baterías). Poseen la ventaja de ser soportados por la red de suministro en caso de algún desabastecimiento [17]. Tales sistemas deben cumplir con estándares de calidad de la energía, según establecido por normas ICONTEC como la NTC 4405. Una topología típica de sistemas conectados a la red se muestra en la figura 1. Sus componentes principales son el arreglo de paneles fotovoltaicos (generador fotovoltaico), el regulador de carga (convertidor) y el inversor. Estos son utilizados comúnmente en los tejados de viviendas y centrales fotovoltaicas. En algunos casos se deben tener en cuenta aspectos de seguridad y pérdida por sombras de acuerdo al entorno [18].

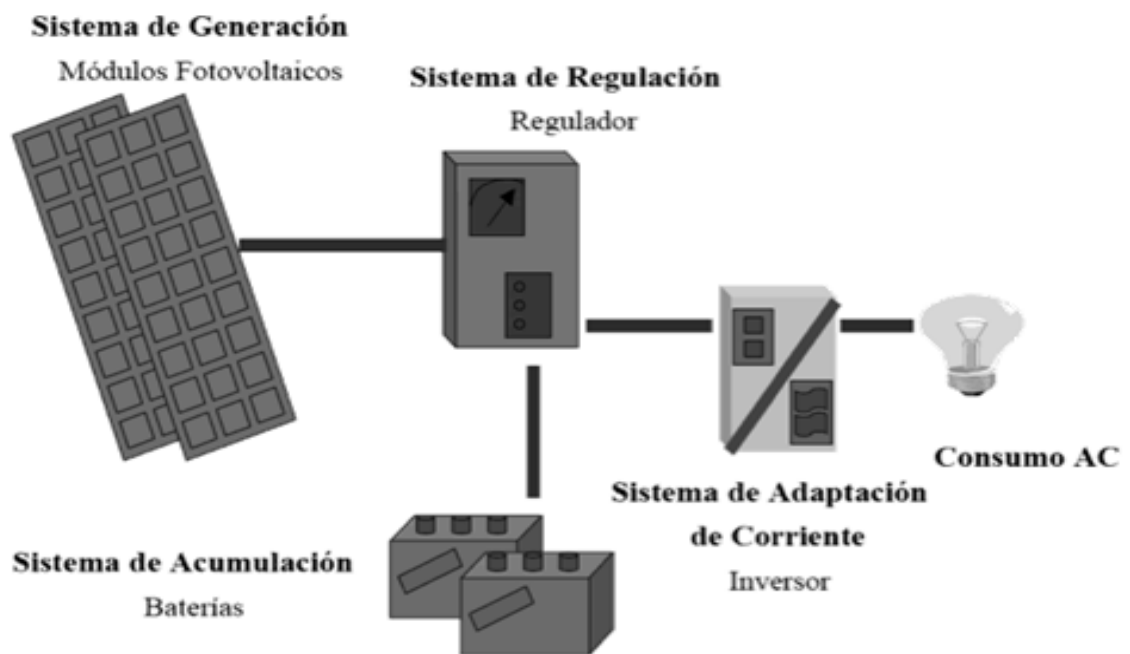
**Figura 1. Sistema fotovoltaico conectado a red**



Fuente: Diseño de un inversor multinivel para sistemas fotovoltaicos conectados a red.

**2.1.3 Sistemas autónomos (Stand alone).** Estos sistemas son de gran utilidad en lugares donde las posibilidades de acceder a la energía eléctrica por medios convencionales son casi nulas, por lo que su objetivo principal es satisfacer dicha demanda [14, 19]. Varias de sus aplicaciones incluyen las de uso doméstico, alumbrado público, bombeo y tratamiento de agua, antenas de telefonía, aplicaciones agropecuarias y de ganadería, entre otras [20]. Algunos de los componentes más comunes en esta clase sistemas se observan en la figura 2 y son los módulos fotovoltaicos, el regulador de carga, el sistema de acumulación, el inversor y los elementos de protección. Muchos sistemas autónomos no utilizan acumuladores dentro de su topología, lo que implica que su uso sea explícitamente durante las horas en que el sol está expuesto.

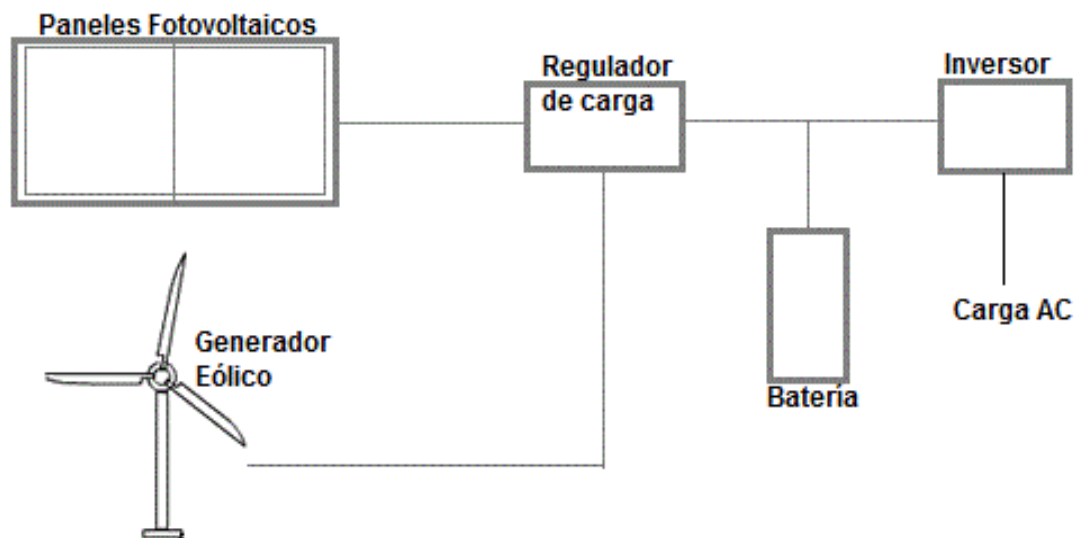
**Figura 2. Sistema fotovoltaico autónomo**



Fuente: Manual para instalaciones fotovoltaicas autónomas.

**2.1.4 Sistemas híbridos.** Esta variación de sistemas fotovoltaicos se caracteriza por el uso de dos o más fuentes de alimentación distintas a los módulos solares. Generalmente las fuentes que se adicionan a los paneles fotovoltaicos pueden ser: un generador diésel, un generador eólico o una turbina hidráulica, aportando un respaldo importante como fuente de energía. La principal ventaja de estos sistemas híbridos radica en que no es necesario implementar paneles adicionales para suplir los momentos de poco sol [14]. La figura 3 presenta una posible configuración de sistema fotovoltaico híbrido entre módulos solares y un generador eólico.

**Figura 3. Sistema fotovoltaico híbrido**



Fuente: Autores del proyecto

## **2.2 ELEMENTOS BÁSICOS DE UN SISTEMA FOTOVOLTAICO.**

A continuación se realizará una descripción de los elementos principales de un sistema fotovoltaico, independientemente del tipo de interacción que posean con la red eléctrica.

**2.2.1 Módulos fotovoltaicos.** El módulo o panel solar fotovoltaico tiene como principal función entregarle al sistema la energía eléctrica que transforma a partir de la radiación solar que recibe, esto sucede gracias a un fenómeno entre materiales semiconductores (por ejemplo Silicio), conocido como el efecto fotovoltaico. Estos módulos a su vez están conformados por la conexión conveniente de celdas fotovoltaicas y allí es donde tiene lugar la transformación de la energía solar en energía eléctrica. De la cantidad de celdas fotovoltaicas conectadas en serie y paralelo dependerá la tensión y la corriente a la salida del módulo fotovoltaico [14, 21]. De acuerdo a la fabricación de las celdas fotovoltaicas mediante la manipulación y aplicación del silicio, se distinguen 3 grupos principalmente que a su vez son los más comunes en la industria de la energía solar, descritos a continuación:

- **Monocristalino:** se caracteriza por tener una estructura cristalina íntegramente ordenada, ya que el crecimiento de la celda del silicio puro es controlado en laboratorio. Físicamente se reconoce al tener un color azul oscuro uniforme y sus celdas equidistantes.
- **Policristalino:** se obtiene de una manera similar al monocristalino, excepto que no se controla el crecimiento de la celda, quedando así un compuesto de silicio que no tiene la misma pureza y por tanto afecta en cierta medida el rendimiento del panel. Este presenta diferentes tonalidades de azul.
- **Silicio amorfo:** a diferencia de los otros 2 tipos de panel, el proceso de fabricación de este es menos costoso. Presenta defectos en la formación de su estructura de celda que se pueden advertir a simple vista. Tiene en su contra el hecho que la potencia obtenida es más baja frente a los otros dos, pero como ventaja es más versátil en su instalación e incluso translucido para aplicaciones en ventanas [21].

Las características eléctricas del módulo fotovoltaico dependerán directamente de las celdas fotovoltaicas teniendo en cuenta la cantidad, el tipo de conexión entre ellas y asimismo la tecnología que se haya utilizado en el momento de su fabricación.

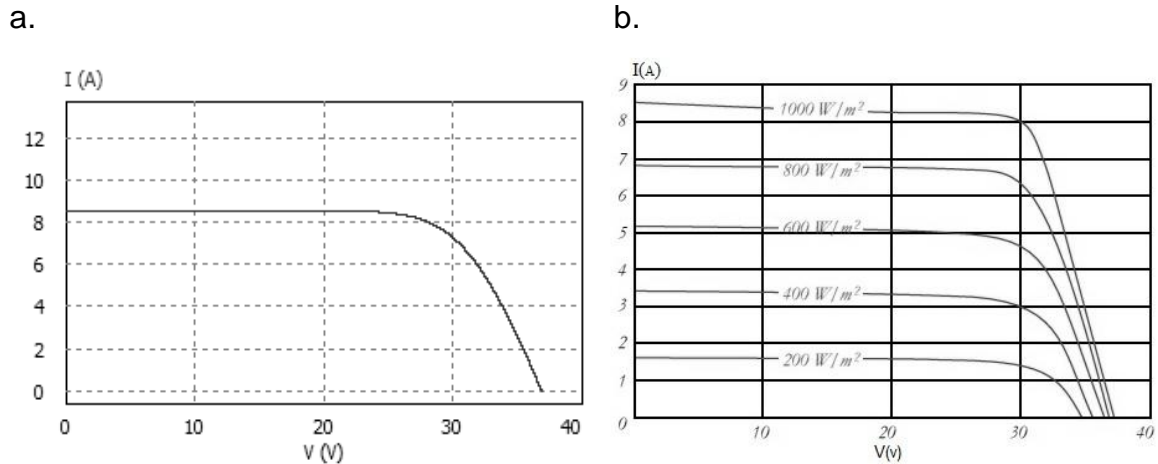
De acuerdo con esto, en la industria de la energía solar fotovoltaica existen paneles con diferentes salidas de potencia, tensión y corriente, que se ajustarán a la necesidad y requerimientos de cualquier usuario. Estas interconexiones dan lugar a características eléctricas como las que se pueden observar en la figura 4, que son presentadas a manera de ejemplo, para condiciones estándar en un panel Kyocera KD240GH-2PB.

Estas condiciones hacen referencia a dos factores que influyen en el comportamiento del panel solar como son la irradiancia<sup>2</sup> [S] y la temperatura ambiente (T) cuyos valores estándar son:  $S = 1 \text{ SOL} = 1000[\text{w}/\text{m}^2]$  y  $T = 25^\circ\text{C}$  respectivamente.

---

<sup>2</sup> La irradiancia es la magnitud utilizada para medir en  $\text{Watt}/\text{m}^2$  la incidencia solar sobre la tierra. Este parámetro influye considerablemente sobre los módulos fotovoltaicos.

**Figura 4. Características eléctricas módulo Kyocera KD240GH-2PB. (a) Curva tensión vs corriente a condiciones estándar. (b) Variación de la curva en función de la irradiancia.**



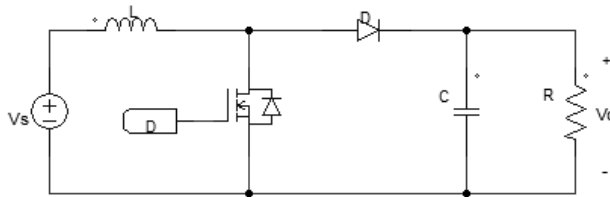
Fuente: [www.kyocerasolar.com.au/assets/001/5425.pdf](http://www.kyocerasolar.com.au/assets/001/5425.pdf)

**2.2.2 Convertidor DC-DC.** En numerosas aplicaciones industriales no solo eléctricas o electrónicas, se hace necesario adecuar los niveles de tensión a las necesidades del sistema. Los convertidores DC-DC son almacenadores temporales de energía durante periodos de tiempo, dichos periodos determinan la energía cedida a la carga. Se pueden dividir en tres bloques: convertidores de conmutación, acumulación de energía y filtrado. Son de gran importancia en el desarrollo de la electrónica de potencia y sus aplicaciones están orientadas a fuentes de poder, pilas de combustible y vehículos híbridos [30]. También se utilizan en los reguladores de voltaje, dispositivos muy usados en las instalaciones fotovoltaicas para garantizar una fuente constante a la salida del mismo. Es por esto que un convertidor DC-DC es utilizado para ajustar la tensión proporcionada por los paneles fotovoltaicos a la siguiente etapa, el inversor de tensión.

Existen distintos tipos de convertidores DC-DC, principalmente si presentan aislamiento galvánico o no. Este aislamiento lo poseen aquellos convertidores que en su estructura incorporan un transformador. Dentro de los que no tienen

aislamiento galvánico, los más populares son el convertidor reductor (Buck), convertidor elevador (Boost) y el elevador/reductor (Buck/Boost). El convertidor elevador permite obtener más tensión a partir de un número reducido de módulos fotovoltaicos [24,25]. El circuito de un convertidor elevador ideal es presentado en la figura 5, donde el panel solar es representado con una fuente de tensión DC mientras que R toma el papel de la carga a la cual se le va a entregar la potencia a la salida del convertidor.

**Figura 5. Circuito de convertidor elevador**



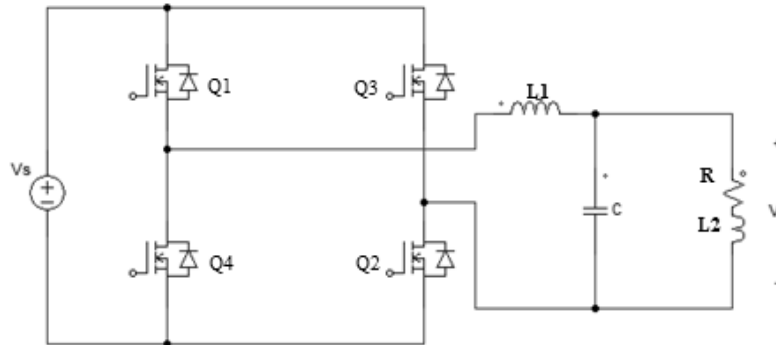
Fuente: autores del proyecto

**2.2.3 Convertidor DC-AC.** Un convertidor DC-AC es generalmente conocido como inversor, el cual tiene la función de convertir el voltaje de DC a la entrada a un voltaje equivalente AC a la salida. De esta manera entregan la potencia proveniente de una fuente de continua a una carga de alterna, a partir de interruptores electrónicos que accionados en una determinada secuencia, permiten obtener a la salida valores de tensión +VCC, -VCC, o cero. Estos inversores se pueden clasificar de forma general en dos grupos, inversores monofásicos e inversores trifásicos y estos a su vez en topologías medio puente y puente completo, esta última de uso común en la industria [14, 24].

El inversor monofásico de puente completo es usado para convertir la señal de continua que entrega el convertidor elevador, en una señal senoidal a 60 [Hz] en los terminales donde está conectada la carga. En principio se esperaría que el inversor entregara la onda senoidal, sin embargo de estos inversores se obtiene una onda cuadrada y por tanto es necesario conectar un filtro de paso bajo para

conseguir la onda senoidal deseada. En la figura 6 se presenta el circuito ideal de un inversor monofásico en puente completo.

**Figura 6. Circuito de inversor monofásico tipo puente completo**



Fuente: autores del proyecto

Los componentes  $L_1$  y  $C$  conectados a la salida del circuito forman el filtro pasa bajo que permite obtener una señal de onda senoidal. La carga del inversor es  $R + L_2$ , no se considera puramente resistiva [27].

**2.2.4 Baterías.** Las baterías son parte fundamental en un sistema fotovoltaico aislado o stand alone, debido a su condición de aislamiento respecto a la red y la dependencia de los módulos fotovoltaicos de la radiación<sup>3</sup> solar, lo que sugiere un almacenamiento de la energía que ha sido captada a través del módulo fotovoltaico y así garantizar el suministro energético en periodos de baja o nula radiación solar. Una batería o acumulador es un elemento dentro del cual ocurre un proceso electroquímico que es capaz de transformar la energía potencial almacenada en energía eléctrica [14].

<sup>3</sup> Es la cantidad de irradiancia recibida en un lapso de tiempo determinado, es decir, la potencia recibida por unidad de tiempo y por unidad de superficie. Se suele medir en  $Wh/m^2$  o, en caso de un día, en  $Wh/m^2/día$  o unidades equivalentes.

Deben soportar descargas profundas y generalmente son elaboradas a base de Plomo-ácido o Níquel-Cadmio, las utilizadas en sistemas fotovoltaicos son llamadas baterías solares o de ciclo profundo y son de aplicación específica. Para efectos de simulación y modelado, cuando el banco de baterías se considera cargado es posible representarlo como una fuente de tensión  $V_g$  [30].

**2.2.5 Regulador de carga.** Los reguladores de carga son los encargados de proteger las baterías de sobrecargas o descargas profundas que afecten de manera considerable su vida útil y con ello el correcto funcionamiento de los acumuladores, alterando la eficiencia del sistema. Monitorean constantemente el nivel de tensión en las baterías, así cuando éstas llegan a su máxima tensión los reguladores interrumpen la carga y vuelven a cerrar el circuito cuando comienzan a descargarse.

A su vez cuentan con protecciones frente a corto circuitos y diodos que permiten el flujo de corriente desde los módulos fotovoltaicos hacia las baterías y nunca de forma contraria evitando así daños en los paneles solares [14,31].

El regulador puede incluir otros elementos, aunque no sean indispensables, pueden ser de utilidad en tareas de control o seguridad como temporizadores, alarmas, contadores amperios-hora, entre otros.

## **2.3 PROCESO BASE PARA DIMENSIONAR UN SISTEMA FOTOVOLTAICO MONOFÁSICO DE BAJA POTENCIA**

**2.3.1 Diseño del sistema fotovoltaico autónomo.** Debido al crecimiento de la demanda de energía solar, actualmente las topologías de dichos sistemas se encuentran en amplias variedades y aplicaciones lo cual permite mayor claridad al momento de seleccionar la mejor opción según sea la utilidad del sistema.

En la presente investigación, se propone trabajar con un sistema fotovoltaico autónomo de uso doméstico, debido a la necesidad de electrificación en lugares de difícil acceso e inexistencia de redes eléctricas.

En el diseño de sistemas fotovoltaicos se deben tener en cuenta diversos factores para determinar el tipo de sistema que se desea diseñar entre autónomo, híbrido o conectado a la red. Esto se puede establecer fácilmente teniendo en cuenta la demanda energética que se quiere satisfacer y la cantidad de energía disponible según la geografía del lugar de instalación, lo que hace necesario realizar para el diseño una estimación al menos aproximada del consumo de energía por parte de la carga o equipos de operación.

Otros aspectos relevantes se basan en la instalación del sistema, como las estructuras de soporte del panel que deben ser resistentes a la corrosión, soportar vientos fuertes, entre otras condiciones que garanticen la seguridad del panel; de la misma manera es importante el ángulo de inclinación así como la ubicación de los demás componentes del sistema [32].

**2.3.2 Condiciones de operación.** Para el sistema fotovoltaico en desarrollo, se establecen en la tabla 1, los parámetros de operación a partir de los cuales se calcularán los componentes que integran la topología seleccionada, estableciendo también las condiciones mínimas de operación. En esta tabla el subíndice “o” representa los valores de salida.

**Tabla 1. Parámetros de operación del sistema**

$P_o$ [W]	$V_o$ [V]	$I_o$ [A]	$f$ [Hz]
720	120	6	60

Fuente: Autores del proyecto

La topología de sistema seleccionada (sistema fotovoltaico autónomo) se ilustró en la sección anterior.

Para realizar el dimensionado del sistema se define una carga de consumo en la que se deben tener en cuenta principalmente dos aspectos: las horas diarias que permanecen activas, así como la potencia de cada carga. Esta potencia se obtiene de las características de fabricación que posee el elemento, de ahí que se pueda definir la potencia en Watts hora [Wh], parámetro importante que representará la carga total que debe alimentar el sistema en un día. Por consiguiente, el régimen de carga estará definido después de conocer los siguientes valores: la cantidad de energía que requiera la carga por día, el periodo del día durante el cual se usará esa energía y el valor máximo (pico) que alcance la carga [36]. Las cargas consideradas en este trabajo son todas en AC, no se han considerado conexiones para luminarias u otros dispositivos que trabajen en DC. Para el diseño se considerarán cargas de uso común en una residencia. En la Tabla 2, se listan un estimativo de consumo típico a manera de referente.

**Tabla 2. Consumo de cargas en corriente alterna**

ELEMENTO	CANTIDAD	USO DIARIO [h]	CONSUMO [W]	CONSUMO TOTAL [Wh]
Bombillo de bajo consumo	4	3	60	180
Radio	1	3	15	45
Televisor	1	4	120	480
Autoconsumo de equipos	1	12	1	12
			TOTAL	717

Fuente: [14,31]

Identificando las cargas en alterna se procede a multiplicar el consumo en Watts por el tiempo de utilización y se obtiene el resultado de la carga en Watts-hora [Wh] que es el dato requerido por la carga total del sistema, el cual se calcula haciendo la sumatoria de cada uno de los Watts-hora de cada carga. Es necesario

considerar los autoconsumos de los equipos, como son el inversor, el regulador de carga, y otros que sean parte de la instalación fotovoltaica.

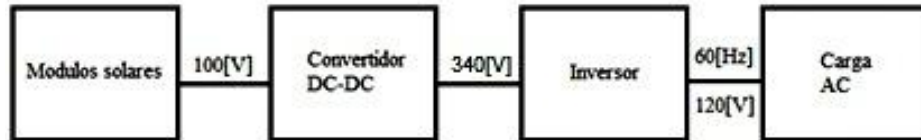
Con la carga así definida, se continúa el proceso de estimación de valores que corresponden a cada bloque del sistema, según se describe a continuación:

- El inversor debe brindar una salida de 120 [VAC] eficaces a 60 [Hz] y mínimo 6 amperios de salida, para obtener una forma de onda senoidal que alimente la carga instalada y su entrada en un valor pico de tensión de 340 [V]. Este valor de entrada corresponde con la salida de la etapa de acople entre un arreglo de paneles fotovoltaicos y el inversor: un convertidor DC-DC.
- Se realiza el diseño de un convertidor DC-DC que tenga la capacidad de aumentar la tensión en la entrada, considerando para ello valores de alrededor de 100 [V]. Estos 100 [V] son entregados por el conjunto de paneles fotovoltaicos (e.g. panel KYOCERA en 2.2.1).
- Para facilitar el modelado del sistema en capítulos posteriores, no se considerará explícitamente un módulo de acumulación de cargas (banco de baterías). Lo anterior representa un suministro de irradiancia constante en el panel, presunción no válida desde el punto de vista práctico y que será incorporada en trabajos complementarios mediante el análisis de perturbaciones en la etapa de conversión de DC a DC (acople entre el arreglo de paneles y el inversor). En términos de diseño bastará con considerar un sistema de baterías que garantice alrededor de 100 [VDC] / 10 [A].

Se toman en cuenta estas consideraciones y en complemento a la topología propuesta en la figura 2, se presenta mediante el diagrama de bloques de la figura 7, el dimensionamiento de los parámetros del sistema fotovoltaico diseñado, sobre

los cuales se realizarán los análisis de simulación referenciados en los capítulos posteriores.

**Figura 7. Diagrama de bloques del sistema dimensionado**



Fuente: autores del proyecto

## 2.4 SELECCIÓN DE DISPOSITIVOS COMERCIALES

Para verificar la viabilidad del diseño propuesto, en esta sección se propone la selección de equipos disponibles en el mercado que satisfacen las especificaciones requeridas y que por tanto sugieren una eventual materialización del sistema fotovoltaico para ser estudiado en el presente proyecto. A continuación se presentan dispositivos comerciales que satisfacen los requerimientos del diseño en cada sub-etapa del diagrama de bloques de las figuras 2 y 7.

**2.4.1 Selección del panel.** Para la selección de los paneles solares se escogieron marcas reconocidas en el mercado que ofrecen opciones de tipo policristalino. En esta búsqueda, no se consideraron paneles con potencia inferior a 200[W]. Con base en lo anterior, se consigna en la tabla 3, la información correspondiente a las características técnicas para algunos modelos, donde  $V_{oc}$  representa el voltaje en circuito abierto o sin carga,  $I_{sc}$  es la corriente máxima o de corto circuito,  $V_{mpp}$  es el voltaje máximo pico entregado por el panel e  $I_{mpp}$  hace lo propio para el caso de la corriente pico.

**Tabla 3. Especificaciones técnicas de paneles solares comerciales a condiciones estándar.**

FABRICANTE	MODELO	POTENCIA (W)	EFICIENCIA (%)	Voc [V]	Isc [A]	Vmpp [V]	Impp [A]
Yingli Solar	YL240P-29b	240	14.7	37.5	8.75	29.3	8.18
Suntech	STP230-20/Wd	230	13.9	36.8	8.25	29.8	7.72
Kyocera	KD240GH-2PB	240	14.2	36.9	8.59	29.8	8.06
Solarworld	SW 220	220	13.12	36.6	8.08	29.2	7.54
Panasonic	VBN240SE	240	16	52.4	5.85	43.7	5.51

Fuente: [38-42]

A partir de esto y tomando en consideración criterios como la eficiencia y los niveles de tensión y corriente entregados, se selecciona el modelo *YL240P-29b* de *Yingli Solar*, como el dispositivo a emplear en una implementación práctica del diseño.

**2.4.2 Selección del regulador.** El regulador se define especificando la tensión de trabajo del sistema y la corriente máxima que debe estar en capacidad de manejar [14]. Así, éste debe soportar un incremento del 25% de la corriente de cortocircuito del generador fotovoltaico en condiciones estándar de medida. De la hoja de datos también se deben considerar las normas de seguridad que cumple y aspectos físicos como peso, tamaño, material de que está hecho, entre otros.

En la tabla 4, se muestra una selección de 4 modelos diferentes de regulador con las características apropiadas para el montaje físico del sistema fotovoltaico autónomo seleccionado. La tensión nominal es la tensión de trabajo de la instalación y corresponde con la tensión nominal de las baterías. La corriente de autoconsumo es la cantidad de energía que necesita el regulador para su propio

funcionamiento. Este valor se debe considerar a la hora de hacer el dimensionado de la instalación, para que funcione de manera correcta [35].

**Tabla 4. Selección del regulador**

FABRICANTE	MODELO	TENSIÓN NOMINAL	CORRIENTE CARGA	CORRIENTE AUTOCONSUMO	EFICIENCIA
XANTREX	C35	24 [V]	35[A]	15 [mA]	-
ELECSUN SERIES	ELECSUN 10	24 [V]	10[A]	6 [mA]	-
MORNINGSTAR	PROSTAR 30	24 [V]	30[A]	1 [mA]	-
ATERSA GRUPO ELEC	MPPT 50c	24 [V]	50[A]	4 [mA]	-
OUTBACK POWER	FM60 MPPT	24 [V]	60[A]	6 [mA]	97.5

Fuente: [39,43-46]

A partir de esto y tomando en consideración el criterio de una menor corriente de autoconsumo, se selecciona el modelo *PROSTAR 30* de *MORNINGSTAR*, como el dispositivo a emplear en una implementación práctica del diseño.

**2.4.3 Selección de las baterías.** La autonomía del sistema se elige dependiendo de las características y el lugar en el que se haga la instalación. El valor mínimo para esta autonomía es de tres días, valor exigido por el IDAE<sup>4</sup>. Este dato puede ampliarse de acuerdo a la fuente solar con que se cuente. Para el desarrollo de este sistema se seleccionan 4 días de autonomía.

Con el fin de determinar el nivel de voltaje de ingreso a la instalación fotovoltaica (entrada al módulo de conversión de potencia DC-DC / DC-AC), se recurre a la tabla 5, en la cual a partir de los valores típicos presentados previamente en la tabla 2 (717 [Wh]), se determina el rango 24-48 [V] para este valor de tensión.

<sup>4</sup> El IDAE es el Instituto para la Diversificación y Ahorro de la Energía Español, organismo que contribuye en materia de mejora de la eficiencia energética y las energías renovables.

**Tabla 5. Criterios para determinar la tensión de trabajo del sistema**

POTENCIA DE CONSUMO DE LA CARGA [W]	TENSIÓN DE TRABAJO [V]
< 400	12
400 – 5000	24 o 48
> 5000	48 – 110

Fuente: [14]

Orientando la atención a los tipos de cargas que se desea alimentar, generalmente se usan 24 [V] de tensión de trabajo. Existen parámetros a considerar para elegir el sistema de acumulación, como la temperatura del ambiente de trabajo o la profundidad de la descarga que deberá cumplir el sistema, sin embargo uno de los más importantes es la capacidad. Esta capacidad se refiere a la cantidad de electricidad que se puede obtener de una descarga completa del acumulador partiendo de una carga completa. Para calcular el valor de la capacidad [Ah] del acumulador, acorde a la metodología presentada en [14], se toma en consideración el valor [kWh] diario total, sin contemplar pérdidas de consumo. A partir de este valor se puede obtener el total [Ah] diarios a partir de:

$$\frac{717 [Wh]}{24[V]} = 29.875 \text{ Ah} . \quad (1)$$

Para dimensionar apropiadamente las baterías, se toma el valor de capacidad obtenido y se multiplica por la cantidad de días de autonomía. Por tanto, para el caso particular considerado se obtendrán 119.5 [Ah] de capacidad total real.

Posterior a estos cálculos se procede con la selección de la batería. Un primer criterio de selección está en poseer capacidad superior a 150 [Ah]. Otro aspecto importante es el voltaje de la batería que debe ser de 24 [V] o algún submúltiplo. Finalmente se debe seleccionar el tipo de batería de entre muchas opciones, entre ellas: Plomo-acido, Niquel-cadmio y Litio. En [35] se realiza una apropiada

descripción de las ventajas y desventajas para cada tipo de batería. La tabla 6, incluye información para algunos elementos comerciales disponibles.

**Tabla 6. Baterías comerciales disponibles**

Fabricante	Modelo	Tensión [V]	Capacidad [Ah]	Tipo
Mastervolt	Mastervolt AGM225	12	225	AGM
Effekta	BL-BLE-12-400	12	400	LITIO
Victron Energy	BAT412151100	12	220	GEL
Victron Energy	BAT412201080	12	220	AGM
Tab Battery	BTO-3 TOPzS 265-04	12	345	TUBULAR ESTACIONARIA

Fuente: [47-50]

A partir de los datos del tabla 6 y tomando en consideración el criterio de disponibilidad comercial y consecuente popularidad de uso, se selecciona la batería de Plomo-acido de tipo AGM (absorbed glass mat) de modelo *BAT412201080 Victron Energy*, como el dispositivo a emplear en una implementación práctica del diseño.

**2.4.4 Selección del inversor.** Para elegir el inversor se deben tener en cuenta las características de carga del sistema al igual que el tipo de conexión a la red. Es necesario tomar en cuenta que los inversores comerciales incluyen en su interior la etapa de conversión DC-DC en cascada con la inversión DC-AC. Por esta razón, y considerado los parámetros de selección se debe incluir una tensión de entrada de 24 [V], una tensión de salida de 120 [VAC] a 60 [Hz] y una potencia de alrededor 1000 [W] con eficiencia de al menos 80% (según IDAE) y protecciones tanto para sí mismo como para el sistema. De esta manera se resumen en la tabla 7, algunas opciones comerciales.

**Tabla 7. Inversores aislados comerciales disponibles**

FABRICANTE	MODELO	TENSIÓN ENTRADA	TENSIÓN SALIDA	FRECUENCIA	POTENCIA	EFICIENCIA
SMA Technology	Sunny Island Charger 50	24 [VDC]	120[VAC]	60[Hz]	1200[W]	95%
Atersa grupo elec	BCR-1500	24 [VDC]	100-120[VAC]	60[Hz]	1500[W]	88%
Xantrex	TR1524	22-30 [VDC]	120[VAC]	60[Hz]	1200[W]	94%
Outback Power	FX2524T	24 [VDC]	120[VAC]	60[Hz]	1500[W]	92%
SmarTecno	SK2000	24 [VDC]	120[VAC]	60[Hz]	2000[W]	92%
Victron Energy	C24/1600	19-33 [VDC]	120[VAC]	60[Hz]	1600[W]	93%

Fuente: [43, 45, 46, 49, 51, 52]

Con los datos de la tabla 7 y tomando en consideración el criterio de la mayor eficiencia, se selecciona el modelo *Sunny Island Charger 50* de *SMA Technology*, como el dispositivo a emplear en una implementación práctica del diseño.

### 3. DISEÑO DEL SISTEMA DE GENERACIÓN FOTOVOLTAICO MONOFÁSICO DE BAJA POTENCIA

Posterior a definir las características generales del sistema fotovoltaico y a relacionar elementos comerciales para una posible materialización del diseño, el presente capítulo presenta la representación matemática para los modelos que constituyen las diferentes etapas (subsistemas) del microgenerador.

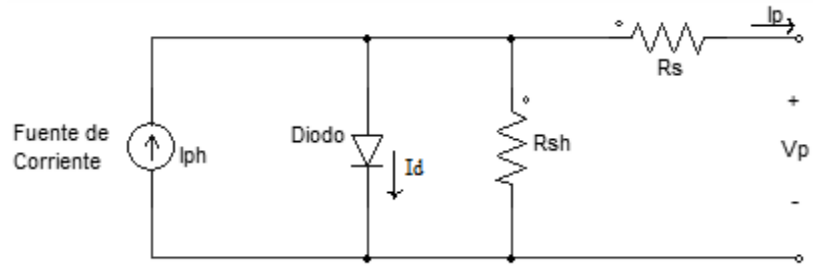
#### 3.1 MODELO DEL PANEL FOTOVOLTAICO.

Para describir el funcionamiento de una celda solar, se considera el circuito equivalente de la figura 8 [23, 36], donde la resistencia  $R_{sh}$  tiene su origen en imperfecciones de la unión química que constituye la celda, causantes de fugas de corriente; la resistencia  $R_s$  representa pérdidas por conexiones y la fuente de corriente continua  $I_{ph}$  es la corriente generada por la irradiancia  $S$  entregada por el sol, descrita mediante la siguiente expresión:

$$I_{ph} = I_{SC0} \frac{S}{S_0} + C_t (T - T_{ref}) , \quad (2)$$

Donde  $T_{ref}$  es una temperatura de referencia,  $I_{SC0}$  y  $S_0$  son respectivamente la corriente de corto circuito y la irradiancia a condiciones estándar de funcionamiento y  $C_t$  es un coeficiente de temperatura.

**Figura 8. Circuito equivalente de una celda solar**



Fuente: autores del proyecto

A partir de este circuito es posible plantear la siguiente expresión para la corriente de salida en el panel  $I_p(t)$ :

$$I_p(t) = I_{ph}(t) - I_d e^{\frac{q(V_p(t) + I_p(t)R_s)}{nkT} - 1} - \frac{V_p(t) + I_p(t)R_s}{R_{sh}} \quad (3)$$

Donde  $I_d$  es la corriente inversa de saturación del diodo,  $k$  es la constante de Boltzman,  $q$  es la carga del electrón,  $T$  es la temperatura ambiente y  $n$  es un factor de idealidad del diodo que toma un valor unitario en el caso ideal. De esta ecuación se puede advertir que el comportamiento de las celdas fotovoltaicas es no lineal y guarda dependencia directa de factores importantes como la irradiancia y la temperatura.

Ahora bien, considerando que la resistencia  $R_{sh}$  toma valores considerablemente altos en la práctica (tras suponer uniones químicas ideales en la celda), la ecuación (3) se reduce a la expresión:

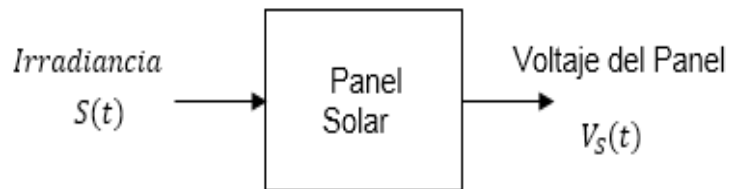
$$I_p(t) = I_{ph}(t) - I_d e^{\frac{q(V_p(t) + I_p(t)R_s)}{nkT} - 1} \quad (4)$$

Si el diodo es ideal, la tensión  $V_p t + I_p t R_s$  corresponde con el valor de umbral para el silicio (aproximadamente 0.7 [V]). Por tanto, asumiendo la relación entre  $I_{ph} t$  y la irradiancia  $S$  dada por la expresión (2), es posible determinar el valor de la corriente del panel  $I_p t$  para cada valor de irradiancia y posteriormente a partir de ello la tensión del panel mediante la expresión:

$$V_p t = I_p t R_s. \quad (5)$$

En resumen, el panel fotovoltaico corresponde con un sistema cuya entrada es la irradiancia  $S$  y su salida la tensión  $V_p t$ . Dicho sistema representa una relación entrada-salida no lineal dada por las expresiones (2), (4) y (5). Una ilustración gráfica del mismo se da por el diagrama de bloques de la figura 9

**Figura 9. Modelo de subsistema para Panel Fotovoltaico**

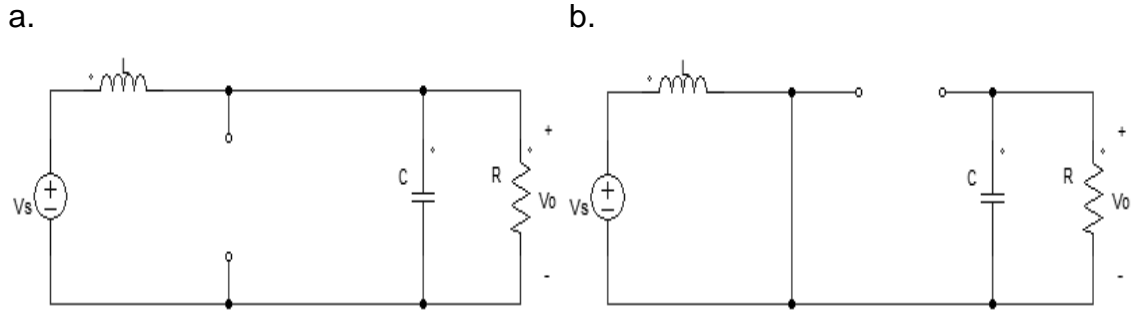


Fuente: autores del proyecto

### 3.2 MODELO DEL CONVERTIDOR DC-DC.

El modelo del convertidor Boost se realiza en el espacio de estados asumiendo un modo-continuo de conducción (MCC), en el cual la corriente en la bobina y el voltaje en el capacitor fluctúan alrededor de un valor promedio. En general se asumen dos condiciones de operación para el transistor MOSFET: conducción y no-conducción. Los circuitos equivalentes para cada caso se muestran en la figura 10.

**Figura 10. Condiciones de operación del interruptor MOSFET: (a) conducción; (b) no conducción**



Fuente: autores del proyecto

Por tanto, si se toman como variables de estado a la corriente en el inductor  $i_L(t)$  y a la tensión en el capacitor  $v_C(t)$ , se obtiene el modelo promediado del sistema en el espacio de estados descrito a partir de la ecuación de la siguiente ecuación:

$$\begin{aligned} \frac{d}{dt} i_L &= 0 - \frac{1}{L} i_L + \frac{v_C}{L} \frac{1}{L} u \\ \frac{d}{dt} v_C &= \frac{1}{C} - \frac{1}{RC} v_C + -\frac{i_L}{C} 0 V_s \end{aligned} \quad (6)$$

Donde el parámetro  $u \in \{0,1\}$  es la señal de control de conmutación para el interruptor. El nivel de tensión en la salida (voltaje en el capacitor  $v_C(t)$ ), se calcula por medio de la siguiente relación:

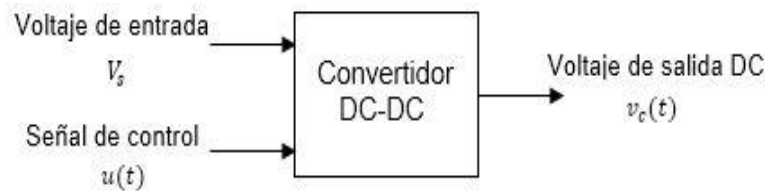
$$\frac{v_C}{V_s} = \frac{1}{1-D} \quad (7)$$

Conocida como ciclo útil y que representa el tiempo (en porcentaje del periodo) que conduce el interruptor. Es decir, considerando a  $V_s$  como un parámetro constante, el sistema que describe al convertidor de potencia Boost posee como entrada a la señal de control  $u(t)$  correspondiente con el porcentaje de ciclo útil de conmutación y como salida a la tensión en el capacitor  $v_C(t)$ . Con base en [37], una función de transferencia válida para este modelo es la siguiente:

$$G(s) = \frac{V_C(s)}{V_S(s)} = 1 - u \frac{1}{s^2 + \frac{1}{RC}s + \frac{1-u^2}{LC}}$$

Esta función de transferencia es estable y sus polos dependen de los valores que tome el ciclo útil (de hecho, para una respuesta subamortiguada  $4R^2 C - L > 0$ ). De esta manera, la figura 11, ilustra gráficamente la relación entrada-salida para este subsistema, donde la tensión de entrada  $V_s$  corresponde con la tensión de salida del panel solar y  $u(t)$  es la señal de control para conmutación. Dependiendo de la aplicación el sistema puede considerarse con dos entradas, según precisado en el modelo genérico en el espacio de estados dado por (6).

**Figura 11. Modelo de subsistema para convertidor DC-DC**



Fuente: autores del proyecto

### 3.3 MODELO DEL INVERSOR.

Para obtener el modelo matemático del inversor monofásico en puente completo mostrado en la figura 6 del capítulo 2, se asumen como variables de estado las corrientes en los inductores  $i_{L1}$ ,  $i_{L2}$  y la tensión en el capacitor  $v_o$ . A partir de esto y realizando un desarrollo con base en las ecuaciones circuitales del sistema, se obtiene la representación en el espacio de estados dada en (8), donde la tensión de suministro  $V_s$  puede entenderse como el producto entre una fuente constante  $V_i$  y una señal binaria  $m$  la cual toma únicamente los valores +1 o -1, dependiendo de la pareja de transistores que conducen en la configuración en puente.

$$\begin{aligned} \frac{d}{dt} i_{L1} &= 0 & 0 & -\frac{1}{L_1} & i_{L1} & + \frac{1}{L_1} V_s \\ \frac{d}{dt} i_{L2} &= 0 & -\frac{R}{L_2} & \frac{1}{L_2} & i_{L2} & + 0 \\ \frac{d}{dt} v_o &= \frac{1}{C} & -\frac{1}{C} & 0 & v_o & + 0 \end{aligned} \quad (8)$$

Ahora, considerando como salida del circuito inversor a la tensión del capacitor  $v_o$  y como entrada a la tensión de suministro  $V_s = V_i m$ , que representa la relación de la tensión de entrada con el ciclo útil de la señal de activación de los dispositivos de conmutación, es posible determinar la siguiente función de transferencia equivalente para el sistema:

$$H_s = \frac{V_o s}{V_s s} = \frac{V_o s}{V_i s} = m \frac{R+sL_2}{s^3 CL_1 L_2 + s^2 CRL_1 + s L_1 + L_2 + R},$$

Donde  $m$  representa simplemente un cambio de polaridad en la respuesta. De esta manera la figura 12 ilustra gráficamente la relación entrada-salida para este subsistema, donde la tensión de entrada  $V_i$  corresponde con la tensión de salida  $v_c(t)$  del circuito convertidor DC-DC y  $m$  es la señal de control para conmutación. Asimismo  $v_o$  corresponde con la tensión de salida aplicada a la carga.

**Figura 12. Modelo de subsistema para circuito inversor**



Fuente: Autores del proyecto

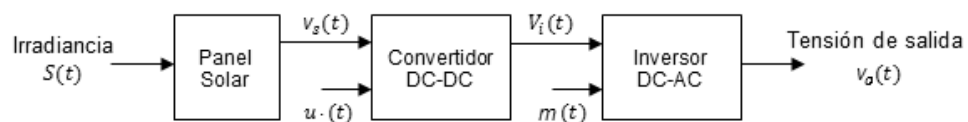
### 3.4 ACOPLAMIENTO DE MODELOS Y ASIGNACIÓN DE PARÁMETROS.

Para fines de análisis numérico del sistema de microgeneración eléctrica fotovoltaico propuesto, se realizará en este apartado el acople de los subsistemas y la respectiva asignación de parámetros a partir del dimensionamiento apropiado de componentes, que permitan recrear escenarios prácticos para una eventual implementación real del sistema y con base en los mismos, la caracterización del comportamiento dinámico y posterior manipulación a través de control, según se mostrará en el capítulo siguiente.

**3.4.1 Acople de subsistemas.** Las principales variables de los modelos que constituyen el sistema de microgeneración propuesto se ilustraron en los diagramas de bloques de las figuras 9, 11 y 12. De esta manera la variable de entrada general corresponde con la irradiancia  $S(t)$ , misma que genera una tensión  $v_s(t)$  que representa la entrada al convertidor DC-DC, que produce una tensión de salida  $V_i(t)$  como entrada al circuito inversor y que finalmente produce una tensión alterna  $v_o(t)$  aplicada a la carga, siendo la salida general del sistema.

La figura 13 presenta este acoplamiento entre los tres subsistemas de base y las correspondientes señales intermedias, a partir de lo cual también se resalta el hecho que las entradas de control en los circuitos convertidor de potencia DC-DC e inversor, corresponden con generadores de señal del tipo PWM configurados individualmente para cada caso.

**Figura 13. Subsistemas acoplados.**



Fuente: Autores del proyecto

**3.4.2 Asignación de parámetros en subsistema de panel solar.** al y como se verá posteriormente, para efectos de simulación se realizó una contrastación de resultados numéricos obtenidos a partir de la evaluación en MATLAB® de los modelos presentados, respecto a los generados por el paquete comercial POWERSIM o PSIM®. Por tanto, para el caso de PSIM® se dispone de una componente que incorpora el modelo de un panel fotovoltaico, el cual fue configurado para las simulaciones con los datos de la tabla 8, que resume los parámetros característicos para un dispositivo comercial KYOCERA KD240GH.

**Tabla 8. Parámetros característicos del panel solar**

<b>Voc</b>	36.9 [V]
<b>Isc</b>	8.59 [A]
<b>Vmpp</b>	29.8 [V]
<b>Impp</b>	8.06 [A]
<b>Potencia</b>	240 [W]
<b>Eficiencia</b>	14.2%
<b>Número de Celdas</b>	60
<b>Tecnología</b>	Policristalino

Fuente: [38]

**3.4.3 Asignación de parámetros en subsistema convertidor DC-DC.** Para el cálculo de los elementos se asume un modo continuo de conducción (MCC), la corriente en la bobina siempre positiva, la tensión de salida constante y todos los componentes ideales. A partir de (7) es posible obtener el valor del ciclo útil del convertidor como

$$D = 1 - \frac{90}{340} = 0.73,$$

Tras asumir una tensión de salida de 340 [V] en los terminales del capacitor y una entrada de 90 [V] en el circuito.

Asimismo, definiendo a la frecuencia de conmutación  $f_s$  como 10 [kHz] (valor típico), es posible determinar la inductancia mínima del circuito, sabiendo que con base en los datos de potencia requerida, el valor de resistencia corresponde con:

$$R = \frac{v_c^2}{P_o} = \frac{340^2}{720} = 160 [\Omega],$$

Y por tanto [24]:

$$L_{min} = \frac{RD(1-D)^2}{2f_s} = \frac{(160)(0.73) 1-0.73^2}{20000} = 1.577 [mH].$$

También es posible calcular el valor del capacitor de acople a la entrada del convertidor mediante [53]:

$$C_{in} = \frac{\Delta I_r}{8f_s \Delta V_r},$$

Donde los factores de rizado de corriente  $\Delta I_r$  y tensión  $\Delta V_r$  no deben exceder el 1% de los correspondientes valores de entrada al circuito convertidor [24,25]. Por tanto,

$$C_{in} = \frac{(0.01) \frac{720 [W]}{90 [V]}}{8(10 [kHz])(0.01)(90 [V])} = 1.11 [\mu F] \cong 1 \mu F .$$

Asimismo se calcula el capacitor de salida mediante [24, 25]:

$$C_{out} > \frac{v_c D}{R f_s \Delta v_c} = \frac{(340)(0.73)}{(160)(10000)(0.01)(340)} = 45.625 \mu F \cong 50 \mu F .$$

**3.4.4 Asignación de parámetros en subsistema inversor.** Los parámetros del inversor se escogieron con base en una tensión continua de entrada  $V_i = 340$  [V] y una tensión deseada a la salida de  $v_o = 120$  [VAC] / 60 [Hz]. Como sistema de actuación del circuito inversor se seleccionó una modulación PWM de tipo senoidal (SPWM [24,25]), en la cual el ancho de los pulsos de conmutación varía en proporción con la amplitud de una onda seno de referencia (moduladora) evaluada en el centro del mismo pulso para reducir de manera significativa el factor de distorsión y los armónicos en la señal alterna entregada a la salida. En otras palabras, la señal de gobierno aplicada a los dispositivos de conmutación del circuito inversor ( $m(t)$  en las figuras 12 y 13) corresponde con la salida de un comparador entre la señal moduladora senoidal y una portadora triangular.

La frecuencia de la señal portadora se toma mucho mayor que aquella de la señal moduladora, en una proporción que define la cantidad de pulsos por ciclo de señal moduladora en la correspondiente señal modulada. Las amplitudes pico de las señales moduladora y portadora, permiten definir el índice  $\alpha$  de modulación de amplitud, como la relación entre las amplitudes de la señal de referencia y portadora. Los valores empleados de frecuencia y amplitud para las señales moduladora y portadora en el generador SPWM se incluyen en la Tabla 9 (donde la amplitud de la moduladora se varía en un rango de tensión).

**Tabla 9. Valores señales modulación SPWM.**

	SEÑAL MODULADORA	SEÑAL PORTADORA
Frecuencia	60 [Hz]	6000 [Hz]
Amplitud pico	0 ~ 1 [V]	1 [V]

Fuente: Autores del proyecto

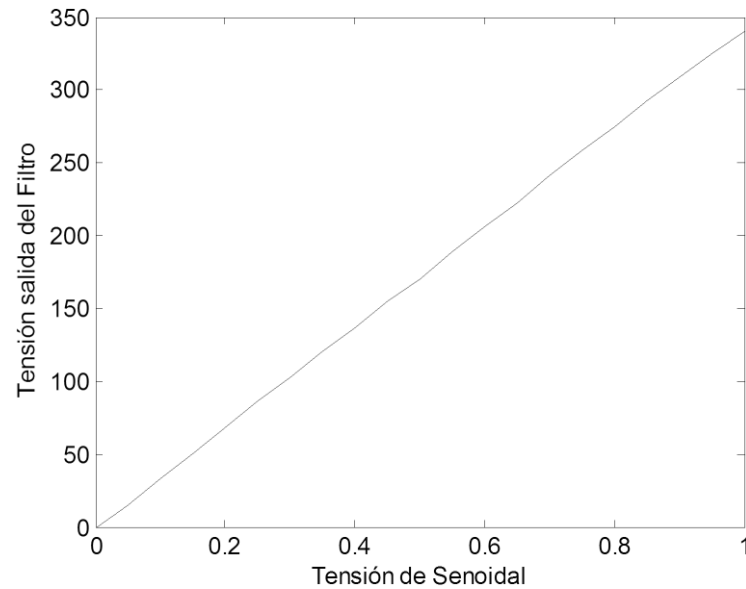
Luego, tomando en consideración predicciones teóricas [24,25], si se cumple que  $\alpha \leq 1$ , el índice de modulación de amplitud constituirá una relación de proporcionalidad lineal entre la amplitud de frecuencia fundamental de la tensión de salida del inversor  $v_o$  y la tensión de entrada  $V_i$ ; es decir  $v_o = \alpha V_i$ . De esta manera, se obtuvieron los resultados ilustrados respectivamente en la tabla 10 y en la figura 14 para la relación experimental por simulación entre la salida del circuito inversor y el índice de modulación en el circuito actuador (este último con dependencia directa en el valor de la amplitud de la señal moduladora senoidal en el bloque SPWM). A partir de estos resultados se denota una proporcionalidad lineal entre valores. Adicionalmente, se verifica que para  $\alpha \approx 0.5$  se obtiene el valor nominal de tensión deseado a la salida (en valor eficaz dado por  $v_o/\sqrt{2}$ ).

**Tabla 10. Relación tabulada para tensión de salida vs índice de modulación.**

$v_o$	340	325	309	292	275	258	241	223	206	189	170	155	137	120	103	86	68	51	33	15	0
$\alpha$	1	0.95	0.9	0.85	0.8	0.75	0.7	0.65	0.6	0.55	0.5	0.45	0.4	0.35	0.3	0.25	0.2	0.15	0.1	0.05	0

Fuente: Autores del proyecto

**Figura 14. Relación gráfica para tensión de salida vs índice de modulación.**



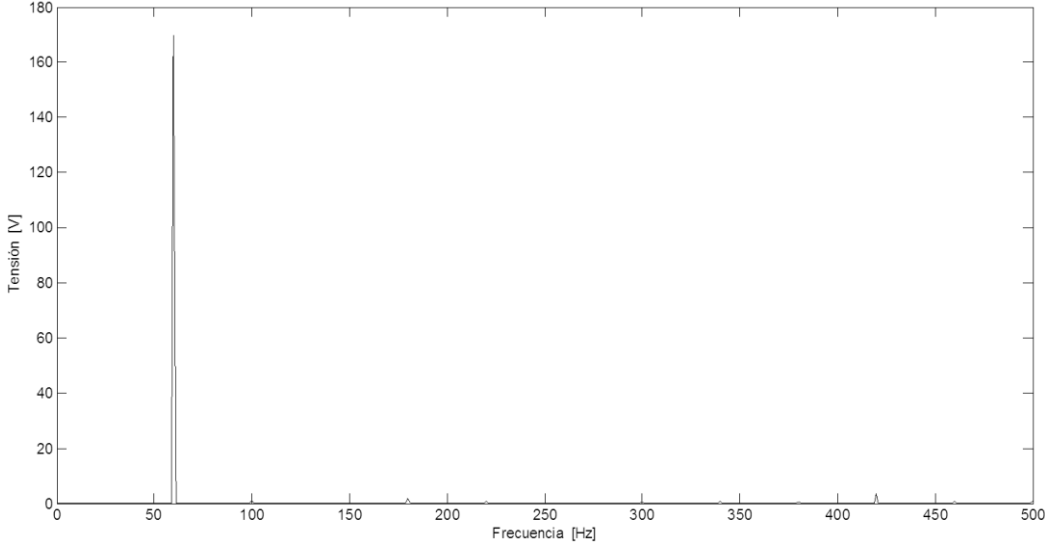
Fuente: Autores del proyecto

Finalmente, el filtro pasa bajo conectado en paralelo a la carga, hace posible obtener una señal de tipo senoidal a la salida del inversor. Este se diseña para que solo pase el armónico fundamental de 60 [Hz] [24,25]. Para encontrar el valor de la inductancia del filtro se fijó el valor de capacitancia en 20 [ $\mu$ F] y se realizó una asignación empírica para el valor del inductor a partir de resultados de simulación, determinando a 20 [mH] como el valor más adecuado para este parámetro. Con base en lo anterior, la frecuencia de corte  $f_0$  del filtro es:

$$f_0 = \frac{1}{2\pi \sqrt{L_1 C}} = 251.64 [Hz].$$

Es claro hacer notar que, a pesar de ser una frecuencia de corte notablemente superior a la componente armónica fundamental de 60 [Hz] que se desea recuperar, es garantizado que a la salida del filtro se obtendrá este único elemento como predominante según las predicciones teóricas, verificadas a través del espectro de la señal recuperada en la carga del sistema que se presenta para ilustración en la figura 15.

**Figura 15. Espectro de amplitud de la señal a la salida del sistema de microgeneración.**



Fuente: Autores del proyecto

## 4. AJUSTE DE RANGO PARA LA SELECCIÓN DEL CONTROLADOR

Una vez descrito, modelado, dimensionado y parametrizado el sistema propuesto para microgeneración eléctrica basado en fuentes fotovoltaicas, es momento de realizar una caracterización apropiada de su comportamiento para implementar acciones de control en lazo cerrado. Por tanto, se incluirá en este apartado la sintonización de un controlador PID para el sistema.

### 4.1 AJUSTE DE RANGOS

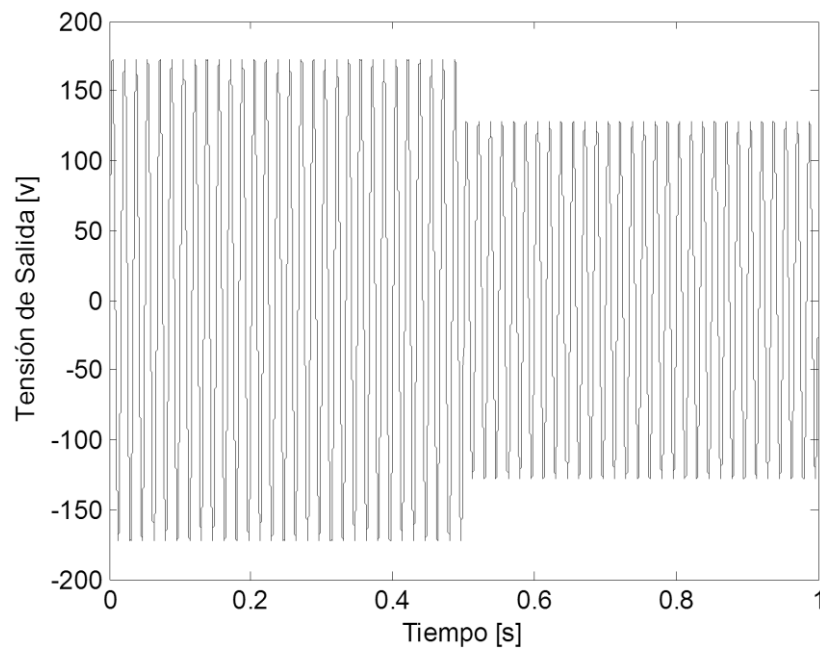
En el presente proyecto de grado, se considera una acción de control que realizará una corrección en el circuito inversor para mantener invariante la tensión suministrada en su salida hacia la carga, a pesar de perturbaciones en ella (i.e. la carga). Por tanto, se asumen invariantes las condiciones de operación nominal en el arreglo fotovoltaico (panel) y en el convertidor DC-DC. De esta manera, los elementos previos al circuito inversor se modelan en las simulaciones como una fuente fija de 340 [VDC]. Trabajos posteriores estudiarán las variaciones de entrada en el sistema (por ejemplo algoritmos para lograr el seguimiento al punto de máxima potencia MPPT).

Luego, es claro a partir de los resultados de la sección 3.4.4 que la tensión  $v_o$  a la salida del circuito inversor depende linealmente del índice de modulación de amplitud  $\alpha$  en el bloque de SPWM. Tomando en consideración las especificaciones particulares del problema, es claro entonces que esta relación entrada-salida corresponde con la planta.

Inicialmente considérese la respuesta del sistema en lazo abierto ante una perturbación en la carga (correspondiente con una alteración porcentual de 15% [ $\Omega$ ]) aplicada  $t = 0.5$  [s] según se muestra en la figura 16. A partir de este resultado

es evidente que el voltaje de salida del sistema no logra mantenerse en el valor nominal deseado bajo la acción de perturbaciones, razón por la cual se justifica la implementación de un control adecuado para realizar las correcciones respectivas. Cabe aclarar que los resultados numéricos presentados en este capítulo han sido desarrollados en el paquete de simulación PSIM®.

**Figura 16. Respuesta del sistema en lazo abierto ante perturbaciones en la carga.**



Fuente: Autores

El primer paso hacia la implementación de una acción de control es cerrar el lazo de realimentación respectivo. Para ello se considera la información del sistema en lazo abierto dada en la tabla 10 y la figura 14. A partir de estos valores, es posible encontrar una relación matemática entre la tensión de salida  $v_o$  y el índice de modulación  $\alpha$  dada por:

$$v_o = \frac{340}{1} \alpha, \quad (9)$$

O equivalentemente, con una relación inversa dada por:

$$\alpha = \frac{1}{340} v_o. \quad (10)$$

Asimismo, se considera un rango de variación del error posible, tomando como valor nominal de referencia  $v_{od}$ , el siguiente:

$$e(t) = v_o(t) - v_{od} \rightarrow e(t) \in [-340, 340]. \quad (11)$$

Es decir, se asume que el error puede tomar valores pico de hasta dos veces el máximo valor de la salida en ambas direcciones (siendo resultantes de casos extremos para la referencia; i.e. referencia cero y salida máxima, referencia máxima y salida cero).

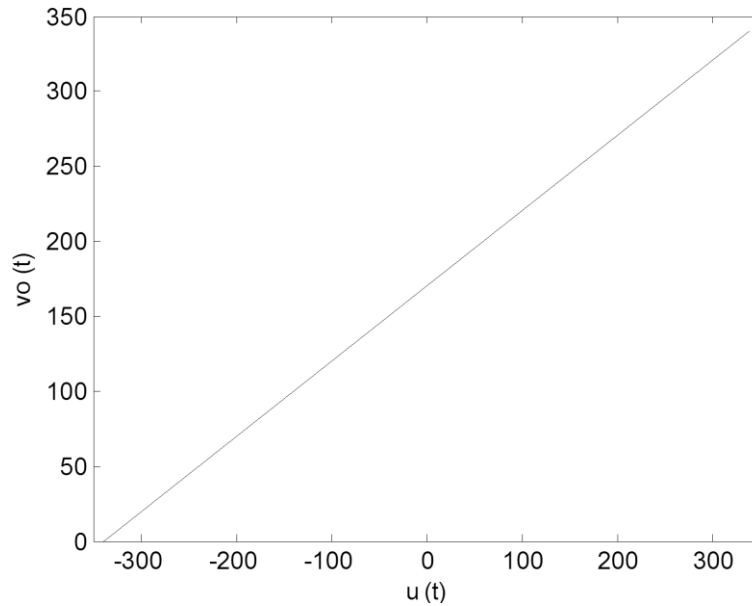
Con este rango máximo posible, se define un punto de operación nominal dado por el valor medio del voltaje pico de salida; o equivalentemente  $v_{od} = 170$  [VAC] pico.

Al cerrarse el lazo de control se constituye automáticamente un control proporcional de ganancia unitaria y por tanto la señal de control corresponde con la señal de error. Sin embargo no es posible aplicar directamente la señal de control a la planta pues se requiere primero ajustarla a una escala equivalente con la señal de actuación  $\alpha(t)$ .

Esta consideración nos lleva a plantear el diagrama de la figura 17, donde se relacionan linealmente las señales  $u(t)$  del controlador y  $v_o$  de la planta, y que matemáticamente permiten obtener la siguiente expresión:

$$v_o = \frac{1}{2}u + 170 \quad \forall u \in [-340, 340]. \quad (12)$$

**Figura 17. Relación lineal entre salida de control y salida de la planta.**



Fuente: Autores del proyecto

Note que para  $u(t) = 0$ , se obtiene el valor nominal requerido a la salida. También observe que la salida en este caso es un valor deseado, y por tanto tras combinar (10) y (12) se obtiene la siguiente relación equivalente entre la señal del controlador y la entrada a la planta:

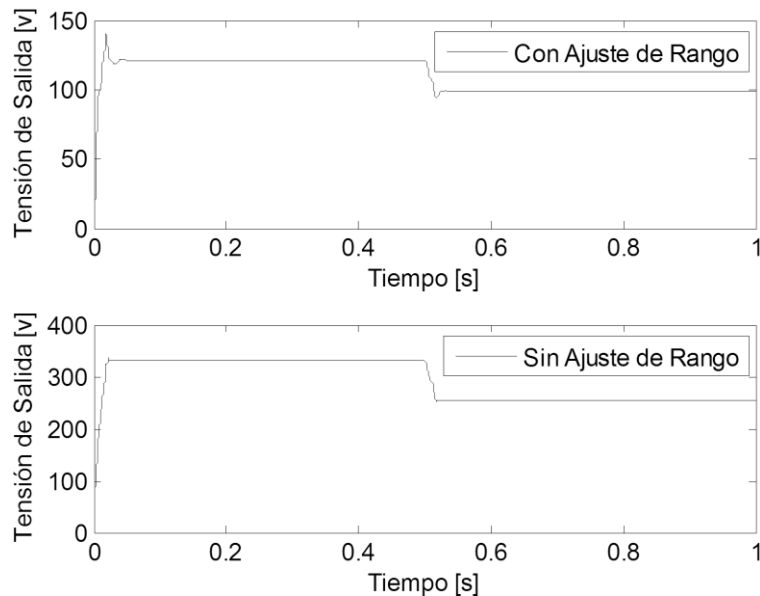
$$\alpha(t) = \frac{1}{680}u(t) + \frac{1}{2}. \quad (13)$$

De esta manera, la señal obtenida en el controlador se mapea a un valor de  $\alpha$  admisible, que posteriormente repercute en un valor de  $v_o$  consistente con los requerimientos de operación (siempre que  $u \in -340, 340$  ).

Lo importante del procedimiento propuesto es asegurar un comportamiento lineal en la planta, evitando zonas muertas y de saturación durante la operación del sistema de control. Como ilustración adicional, en la figura 18 se muestra una comparación de la respuesta del sistema con y sin ajuste de rangos, confirmando

la desproporción de escalas en la curva y la imposibilidad de recrear variaciones dinámicas transitorias obtenidas cuando no se toma en cuenta esta corrección.

**Figura 18. Respuesta de sistema en lazo cerrado con ganancia proporcional unitaria con y sin ajuste de rango.**



Fuente: Autores del proyecto

## 4.2 SELECCIÓN DE GANANCIA PROPORCIONAL

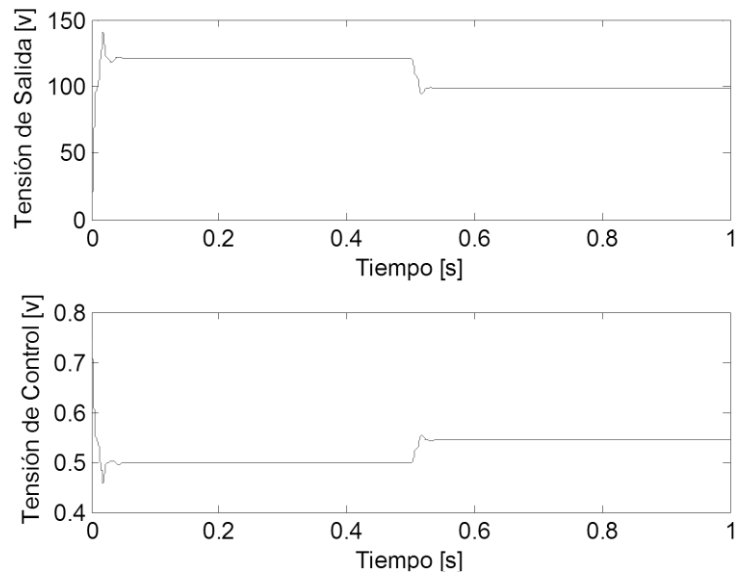
Empleando el esquema de ajuste de rango para el lazo de control propuesto en la sección anterior, considere una modificación de la ganancia de lazo para valores  $K_p > 1$ .

Evidentemente el resultado será un incremento en el rango de valores prácticos de la señal de control comparados con la señal de error, admisibles sin embargo dada la amplia tolerancia práctica considerada al momento de establecer el rango inicial (de la señal de error) con la cual se ajustaron las escalas del lazo de realimentación.

De esta manera, se analizó la respuesta del sistema realimentado ante una perturbación de carga (entre 0.3 y 0.6 [s]) para distintos valores de la ganancia de lazo  $K_p$  tal y como se observa en las Figuras 19, 20 y 21 para los valores  $K_p = 1, 5$  y 11 respectivamente.

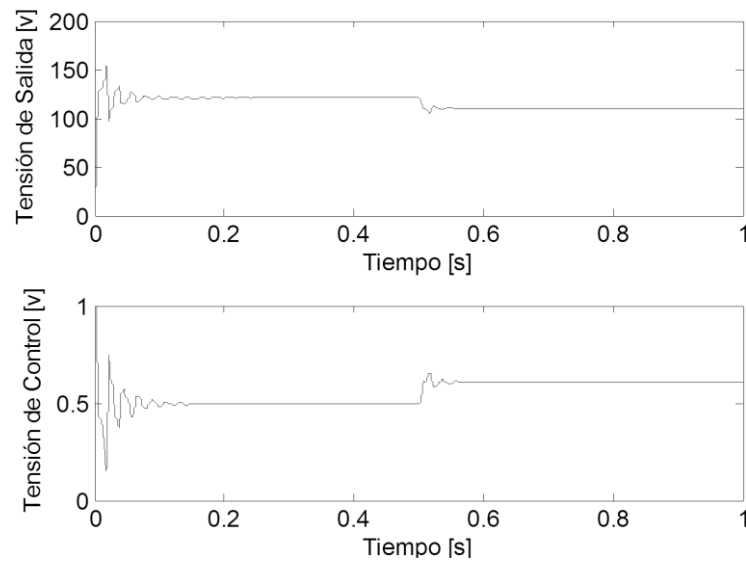
Como puede observarse de estos resultados, el incremento de ganancia causa saturación de la señal de control para  $K_p = 11$ , por tanto se toma la mitad de este valor ( $K_p = 5$ ) como la ganancia proporcional del controlador.

**Figura 19. Respuesta del sistema ante perturbaciones de carga para acción proporcional con  $K_p = 1$ : tensión de salida (superior); acción de control (inferior).**



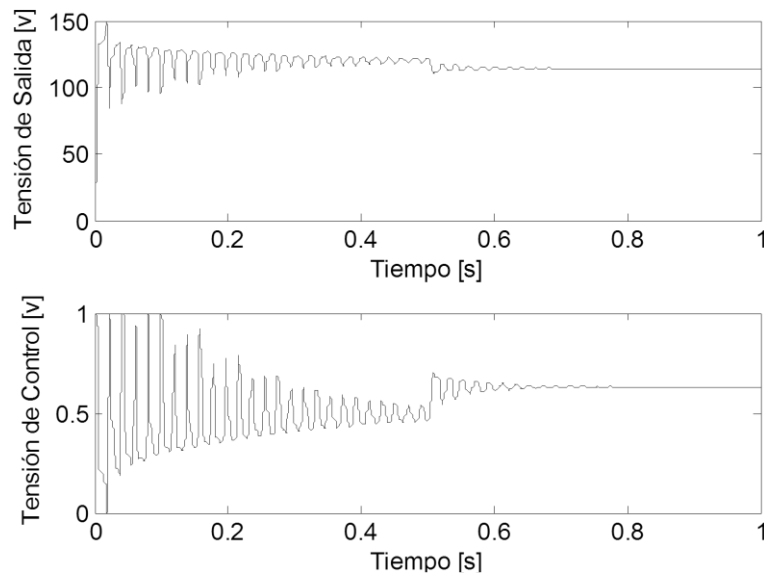
Fuente: Autores del proyecto

**Figura 20. Respuesta del sistema ante perturbaciones de carga para acción proporcional con  $K_p = 5$ : tensión de salida (superior); acción de control (inferior).**



Fuente: Autores del proyecto

**Figura 21. Respuesta del sistema ante perturbaciones de carga para acción proporcional con  $K_p = 11$ : tensión de salida (superior); acción de control (inferior).**



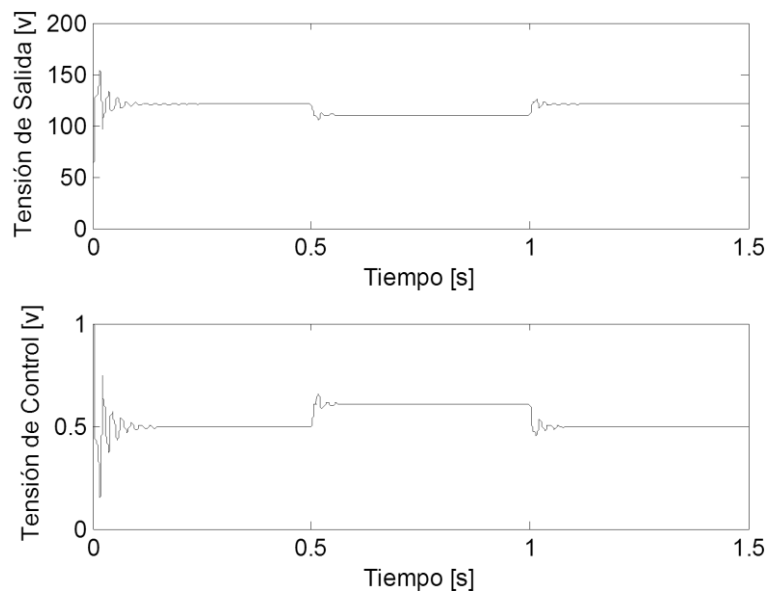
Fuente: Autores del proyecto

### 4.3 SELECCIÓN DE GANANCIA INTEGRAL

Una vez seleccionada la ganancia proporcional, es posible analizar la incidencia del sistema controlado ante acciones de tipo integral (de hecho proporcional-integral). De esta manera, las figuras 22, 23, 24 y 25 permiten verificar la respuesta a perturbaciones del sistema controlado con una acción PI para  $K_p = 5$  y  $K_i = 0.1, 20, 40$  y  $60$  respectivamente.

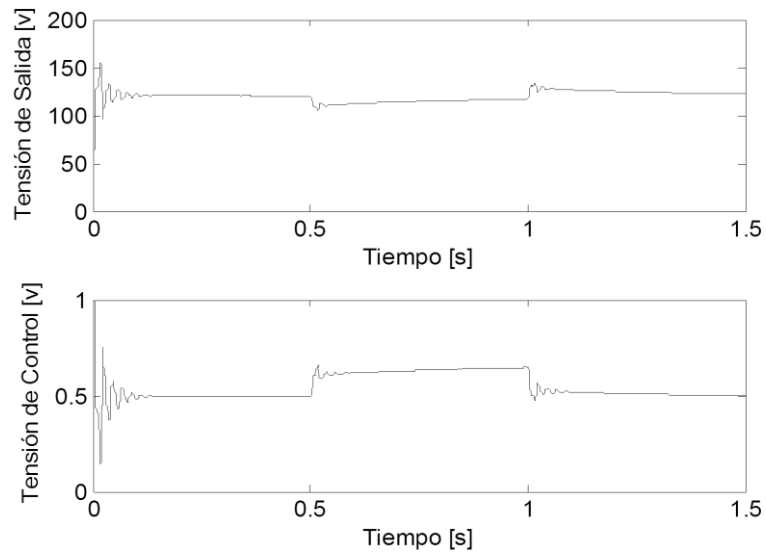
De estos resultados se observa una disminución del tiempo de establecimiento en la medida que se aumenta el valor de la constante integral. También se verifica un incremento del valor de máximo sobreimpulso. Por ello, se considera que  $K_i = 60$  es el valor que da un sobreimpulso consistente con los requerimientos teóricos para un controlador PID (alrededor del 18%) y un tiempo de establecimiento comparativamente menor que para otros valores inferiores.

**Figura 22. Respuesta del sistema ante perturbaciones de carga para acción proporcional-integral con  $K_p = 5$  y  $K_i = 0.1$ : tensión de salida (superior); acción de control (inferior).**



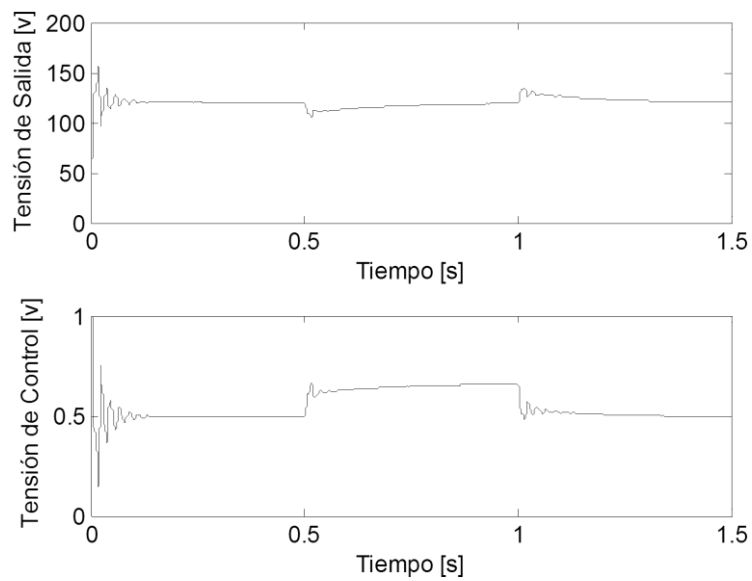
Fuente: Autores del proyecto

**Figura 23. Respuesta del sistema ante perturbaciones de carga para acción proporcional-integral con  $K_p = 5$  y  $K_i = 20$ : tensión de salida (superior); acción de control (inferior).**



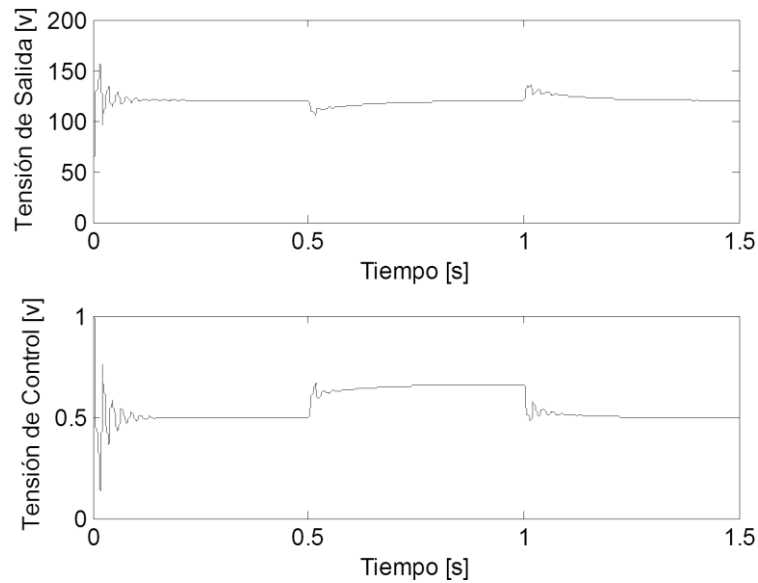
Fuente: Autores del proyecto

**Figura 24. Respuesta del sistema ante perturbaciones de carga para acción proporcional-integral con  $K_p = 5$  y  $K_i = 40$ : tensión de salida (superior); acción de control (inferior).**



Fuente: Autores del proyecto

**Figura 25. Respuesta del sistema ante perturbaciones de carga para acción proporcional-integral con  $K_p = 5$  y  $K_i = 60$ : tensión de salida (superior); acción de control (inferior).**

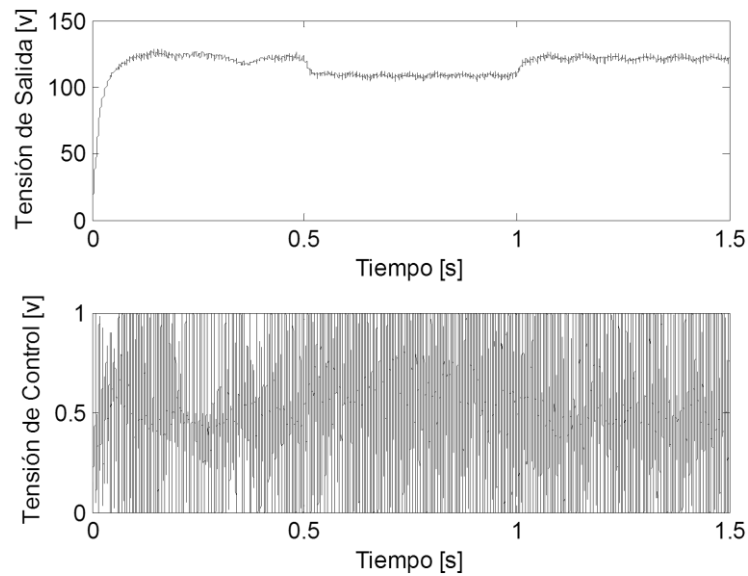


Fuente: Autores del proyecto

#### **4.4 SELECCIÓN DE GANANCIA DERIVATIVA**

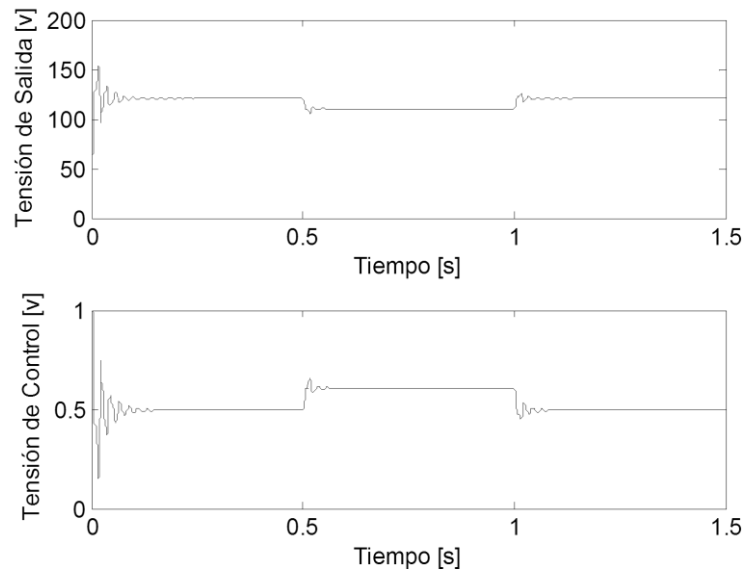
Posterior a la selección de las ganancias proporcional e integral, se procede a valorar la acción derivativa. Para ello se muestra en la figura 26 la acción proporcional-derivativa con  $K_p = 5$  y  $K_d = 0.1$ , donde se observa una amplificación de ruido importante por parte de la componente derivativa incorporada. Este efecto se atenúa al reducir el valor de ganancia derivativa en  $K_d = 0.000001$  como se muestra en la figura 27. Finalmente es posible observar el comportamiento del controlador sintonizado en la figura 28 para  $K_p = 5$ ,  $K_i = 60$  y  $K_d = 0.000001$  constituyendo una acción PID (aproximadamente PI).

**Figura 26. Respuesta del sistema ante perturbaciones de carga para acción proporcional-derivativa con  $K_p = 5$  y  $K_d = 0.1$ : tensión de salida (superior); acción de control (inferior).**



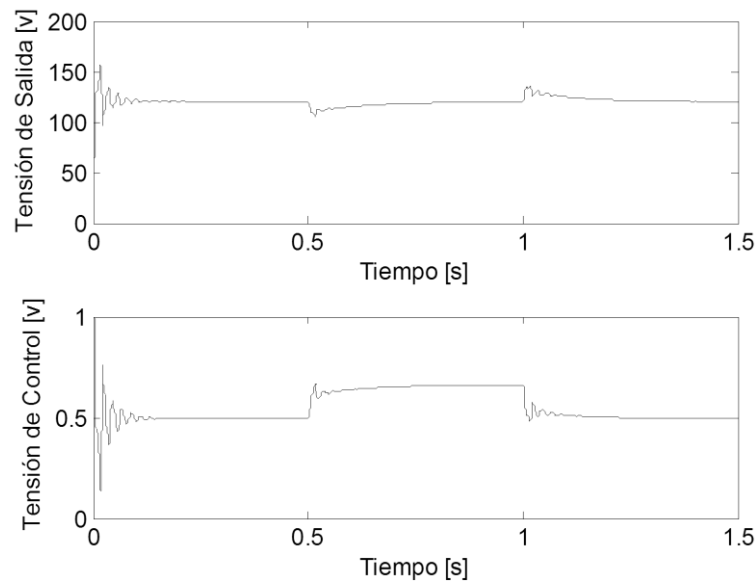
Fuente: Autores del proyecto

**Figura 27. Respuesta del sistema ante perturbaciones de carga para acción proporcional-derivativa con  $K_p = 5$  y  $K_d = 0.000001$ : tensión de salida (superior); acción de control (inferior).**



Fuente: Autores del proyecto

**Figura 28. Respuesta del sistema ante perturbaciones de carga para acción proporcional-integral-derivativa con  $K_p = 5$ ,  $K_i = 60$  y  $K_d = 0.000001$ : tensión de salida (superior); acción de control (inferior).**

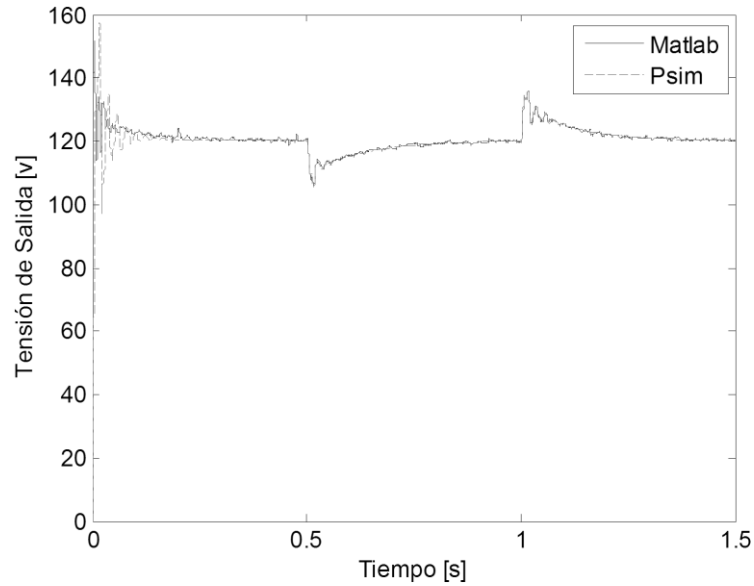


Fuente: Autores del proyecto

#### **4.5 CONTRASTACIÓN SIMULADOR COMERCIAL Vs. MODELO MATEMÁTICO**

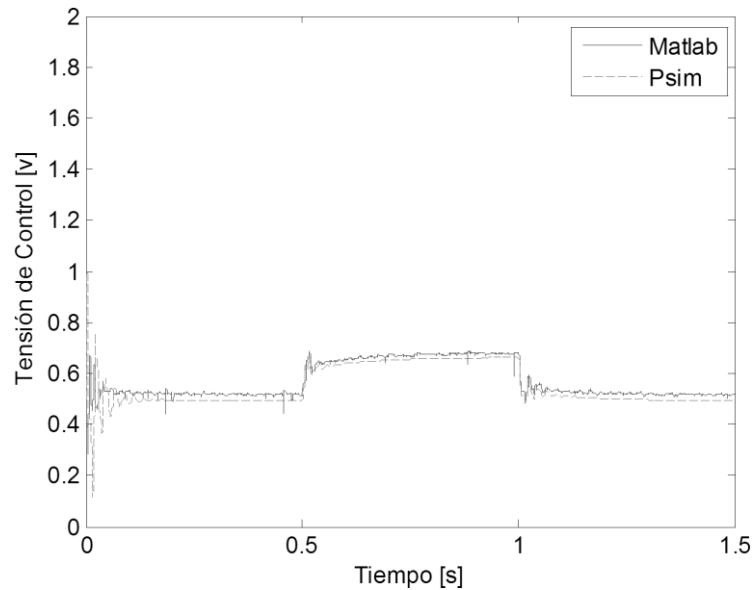
Finalmente, las simulaciones realizadas en PSIM® fueron contrastadas con resultados obtenidos tras evaluar numéricamente en MATLAB® los modelos matemáticos para el circuito inversor, el controlador PID y el correspondiente ajuste de rangos. De esta manera la figura 29 permite verificar la captura cualitativa y cuantitativa de las principales características dinámicas de la respuesta temporal del sistema. Asimismo, la figura 30 ilustra lo propio para la señal de control. Estos resultados son fundamentales para el estudio y posterior desarrollo de estrategias de avanzadas de control (verificables en laboratorio) que permitan mejorar el desempeño del control PID propuesto.

**Figura 29. Respuesta del sistema ante perturbaciones de carga para acción proporcional-integral-derivativa con  $K_p = 5$ ,  $K_i = 60$  y  $K_d = 0.000001$ .**



Fuente: Autores del proyecto

**Figura 30. Respuesta del sistema ante perturbaciones de carga para acción proporcional-integral-derivativa con  $K_p = 5$ ,  $K_i = 60$  y  $K_d = 0.000001$ .**



Fuente: Autores del proyecto

## 5. RECOMENDACIONES, CONCLUSIONES Y TRABAJO FUTURO

### 5.1 CONCLUSIONES

- Se definió la estructura general para un sistema de microgeneración fotovoltaico de uso doméstico. Se realizó el estudio de las topologías para dichos sistemas y se seleccionó el fotovoltaico autónomo de uso doméstico ilustrado en la figura 2; además se describieron cada uno de sus principales subsistemas y se seleccionaron algunos dispositivos comerciales teniendo en cuenta su disponibilidad en el mercado y viabilidad de desarrollo.
- Se asignaron valores de parámetros y se obtuvo un modelo dinámico del sistema para la relación: luz solar (entrada) vs. voltaje en la carga (salida). Dicho modelo se describió en la figura 13 mediante el acople de los subsistemas; a partir de ello se asignaron los valores para el dimensionamiento del sistema que permite obtener una tensión a la salida de 120 [VAV] / 60 [Hz].
- Se diseñó una estrategia de control. Se logró mantener invariante la tensión a la salida del sistema mediante un controlador PID diseñado sobre el circuito inversor, aun cuando son aplicadas perturbaciones en la carga.
- Finalmente se validó la estrategia de control mediante simulaciones en PSIM® contrastadas con resultados obtenidos tras evaluar numéricamente en MATLAB® el modelo matemático para el circuito inversor, como se muestra en la figura 29.

## 5.2 RECOMENDACIONES Y TRABAJO FUTURO

- Como recomendación se puede mencionar la necesidad de ajustar los parámetros del sistema simulado en MATLAB® como en PSIM® a valores que faciliten su implementación práctica en un circuito real, debido a que en las simulaciones los diferentes dispositivos se han considerado como ideales.
- Como trabajo futuro se propone realizar el diseño de un control de tipo MPPT en el circuito elevador DC-DC que permitirá encontrar el punto de máxima potencia del sistema de microgeneración fotovoltaico y así mejorar el sistema en términos de rendimiento haciendo frente a condiciones meteorológicas menos estables con respecto a los niveles de Irradiancia.
- Teniendo el modelo dinámico de cada subsistema y habiendo contrastado los resultados tanto en PSIM® como en MATLAB®, el diseño de un tipo de controlador PID robusto o por modos deslizantes se propone como alternativa a la hora de comparar y aplicar esta clase de estrategias avanzadas de control.

## REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

[1]. Sánchez López, Juan de Dios. Dispositivos Electrónicos de Potencia. México, Baja California, 2002. Editorial Tomás di Belia. ISBN 970-9051-71-7. Universidad Autónoma de Baja California.

[2]. Beltrán Adán, José. Prototipo fotovoltaico con seguimiento del Sol para procesos electroquímicos., Cuernavaca, Morelos, México. 2007. Tesis de Maestría en Ciencias, para optar al título de Maestro en Ciencias en Ingeniería Mecatrónica. Centro Nacional de Investigación y Desarrollo Tecnológico Coordinación de Mecatrónica.

[3]. Chavarria Roé, Javier. Diseño e Implementación de un Inversor Multinivel para Sistemas Fotovoltaicos Conectados a Red, España, Barcelona, 2010, 242 h. Tesis para optar al grado de Magister en Ingeniería Electrónica. Universitat Politècnica de Catalunya. Escola Tècnica Superior d'Enginyeria de Telecomunicació de Barcelona.

[4]. Horacio Vera, Luis; Krenzinger, Amo. Desempeño en simulación de sistemas fotovoltaicos. Vol 8. N°1. Argentina, 2004. ISSN: 0329-5184.

[5]. Nasre Nasser, Marvven. Modelado y simulación de sistemas fotovoltaicos para entidades fijas, aisladas y de uso residencial. Mérida, Venezuela, 2006. Tesis de Posgrado, Universidad de Los Andes. Centro de simulación y modelado (CESIMO), Facultad de Ingeniería.

[6]. CEIN S.A, Guiactiva Energía solar fotovoltaica. Navarra, 2005. Centro Europeo de Empresas e Innovación de Navarra. 31110 Noáin (Navarra).

[7]. Cortés Gonzales, Francisca. Estudio de factibilidad del uso de micro generación en base a energías renovables en redes de baja tensión. Chile, Santiago, 2008. Tesis para optar al título de Ingeniero Civil Electricista. Facultad de Ciencias Físicas y Matemáticas Departamento de ingeniería Eléctrica. Universidad de Chile.

[8]. Clúa García, J; De Battista, H; Mantz, R.J. Alternativa de control por modo deslizante para seguimiento robusto de la máxima potencia fotovoltaica. Vol 10. Argentina, 2006. ISSN 0329-5184.

[9]. Valencia Quintero, James Paul. Generación distribuida: Democratización de la energía Eléctrica. Colombia, Bogotá, 2008, Pp. 105-112. Universidad Nacional de Colombia. ISSN 1900-0642.

[10]. Lizarazú Basto, Yuri Bibiana; Torres Salazar, Leydi Andrea. Diseño De Un Sistema de Generación Eléctrica Fotovoltaica y de una Red Eléctrica en Corriente Continua de Baja Tensión para el posible nuevo edificio Eléctrica II de la Universidad Industrial de Santander, Colombia, Bucaramanga, 2010, 297 h. Tesis para obtener el título de Ingeniero Electricista, Escuela de Ingenierías Eléctrica, Electrónica y de Telecomunicaciones. Universidad Industrial de Santander.

[11]. Martínez Ortiz, William; Santamaría Forero Nelson Reinaldo. Diseño de una herramienta computacional en Matlab para el análisis energético de sistemas fotovoltaicos, Colombia, Bucaramanga, 2012, 187 h. Trabajo de grado para obtener el título de Ingeniero Electricista, Escuela de Ingenierías Eléctrica, Electrónica y de Telecomunicaciones. Universidad Industrial de Santander.

[12]. Rey López, Juan Manuel; Vergara Barrios, Pedro Pablo. Diseño de una microred de baja tensión para el laboratorio de integración energética del parque tecnológico de guatiguara, Colombia, Bucaramanga, 2012, 163 h. Trabajo de

grado para optar por el título de Ingeniero Electricista e Ingeniero Electrónico, respectivamente. Escuela de Ingenierías Eléctrica, Electrónica y de Telecomunicaciones. Universidad Industrial de Santander.

[13] Joaquín Barrios, Carmen. Diseño de un sistema solar fotovoltaico aislado, para el suministro de energía eléctrica a la comunidad rural buena vista, san marcos. Guatemala, Junio de 2008, 284h. Trabajo de Grado (Ingeniero Químico). Universidad de san Carlos de Guatemala. Facultad de Ingeniería.

[14] Méndez Muñiz, Javier; Cuervo García, Rafael. Energía Solar Fotovoltaica. 2da Edición. ECA, Instituto de Tecnología y Formación S.A.U. España: FC editorial, 2007. 245p. ISBN-13: 978-84-96743-29-8

[15] Horikoshi, Hiyo. Análisis de las componentes armónicas de los inversores fotovoltaicos de conexión a red. Leganés, septiembre 2009, 136h. Trabajo de Grado (Ingeniería técnica Industrial). Universidad Carlos III de Madrid. Escuela politécnica superior. Departamento de tecnología electrónica.

[16] Chavarría Roé, Javier. Diseño e implementación de un inversor multinivel para sistemas fotovoltaicos conectados a red. Barcelona, curso 2009 – 2010, 242h. Titulación Máster en Electrónica. Universitat Politècnica de Catalunya. Departamento de Ingeniería Electrónica.

[17] Nasre Nasser, Marvven. Modelado y simulación de sistemas fotovoltaicos para entidades fijas, aisladas y de uso residencial. Mérida, Venezuela. Julio 2006, 10h. Propuesta de tesis, Postgrado de Modelado y simulación de sistemas. Universidad de los Andes. Centro de simulación y modelado (CESIMO). Facultad de Ingeniería.

- [18] Vega Rodríguez, Juan. Convertidor integrado para sistemas fotovoltaicos conectados a red eléctrica. México, Morelos, Cuernavaca. 7 de agosto de 2009, 112h. Tesis de Maestría en ciencias en ingeniería electrónica. Centro Nacional de Investigación y desarrollo tecnológico. Departamento de ingeniería electrónica.
- [19] Guíactiva: Guíactiva Energía Solar. Centro Europeo de Empresas e Innovación de Navarra. Cein s.a. Gobierno de Navarra. Primera ed, Noviembre 2004.
- [20] Alonso Abella, Miguel. Sistemas fotovoltaicos. Avenida Complutense, Madrid. 59h. Master en Energías Renovables y Mercadeo Energético. Centro de Investigaciones Energéticas, medioambientales y tecnológicas. Departamento de energías renovables.
- [21] Negroni Vera, Juan José. Análisis y diseño de controladores para inversores multinivel en sistemas fotovoltaicos conectados a red. Barcelona, 2007. Tesis Doctoral en Ingeniería Electrónica.
- [22] Pareja Aparicio, Miguel. Energía Solar Fotovoltaica: Cálculo de una instalación aislada. 2da Edición. Barcelona: Marcombo Editorial, 2010. 197p. ISBN: 978-84-267-1596-8.
- [23] Beshr, Mohamed H. Khater, Hany A. Abdelraouf, Amr A. Modelling of a Residential Solar Stand-Alone Power System. Proceedings of the 1<sup>st</sup> International Nuclear and Renewable Energy Conference (INREC10), Amman, Jordan, March 21-24, 2010.
- [24] Hart, W. Electrónica de potencia: Introducción a la electrónica de potencia. 1ra Edición. Valparaiso, Indiana. Prentice Hall, Pearson Education, 2001. 456p. ISBN: 84-205-3179-0.

- [25] Rashid, Muhammad H. Electrónica de potencia: Circuitos, dispositivos y aplicaciones. 2da Edición. West Lafayette, Indiana. Prentice Hall, Pearson Education, 1999. 720p. ISBN: 968-880-586-6.
- [26] Campos D, Daniel U. Experimentos en teoría de control: Convertidores dc-dc. Universidad San Luis Potosí, México.2010. Facultad de ciencias.
- [27] Instituto Colombiano de Normas Técnicas y Certificación. Norma Técnica Colombiana: Código Eléctrico Colombiano. Bogotá: ICONTEC. 1998. NTC 2050.
- [28] Shaffer, Randall. Fundamentals of Power Electronics with Matlab. 1ra Edición. Boston, Massachusetts. Thomson Learning Inc, Charles River Media, 2007. 401p. ISBN: 1-58450-852-3. eISBN: 1-58450-653-9.
- [29] Hoja de Datos. Kyocera Solar [en línea]. < <http://www.kyocerasolar.com.au/assets/001/5425.pdf> > [citado 9 de Febrero de 2014].
- [30] González M, Alzate A. Diseño estático de un convertidos DC/DC reductor-elevador bidireccional. Pereira, Enero – junio de 2010, 13h. Universidad Tecnológica de Pereira.
- [31] Fernández S, Jose M. Compendio de Energía Solar: Fotovoltaica, Térmica y Termoeléctrica (adaptado al código técnico de la edificación y al nuevo RITE). 1era Edición. Madrid, España. Mundi Prensa, amv ediciones, 2010. 539p. ISBN-13: 978-84-96709-51-5.
- [32] Escudero A. Sistemas de energía solar fotovoltaica para equipos de telecomunicaciones. Madrid, 20h. Universidad Politécnica de Madrid.

[33] SunFields Europe. Boletín Solar Fotovoltaica Autónoma: Manual para instalaciones fotovoltaicas autónomas. Editorial: C/Lope Gómez de Marzoa – FEUGA 12. Santiago de Compostela, A Coruña, España. 15 p.

[34] Labastida Alcalá, Miguel Alberto. Sistema Solar Autónomo basado en Convertidores Multicelda Apilables. Puebla, México, 2005. Maestría en Ciencias con Especialidad en Ingeniería Electrónica. Universidad de las Américas Puebla.

[35] Componentes de una Instalación Solar Fotovoltaica. Disponible en: <http://www.mcgraw-hill.es/bcv/guide/capitulo/8448171691.pdf>

[36] Castañer, Luis. Silvestre, Santiago. Modelling photovoltaic systems using PSpice. Universidad Politécnica de Cataluña (Barcelona, España) Wiley. Inglaterra. 2002.

[37] Campos D, Daniel U. Experimentos en teoría de control: Convertidores CD-CD. Universidad Autónoma San Juan Potosí. Facultad de Ciencias. 9 p. México.

[38] Yingli Solar (NYSE:YGE). Producto Paneles Policristalinos. Disponible en: <http://www.yinglisolar.com/>

[39] Sun Tech Panel policristalino de alta eficiencia. Disponible en: <http://www.technosun.com/>

[40] KYOCERA Fineceramics GmbH. Solar Division Disponible en: [www.kyocerasolar.de](http://www.kyocerasolar.de)

[41] Solar World. We turn sunlight into power. Disponible en: [www.solarworld.com](http://www.solarworld.com)

[42] Panasonic Group. SANYO Component Europe GmbH. Disponible en: [www.eu-solar.panasonic.net](http://www.eu-solar.panasonic.net)

- [43] Xantrex International. Disponible en: [www.xantrex.com](http://www.xantrex.com)
- [44] Morningstar corporation. Disponible en: [www.morningstarcorp.com](http://www.morningstarcorp.com)
- [45] Atersa grupo elecnor. Disponible en: [www.atersa.com](http://www.atersa.com)
- [46] OutBack Power Systems™. Disponible en: [www.outbackpower.com](http://www.outbackpower.com)
- [47] Mastervolt batteries. Disponible en: [www.mastervolt.com](http://www.mastervolt.com)
- [48] Effekta power supplies. Disponible en: [www.effekta.com.de](http://www.effekta.com.de)
- [49] Victron Energy. Blue Power. Disponible en: [www.victronenergy.com](http://www.victronenergy.com)
- [50] Tab Batteries. Disponible en: <http://www.renovables-andalucia.com/>
- [51] SMA Solar Technology. Sunny Island charger. Disponible en: <http://www.renovables-andalucia.com/>
- [52] SmarTecno. Soluciones Inteligentes. Disponible en: [www.smartecno.com](http://www.smartecno.com)
- [53] Brigitte Hauke. Basic calculation of a Boost Converter's Power Stage. Texas Instruments Incorporated. Application Report. SLVA372B - November 2010. Low Power DC/DC Application. Dallas, Texas.

## BIBLIOGRAFÍA

Alonso Abella, Miguel. Sistemas fotovoltaicos. Avenida Complutense, Madrid. 59h. Master en Energías Renovables y Mercadeo Energético. Centro de Investigaciones Energéticas, medioambientales y tecnológicas. Departamento de energías renovables.

Atersa grupo elecnor. Disponible en: [www.atersa.com](http://www.atersa.com)

Beltrán Adán, José. Prototipo fotovoltaico con seguimiento del Sol para procesos electroquímicos., Cuernavaca, Morelos, México. 2007. Tesis de Maestría en Ciencias, para optar al título de Maestro en Ciencias en Ingeniería Mecatrónica. Centro Nacional de Investigación y Desarrollo Tecnológico Coordinación de Mecatrónica.

Beshr, Mohamed H. Khater, Hany A. Abdelraouf, Amr A. Modelling of a Residential Solar Stand-Alone Power System. Proceedings of the 1<sup>st</sup> International Nuclear and Renewable Energy Conference (INREC10), Amman, Jordan, March 21-24, 2010.

Brigitte Hauke. Basic calculation of a Boost Converter's Power Stage. Texas Instruments Incorporated. Application Report. SLVA372B - November 2010. Low Power DC/DC Application. Dallas, Texas.

Campos D, Daniel U. Experimentos en teoría de control: Convertidores dc-dc. Universidad San Luis Potosí, México.2010. Facultad de ciencias.

Campos D, Daniel U. Experimentos en teoría de control: Convertidores CD-CD. Universidad Autónoma San Juan Potosí. Facultad de Ciencias. 9 p. México.

Castañer, Luis. Silvestre, Santiago. Modelling photovoltaic systems using PSpice. Universidad Politécnica de Cataluña (Barcelona, España) Wiley. Inglaterra. 2002.

CEIN S.A, Guiactiva Energía solar fotovoltaica. Navarra, 2005. Centro Europeo de Empresas e Innovación de Navarra. 31110 Noáin (Navarra).

Chavarria Roé, Javier. Diseño e Implementación de un Inversor Multinivel para Sistemas Fotovoltaicos Conectados a Red, España, Barcelona, 2010, 242 h. Tesis para optar al grado de Magister en Ingeniería Electrónica. Universitat Politècnica de Catalunya. Escola Técnica Superior d'Enginyeria de Telecomunicación de Barcelona.

Chavarría Roé, Javier. Diseño e implementación de un inversor multinivel para sistemas fotovoltaicos conectados a red. Barcelona, curso 2009 – 2010, 242h. Titulación Máster en Electrónica. Universitat Politècnica de Catalunya. Departamento de Ingeniería Electrónica.

Clúa García, J; De Battista, H; Mantz, R.J. Alternativa de control por modo deslizante para seguimiento robusto de la máxima potencia fotovoltaica. Vol 10. Argentina, 2006. ISSN 0329-5184.

Componentes de una Instalación Solar Fotovoltaica. Disponible en: <http://www.mcgraw-hill.es/bcv/guide/capitulo/8448171691.pdf>

Cortés Gonzales, Francisca. Estudio de factibilidad del uso de micro generación en base a energías renovables en redes de baja tensión. Chile, Santiago, 2008. Tesis para optar al título de Ingeniero Civil Electricista. Facultad de Ciencias Físicas y Matemáticas Departamento de ingeniería Eléctrica. Universidad de Chile.

Effekta power supplies. Disponible en: [www.effekta.com.de](http://www.effekta.com.de)

Escudero A. Sistemas de energía solar fotovoltaica para equipos de telecomunicaciones. Madrid, 20h. Universidad Politécnica de Madrid.

Fernández S, Jose M. Compendio de Energía Solar: Fotovoltaica, Térmica y Termoeléctrica (adaptado al código técnico de la edificación y al nuevo RITE). 1era Edición. Madrid, España. Mundi Prensa, amv ediciones, 2010. 539p. ISBN-13: 978-84-96709-51-5.

González M, Alzate A. Diseño estático de un convertidos DC/DC reductor-elevador bidireccional. Pereira, Enero – junio de 2010, 13h. Universidad Tecnológica de Pereira.

Guíactiva: Guíactiva Energía Solar. Centro Europeo de Empresas e Innovación de Navarra. Cein s.a. Gobierno de Navarra. Primera ed, Noviembre 2004.

Hart, W. Electrónica de potencia: Introducción a la electrónica de potencia. 1ra Edición. Valparaiso, Indiana. Prentice Hall, Pearson Education, 2001. 456p. ISBN: 84-205-3179-0.

Hoja de Datos. Kyocera Solar [en línea]. < <http://www.kyocerasolar.com.au/assets/001/5425.pdf> > [citado 9 de Febrero de 2014].

Horacio Vera, Luis; Krenzinger, Amo. Desempeño en simulación de sistemas fotovoltaicos. Vol 8. N°1. Argentina, 2004. ISSN: 0329-5184.

Horikoshi, Hiyo. Análisis de las componentes armónicas de los inversores fotovoltaicos de conexión a red. Leganés, septiembre 2009, 136h. Trabajo de Grado (Ingeniería técnica Industrial). Universidad Carlos III de Madrid. Escuela politécnica superior. Departamento de tecnología electrónica.

Instituto Colombiano de Normas Técnicas y Certificación. Norma Técnica Colombiana: Código Eléctrico Colombiano. Bogotá: ICONTEC. 1998. NTC 2050.

Joachín Barrios, Carmen. Diseño de un sistema solar fotovoltaico aislado, para el suministro de energía eléctrica a la comunidad rural buena vista, san marcos. Guatemala, Junio de 2008, 284h. Trabajo de Grado (Ingeniero Químico). Universidad de san Carlos de Guatemala. Facultad de Ingeniería.

KYOCERA Fineceramics GmbH. Solar Division Disponible en: [www.kyocerasolar.de](http://www.kyocerasolar.de)

Labastida Alcalá, Miguel Alberto. Sistema Solar Autónomo basado en Convertidores Multicelda Apilables. Puebla, México, 2005. Maestría en Ciencias con Especialidad en Ingeniería Electrónica. Universidad de las Américas Puebla.

Lizarazú Basto, Yuri Bibiana; Torres Salazar, Leydi Andrea. Diseño De Un Sistema de Generación Eléctrica Fotovoltaica y de una Red Eléctrica en Corriente Continua de Baja Tensión para el posible nuevo edificio Eléctrica II de la Universidad Industrial de Santander, Colombia, Bucaramanga, 2010, 297 h. Tesis para obtener el título de Ingeniero Electricista, Escuela de Ingenierías Eléctrica, Electrónica y de Telecomunicaciones. Universidad Industrial de Santander.

Martínez Ortiz, William; Santamaría Forero Nelson Reinaldo. Diseño de una herramienta computacional en Matlab para el análisis energético de sistemas fotovoltaicos, Colombia, Bucaramanga, 2012, 187 h. Trabajo de grado para obtener el título de Ingeniero Electricista, Escuela de Ingenierías Eléctrica, Electrónica y de Telecomunicaciones. Universidad Industrial de Santander.

Mastervolt batteries. Disponible en: [www.mastervolt.com](http://www.mastervolt.com)

Méndez Muñiz, Javier; Cuervo García, Rafael. Energía Solar Fotovoltaica. 2da Edición. ECA, Instituto de Tecnología y Formación S.A.U. España: FC editorial, 2007. 245p. ISBN-13: 978-84-96743-29-8

Morningstar corporation. Disponible en: [www.morningstarcorp.com](http://www.morningstarcorp.com)

Nasre Nasser, Marvven. Modelado y simulación de sistemas fotovoltaicos para entidades fijas, aisladas y de uso residencial. Mérida, Venezuela, 2006. Tesis de Posgrado, Universidad de Los Andes. Centro de simulación y modelado (CESIMO), Facultad de Ingeniería.

Nasre Nasser, Marvven. Modelado y simulación de sistemas fotovoltaicos para entidades fijas, aisladas y de uso residencial. Mérida, Venezuela. Julio 2006, 10h. Propuesta de tesis, Postgrado de Modelado y simulación de sistemas. Universidad de los Andes. Centro de simulación y modelado (CESIMO). Facultad de Ingeniería.

Negroni Vera, Juan José. Análisis y diseño de controladores para inversores multinivel en sistemas fotovoltaicos conectados a red. Barcelona, 2007. Tesis Doctoral en Ingeniería Electrónica.

OutBack Power Systems™. Disponible en: [www.outbackpower.com](http://www.outbackpower.com)

Panasonic Group. SANYO Component Europe GmbH. Disponible en: [www.eu-solar.panasonic.net](http://www.eu-solar.panasonic.net)

Pareja Aparicio, Miguel. Energía Solar Fotovoltaica: Cálculo de una instalación aislada. 2da Edición. Barcelona: Marcombo Editorial, 2010. 197p. ISBN: 978-84-267-1596-8.

Rashid, Muhammad H. Electrónica de potencia: Circuitos, dispositivos y aplicaciones. 2da Edición. West Lafayette, Indiana. Prentice Hall, Pearson Education, 1999. 720p. ISBN: 968-880-586-6.

Rey López, Juan Manuel; Vergara Barrios, Pedro Pablo. Diseño de una microrred de baja tensión para el laboratorio de integración energética del parque tecnológico de guatiguara, Colombia, Bucaramanga, 2012, 163 h. Trabajo de grado para optar por el título de Ingeniero Electricista e Ingeniero Electrónico, respectivamente. Escuela de Ingenierías Eléctrica, Electrónica y de Telecomunicaciones. Universidad Industrial de Santander.

Sánchez López, Juan de Dios. Dispositivos Electrónicos de Potencia. México, Baja California, 2002. Editorial Tomás di Belia. ISBN 970-9051-71-7. Universidad Autónoma de Baja California.

Shaffer, Randall. Fundamentals of Power Electronics with Matlab. 1ra Edición. Boston, Massachusetts. Thomson Learning Inc, Charles River Media, 2007. 401p. ISBN: 1-58450-852-3. eISBN: 1-58450-653-9.

SMA Solar Technology. Sunny Island charger. Disponible en: <http://www.renovables-andalucia.com/>

SmarTecno. Soluciones Inteligentes. Disponible en: [www.smartecno.com](http://www.smartecno.com)

Solar World. We turn sunlight into power. Disponible en: [www.solarworld.com](http://www.solarworld.com)

Sun Tech Panel policristalino de alta eficiencia. Disponible en: <http://www.technosun.com/>

SunFields Europe. Boletín Solar Fotovoltaica Autónoma: Manual para instalaciones fotovoltaicas autónomas. Editorial: C/Lope Gómez de Marzoa – FEUGA 12. Santiago de Compostela, A Coruña, España. 15 p.

Tab Batteries. Disponible en: <http://www.renovables-andalucia.com/>

Valencia Quintero, James Paul. Generación distribuida: Democratización de la energía Eléctrica. Colombia, Bogotá, 2008, Pp. 105-112. Universidad Nacional de Colombia. ISSN 1900-0642.

Vega Rodríguez, Juan. Convertidor integrado para sistemas fotovoltaicos conectados a red eléctrica. México, Morelos, Cuernavaca. 7 de agosto de 2009, 112h. Tesis de Maestría en ciencias en ingeniería electrónica. Centro Nacional de Investigación y desarrollo tecnológico. Departamento de ingeniería electrónica.

Victron Energy. Blue Power. Disponible en: [www.victronenergy.com](http://www.victronenergy.com)

Xantrex International. Disponible en: [www.xantrex.com](http://www.xantrex.com)

Yingli Solar (NYSE:YGE). Producto Paneles Policristalinos. Disponible en: <http://www.yinglisolar.com/>