



EDUCACIÓN

SECRETARÍA DE EDUCACIÓN PÚBLICA



TECNOLÓGICO
NACIONAL DE MÉXICO

Tecnológico Nacional de México

Centro Nacional de Investigación
y Desarrollo Tecnológico

Tesis de Maestría

Diseño de un Sistema Fotovoltaico Aislado de la Red
Eléctrica Orientado al Sector Doméstico

presentada por

Ing. Miguel Angel Escalante Carbajal

como requisito para la obtención del grado de
**Maestro en Ciencias en Ingeniería
Electrónica**

Director de tesis

Dr. Mario Ponce Silva

Codirector de tesis

Dr. Gabriel Calzada Lara

Cuernavaca, Morelos, México. Junio de 2020.



"2019, Año del Caudillo del Sur, Emiliano Zapata"

Cuernavaca, Mor.
No. de Oficio:
Asunto:

10/diciembre/2019

DIE/252/2019

Aceptación de documentos de tesis

DR. GERARDO VICENTE GUERRERO RAMÍREZ
SUBDIRECTOR ACADÉMICO
PRESENTE

Por este conducto, los integrantes de Comité Tutorial del **Ing. Miguel Angel Escalante Carbajal**, con número de control **M16CE097** de la Maestría en Ciencias en Ingeniería Electrónica, le informamos que hemos revisado el trabajo de tesis profesional titulado **"Diseño de un sistema fotovoltaico aislado de la red eléctrica orientado al sector doméstico"** y hemos encontrado que se han realizado todas las correcciones y observaciones que se le indicaron, por lo que hemos acordado aceptar el documento de tesis y le solicitamos la autorización de impresión definitiva.

DIRECTOR DE TESTS

Dr. Mario Ponce Silva
Doctor en Ciencias en Ingeniería
Electrónica
Cédula profesional 3516427

CODIRECTOR DE TESTS

Dr. Gabriel Calzada Lara
Doctor en Ingeniería Eléctrica
Cédula profesional 7599980

REVISOR-1

Dr. Jesús Darío Mina Antonio
Doctor en Ingeniería
Cédula profesional 6094069

REVISOR 2

Dr. Jaime Eugenio Arau Roffiel
Doctor en Ciencias en Ingeniería
Electrónica Cédula profesional 9884229

C.p. M.E. Guadalupe Garrido Rivera- Jefa del Departamento de Servicios Escolares

Estudiante
Expediente
MPS/lrr.



"2020, Año de Leona Vicario, Benemérita Madre de la Patria"

Cuernavaca, Morelos **02/junio/2020**

OFICIO No. SAC/ 163/2020

Asunto: Autorización de impresión de tesis

MIGUEL ANGEL ESCALANTE CARBAJAL
CANDIDATO AL GRADO DE MAESTRO EN CIENCIAS
EN INGENIERÍA ELECTRÓNICA
P R E S E N T E

Por este conducto tengo el agrado de comunicarle que el Comité Tutorial asignado a su trabajo de tesis titulado "Diseño de un sistema fotovoltaico aislado de la red eléctrica orientado al sector doméstico", ha informado a esta Subdirección Académica, que están de acuerdo con el trabajo presentado. Por lo anterior, se le autoriza a que proceda con la impresión definitiva de su trabajo de tesis.

Esperando que el logro del mismo sea acorde con sus aspiraciones profesionales, reciba un cordial saludo.

A T E N T A M E N T E

Excelencia en Educación Tecnológica®

"Conocimiento y tecnología al servicio de México"

DR. GERARDO VICENTE GUERRERO RAMÍREZ
SUBDIRECTOR ACADÉMICO


**CENTRO NACIONAL
DE INVESTIGACIÓN
Y DESARROLLO
TECNOLÓGICO
SUBDIRECCIÓN
ACADÉMICA**

C.c.p. M.E. Guadalupe Garrido Rivera. Jefa del Departamento de Servicios Escolares

Expediente

CVGR/CHG

Agradecimientos

A la vida misma por permitirme llegar a este momento.

A mis padres Miguel Angel y Leticia quienes me han apoyado y motivado siempre.

A mi hermana Sofía quien ha estado presente desde el principio.

A mi bella compañera Mara quien se ha mantenido junto a mí todo este tiempo.

A mi director de tesis, el Dr. Gabriel Calzada por darme la oportunidad de ser su tesista.

A mi codirector de tesis, el Dr. Mario Ponce quien ha aportado buenas ideas al proyecto.

A mis revisores, el Dr. Jaime Arau y el Dr. Jesús Mina quienes han mantenido un buen seguimiento del proyecto.

A mis camaradas, Carlos Castellón y Dante Miraglia de quienes he aprendido mucho.

A mis compañeros de aula, Alan, Eliud, Mauricio, Merlin, Susana, Yesenia y Yuliet.

A la Lic. Lorena Ruiz quien me ha brindado apoyo durante toda mi estancia.

Al departamento de servicios escolares por su invaluable asistencia.

Al Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología (CONACYT) por el apoyo económico otorgado.

Al Tecnológico Nacional de México (TecNM) por brindarme la oportunidad de cursar un posgrado en sus instalaciones.

Índice

| | |
|--|----|
| Índice de figuras | 4 |
| Índice de tablas | 8 |
| Acrónimos | 9 |
| Resumen | 10 |
| Abstract..... | 11 |
| Capítulo 1 – Introducción | 12 |
| 1.1 Planteamiento del problema..... | 13 |
| 1.2 Objetivos | 13 |
| 1.2.1 Objetivo general | 13 |
| 1.2.2 Objetivos específicos..... | 13 |
| 1.2.3 Alcances | 13 |
| 1.3 Organización de la tesis | 14 |
| 1.4 Propuesta de solución | 14 |
| Capítulo 2 – Marco Teórico | 16 |
| 2.1 Sistemas fotovoltaicos | 17 |
| 2.1.1 Tipos de sistemas fotovoltaicos..... | 18 |
| 2.1.2 Topologías comúnmente empleadas | 18 |
| 2.2 Irradiancia solar | 21 |
| 2.2.1 Irradiancia en el mundo..... | 21 |
| 2.2.2 Irradiancia en México..... | 21 |
| 2.3 Paneles fotovoltaicos | 23 |
| 2.3.1 Composición y construcción | 23 |
| 2.3.2 Modelo matemático de un panel fotovoltaico | 24 |
| 2.4 Baterías recargables | 25 |
| 2.4.1 Tipos de baterías..... | 25 |
| 2.4.2 Modelo eléctrico de una batería | 27 |
| 2.5 Convertidores de potencia..... | 28 |
| 2.5.1 Convertidores comúnmente empleados en aplicaciones fotovoltaicas | 28 |

| | |
|---|----|
| Capítulo 3 – Diseño y simulación del sistema fotovoltaico propuesto | 31 |
| 3.1 Etapa 1 | 34 |
| 3.1.1 Selección del panel fotovoltaico | 34 |
| 3.1.1.1 Características del panel fotovoltaico | 34 |
| 3.1.1.2 Simulación del modelo de panel fotovoltaico seleccionado | 35 |
| 3.1.2 Selección del convertidor encargado de regular la tensión | 37 |
| 3.1.3 Convertidor de potencia tipo <i>boost</i> | 37 |
| 3.1.3.1 Estructura general..... | 37 |
| 3.1.3.2 Especificaciones de diseño del convertidor <i>boost</i> #1 | 39 |
| 3.1.3.3 Modelado eléctrico del convertidor <i>boost</i> | 39 |
| 3.1.3.4 Lazo de control PID | 40 |
| 3.1.4 Simulación en <i>Simetrix</i> | 43 |
| 3.1.5 Simulación en <i>Simulink</i> | 44 |
| 3.2 Etapa 2 | 47 |
| 3.2.1 Requerimientos eléctricos de la casa habitación | 47 |
| 3.2.2 Banco de baterías | 49 |
| 3.2.2.1 Dimensionamiento | 49 |
| 3.2.2.2 Recarga controlada..... | 49 |
| 3.2.2.3 Perfiles de descarga..... | 50 |
| 3.2.3 Niveles de irradiancia en la localidad seleccionada..... | 52 |
| 3.2.4 Simulación en <i>Simulink</i> | 54 |
| 3.3 Etapa 3 | 58 |
| 3.3.1 Simulación en <i>Simulink</i> | 59 |
| 3.4 Etapa 4 | 63 |
| 3.4.1 Especificaciones de diseño del convertidor <i>boost</i> #2..... | 63 |
| 3.4.2 Lazo de control PI | 64 |
| 3.4.3 Simulación en <i>Simetrix</i> | 64 |
| 3.4.4 Simulación en <i>Simulink</i> | 65 |
| 3.5 Etapa 5 | 68 |
| 3.5.1 Inversor monofásico a implementar..... | 69 |
| 3.5.2 Simulación en <i>Simulink</i> | 70 |
| 3.5.3 Diseño de filtro LC..... | 73 |

| | | |
|-------------|---|----|
| 3.6 | Etapa 6 | 77 |
| 3.6.1 | Especificaciones de diseño del convertidor <i>boost</i> #3..... | 77 |
| 3.6.2 | Lazo de control PI | 78 |
| 3.6.3 | Simulación en <i>Simetrix</i> | 78 |
| 3.6.4 | Simulación en <i>Simulink</i> | 79 |
| 3.7 | Etapa 7 | 82 |
| 3.7.1 | Simulación en <i>Simulink</i> | 83 |
| Capítulo 4 | – Conclusiones | 87 |
| 4.1 | Resultados obtenidos | 88 |
| 4.2 | Discusión de resultados | 92 |
| 4.3 | Trabajos futuros | 94 |
| Referencias | | 95 |
| Anexo 1 | | 98 |

Índice de figuras

| | |
|---|----|
| Figura 1. Esquema simplificado propuesto del sistema fotovoltaico aislado..... | 15 |
| Figura 2. Tipos de sistemas fotovoltaicos. | 18 |
| Figura 3. Configuración central, en cadena y multi cadena [2]..... | 20 |
| Figura 4. Configuración modular y modular CA [2]..... | 20 |
| Figura 5. Niveles de irradiancia solar en el mundo [3]. | 21 |
| Figura 6. Diagrama de funcionamiento de una celda fotovoltaica. | 23 |
| Figura 7. Modelo eléctrico de un panel fotovoltaico..... | 24 |
| Figura 8. Batería cargada (izquierda) y batería descargada (derecha). | 27 |
| Figura 9. Modelo eléctrico Thevenin. | 27 |
| Figura 10. Convertidor bidireccional doble puente activo [12]..... | 29 |
| Figura 11. Sistema fotovoltaico con cargador/descargador de batería [12]. | 29 |
| Figura 12. Convertidor compuesto CD-CD [13]..... | 30 |
| Figura 13. Convertidor puente completo CD-CD [14]..... | 30 |
| Figura 14. Diagrama de la etapa 1..... | 34 |
| Figura 15. Comportamiento del panel fotovoltaico (otorgado por el fabricante)..... | 36 |
| Figura 16. Comportamiento en simulación del panel fotovoltaico. | 36 |
| Figura 17. Comportamiento de una cadena fotovoltaica frente a variaciones de temperatura. | 37 |
| Figura 18. Convertidor boost..... | 38 |
| Figura 19. Convertidor boost en modo ON. | 38 |
| Figura 20. Convertidor <i>boost</i> en modo <i>OFF</i> | 38 |
| Figura 21. Convertidor boost con efectos resistivos (R_L y R_C). | 40 |
| Figura 22. Lazo de control PI. | 42 |
| Figura 23. Circuito eléctrico del convertidor boost #1..... | 43 |
| Figura 24. Formas de onda de la tensión de salida (V_o : 54.24 V) junto con la corriente de salida (I_o : 4.75 A). | 43 |
| Figura 25. Circuito eléctrico de la etapa 1..... | 44 |

| | |
|---|----|
| Figura 26. Variaciones de tensión en el panel fotovoltaico..... | 44 |
| Figura 27. Tensión entregada por el convertidor boost #1. | 45 |
| Figura 28. Forma de onda de la tensión entregada por el convertidor boost #1..... | 45 |
| Figura 29. Forma de onda del PWM utilizado en el convertidor boost #1 (F = 25 kHz)..... | 45 |
| Figura 30. Señal de error que recibe el control PI. | 46 |
| Figura 31. Ciclo de trabajo generado por el control PI. | 46 |
| Figura 32. Diagrama de la etapa 2..... | 47 |
| Figura 33. Diagrama eléctrico en conjunto con el circuito integrado LTC4020..... | 50 |
| Figura 34. Comportamiento teórico y en simulación de la batería seleccionada. | 51 |
| Figura 35. Niveles promedio anuales de la irradiancia máxima y mínima. | 53 |
| Figura 36. Circuito eléctrico de la etapa 2..... | 54 |
| Figura 37. Irradiancia promedio mínima anual. | 54 |
| Figura 38. Nivel de carga del banco de baterías..... | 55 |
| Figura 39. Corriente de carga del banco de baterías..... | 55 |
| Figura 40. Irradiancia promedio máxima anual..... | 56 |
| Figura 41. Nivel de carga del banco de baterías..... | 56 |
| Figura 42. Corriente de carga del banco de baterías..... | 56 |
| Figura 43. Diagrama de la etapa 3..... | 58 |
| Figura 44. Circuito eléctrico de la etapa 3..... | 59 |
| Figura 45. Irradiancia promedio mínima anual. | 60 |
| Figura 46. Nivel de carga del banco de baterías..... | 60 |
| Figura 47. Corriente de carga del banco de baterías..... | 61 |
| Figura 48. Irradiancia promedio máxima anual..... | 61 |
| Figura 49. Nivel de carga del banco de baterías..... | 62 |
| Figura 50. Corriente de carga del banco de baterías..... | 62 |
| Figura 51. Diagrama de la etapa 4..... | 63 |
| Figura 52. Circuito eléctrico del convertidor boost #2..... | 64 |
| Figura 53. Formas de onda de la tensión de salida (V_o : 180.08 V) junto con la corriente de salida (I_o : 4.50 A)..... | 64 |
| Figura 54. Circuito eléctrico de la etapa 4..... | 65 |
| Figura 55. Variaciones de tensión en la cadena fotovoltaica. | 65 |

| | |
|--|----|
| Figura 56. Tensión entregada por el convertidor boost #2. | 66 |
| Figura 57. Forma de onda de la tensión entregada por el convertidor boost #2..... | 66 |
| Figura 58. Forma de onda del PWM utilizado en el convertidor boost #2 (F = 25 kHz)..... | 66 |
| Figura 59. Señal de error que recibe el control PI. | 67 |
| Figura 60. Ciclo de trabajo generado por el control PI. | 67 |
| Figura 61. Diagrama de la etapa 5. | 68 |
| Figura 62. Inversor monofásico puente completo convencional. | 69 |
| Figura 63. Circuito eléctrico de la etapa 5. | 70 |
| Figura 64. Señal portadora (F = 4,200 Hz)..... | 71 |
| Figura 65. Señal moduladora (F = 60 Hz)..... | 71 |
| Figura 66. Señal de tensión eléctrica entregada por el inversor monofásico. | 72 |
| Figura 67. Forma de onda de la señal de tensión eléctrica entregada por el inversor monofásico. | 72 |
| Figura 68. Señal de corriente eléctrica entregada por el inversor monofásico..... | 72 |
| Figura 69. Forma de onda de la señal de corriente eléctrica entregada por el inversor monofásico. | 73 |
| Figura 70. Diagrama eléctrico del filtro LC. | 73 |
| Figura 71. Gráficos de bode y de fase del filtro LC diseñado. | 75 |
| Figura 72. Forma de onda de la señal de tensión eléctrica filtrada entregada por el inversor monofásico. | 76 |
| Figura 73. Forma de onda de la señal de corriente eléctrica filtrada entregada por el inversor monofásico. | 76 |
| Figura 74. Diagrama de la etapa 6. | 77 |
| Figura 75. Circuito eléctrico del convertidor boost #3. | 78 |
| Figura 76. Formas de onda de la tensión de salida (V_o : 176.06 V) junto con la corriente de salida (I_o : 11.81 A)..... | 78 |
| Figura 77. Circuito eléctrico de la etapa 6. | 79 |
| Figura 78. Señal de tensión eléctrica entregada por el inversor monofásico. | 80 |
| Figura 79. Forma de onda de la señal filtrada de tensión eléctrica entregada por el inversor monofásico. | 80 |
| Figura 80. Señal de corriente eléctrica entregada por el inversor monofásico. | 81 |

| | |
|--|----|
| Figura 81. Forma de onda de la señal filtrada de corriente eléctrica entregada por el inversor monofásico. | 81 |
| Figura 82. Secuencia automatizada de funcionamiento del sistema fotovoltaico aislado.... | 82 |
| Figura 83. Circuito eléctrico del sistema fotovoltaico aislado. | 83 |
| Figura 84. Control maestro del sistema fotovoltaico aislado. | 84 |
| Figura 85. Señal de tensión eléctrica entregada a la casa habitación por el inversor monofásico (0-10 s: opera banco de baterías, 10-35 s: operan paneles fotovoltaicos y 35-45 s: opera banco de baterías)..... | 85 |
| Figura 86. Señal de corriente eléctrica entregada a la casa habitación por el inversor monofásico (0-10 s: opera banco de baterías, 10-35 s: operan paneles fotovoltaicos y 35-45 s: opera banco de baterías)..... | 85 |
| Figura 87. Variación del estado de carga del banco de baterías (0-10 s: en uso, 10-35 s: recargándose y 35-45 s: en uso). | 86 |

Índice de tablas

| | |
|--|----|
| Tabla 1. Comparación entre arquitecturas de sistemas fotovoltaicos..... | 19 |
| Tabla 2. Potencial solar fotovoltaico..... | 22 |
| Tabla 3. Variables de la ecuación de comportamiento de un panel fotovoltaico. | 24 |
| Tabla 4. Características físicas del panel fotovoltaico. | 34 |
| Tabla 5. Características eléctricas del panel fotovoltaico..... | 35 |
| Tabla 6. Consumo eléctrico diurno de la casa habitación. | 48 |
| Tabla 7. Consumo eléctrico de herramientas de trabajo..... | 48 |
| Tabla 8. Consumo eléctrico nocturno de la casa habitación..... | 48 |
| Tabla 9. Promediado mensual de la irradiancia solar incidente en CENIDET. | 52 |
| Tabla 10. Promediado mensual de horas de luz solar por día. | 53 |

Acrónimos

| | |
|---------|--|
| Ah | Amperios hora. |
| AWG | Calibre de alambre americano (en inglés). |
| CA | Corriente alterna. |
| CD | Corriente directa. |
| CENIDET | Centro Nacional de Investigación y Desarrollo Tecnológico. |
| CFE | Comisión Federal de Electricidad. |
| DOD | Profundidad de descarga (en inglés). |
| GMT | Hora del Meridiano de Greenwich (en inglés). |
| Io | Corriente de salida. |
| MOSFET | Transistor de efecto de campo metal-óxido-semiconductor (en inglés). |
| MPPT | Seguidor de punto de máxima potencia (en inglés). |
| msnm | Metros sobre el nivel del mar. |
| Mt | Megatón. |
| NASA | Administración Nacional de la Aeronáutica y del Espacio (en inglés). |
| PID | Proporcional, integral y derivativo (teoría de control). |
| PWM | Modulación de ancho de pulso (en inglés). |
| RMS | Valor eficaz (en inglés). |
| SENER | Secretaría de Energía. |
| SFV | Sistema fotovoltaico. |
| SOC | Estado de carga (en inglés). |
| Vo | Tensión de salida. |
| Wh | Watts hora. |

Resumen

En este documento se presenta la investigación, desarrollo y diseño de un sistema fotovoltaico aislado de la red eléctrica con una etapa de respaldo energético mediante baterías. El diseño de este sistema está enfocado hacia el área doméstica.

Inicialmente se establece una localidad específica en la cual será instalado dicho sistema y se investigan las características de dicho lugar, tales como: promedios anuales de irradiancia solar, altitud, horas de luz solar durante el día, coordenadas geográficas, entre otros.

Posteriormente se establecen las condiciones específicas de funcionamiento del sistema y se detallan aspectos como: cantidad de aparatos eléctricos que tendrá la casa habitación, consumo eléctrico y tiempo de uso de cada uno de ellos, así como los días de autonomía energética que puede satisfacer el sistema sin necesidad de ser recargado.

Tomando como base los lineamientos y condiciones anteriores, se propone una topología específica de diseño para el sistema fotovoltaico aislado. Esta topología contempla la inclusión de cuatro paneles fotovoltaicos para la recarga del banco de baterías y seis paneles más para la alimentación diurna de la casa habitación. Conjuntamente se diseñan los convertidores de potencia y sistemas de control encargados de regular y mantener constantes los requerimientos eléctricos del sistema.

Finalmente se realiza una comparación entre varias conexiones posibles de paneles fotovoltaicos para recargar el banco de baterías y se observan los niveles de carga que puede alcanzar el mismo con cada una de ellas.

Como resultado obtenido se cuenta con un diseño específico funcional de un sistema fotovoltaico aislado que cumple con todos los requerimientos establecidos en el escenario propuesto para este caso de estudio.

Abstract

This document presents the research, development and design of a photovoltaic system isolated from the electricity grid with power backup stage through batteries. The design of this system is focused on the domestic area.

Initially, a specific locality is established in which said system will be installed and the characteristics of said place are investigated, such as: annual averages of solar irradiance, altitude, hours of sunlight during the day, geographic coordinates, among others.

Subsequently, the specific conditions of operation of the system are established and detailed aspects such as: number of electrical appliances that the house will have, electrical consumption and time of use of each of them, as well as the days of energy autonomy that the system can satisfy without needing to be recharged.

Based on the above guidelines and conditions, a specific design topology is proposed for the isolated photovoltaic system. This topology contemplates the inclusion of four photovoltaic panels for recharging the battery bank and six more panels for daytime power supply in the house. Jointly, power converters and control systems are designed to regulate and maintain constant the electrical requirements of the system.

Lastly, a comparison is made between several possible connections of photovoltaic panels to recharge the battery bank and the levels of charge that it can reach with each one are observed.

As a result, there is a specific functional design of an isolated photovoltaic system that meets all the established requirements in the proposed scenario for this case study.

Capítulo 1

Introducción

En este capítulo se describe el planteamiento del problema a solucionar, los objetivos y alcances, la organización del contenido de este documento y finalmente la propuesta de solución.

Este primer capítulo tiene como objetivo introducir al lector en la temática de desarrollo de este proyecto y se busca la comprensión e identificación de los objetivos y alcances del mismo.

1.1 Planteamiento del problema

El fundamento de desarrollo de este proyecto surge de la necesidad por desarrollar un trabajo de investigación en el cual se plasmen, desarrollen y diseñen todos los elementos y componentes electrónicos relacionados a un sistema fotovoltaico aislado.

Como se puede observar en el capítulo final de este documento, es imprescindible, además, tomar en consideración escenarios y condiciones de operación reales para que los diseños y propuestas de solución sean viables para implementar en la vida cotidiana.

1.2 Objetivos

1.2.1 Objetivo general

Diseñar y simular un sistema fotovoltaico aislado de la red eléctrica orientado al sector doméstico.

1.2.2 Objetivos específicos

- Obtención del modelo de un arreglo de paneles fotovoltaicos.
- Contar con un modelo de carga-descarga del banco de baterías que contemple una carga lenta.
- Obtención de un modelo de un convertidor elevador CD-CD y diseño de su esquema de control para garantizar la regulación de tensión en la carga.
- Validar el adecuado diseño de un control maestro para la administración del sistema.

1.2.3 Alcances

Se propone diseñar y simular cada elemento que conforma al sistema y concluir con una simulación de todo el sistema fotovoltaico aislado. Con esto se valida el buen funcionamiento de cada uno de los componentes, secciones e interconexiones realizadas, así como los sistemas de control de los respectivos convertidores CD-CD y de todo el sistema (control maestro).

1.3 Organización de la tesis

La estructura y contenido de cada capítulo es el siguiente:

Capítulo 2: se realiza una búsqueda de los elementos básicos que conforman a los sistemas fotovoltaicos (topologías y convertidores de potencia). Se analizan también modelos y conceptos teóricos sobre baterías recargables, paneles fotovoltaicos e inversores. Finalmente se investigan los niveles de irradiancia para la ubicación de diseño seleccionada.

Capítulo 3: se realiza el dimensionamiento, diseño y simulación de cada una de las etapas del sistema fotovoltaico aislado basándose en la información recabada en el capítulo anterior. Se toman en cuenta factores como los niveles de irradiancia solar, el consumo eléctrico estimado de la casa habitación, el tiempo de autonomía por las noches, etc.

Capítulo 4: se discuten los resultados obtenidos y se plantean los posibles trabajos futuros.

1.4 Propuesta de solución

Para la propuesta de diseño del sistema fotovoltaico aislado se toman en cuenta factores como la localidad seleccionada para la instalación teórica de dicho sistema, la demanda energética que debe satisfacer y el respaldo energético con el que debe contar. Estos aspectos se describen en los apartados 3.2.1, 3.2.2 y 3.2.3 del capítulo 3.

Aunado a lo anterior, se toman en cuenta algunas de las topologías más comúnmente empleadas en sistemas fotovoltaicos y a partir de estas y de los requerimientos específicos antes mencionados se diseña el sistema fotovoltaico aislado que se muestra en la figura 1.

El diseño propuesto del sistema fotovoltaico aislado que se muestra en la figura 1 está comprendido por los siguientes elementos:

- Cuatro ramas idénticas comprendidas por un panel fotovoltaico y un convertidor *boost* (modelo 1) cada una. Todas conectadas en paralelo a un bus común de CD.
- Un banco de baterías (comprendido por 4 baterías de plomo – ácido).
- Un convertidor *boost* (modelo 3) encargado de acondicionar la energía proveniente del banco de baterías.
- Dos ramas idénticas comprendidas por tres paneles fotovoltaicos y un convertidor *boost* (modelo 2) cada una. Ambas conectadas en paralelo a un bus común de CD.
- Un inversor monofásico encargado de acondicionar la energía proveniente del convertidor *boost* (modelo 3) o de los convertidores *boost* (modelo 2).
- Un conjunto de capacitores (denominados “C” en la figura 1) ubicados en cada uno de los buses de CD. Su finalidad es ayudar a mantener una tensión constante en dichos buses.

El diseño propuesto se pretende validar mediante *MATLAB - Simulink* (versión R2018a).

También se utiliza el simulador *Simetrix - SIMPLIS* (versión 8.20) como segunda herramienta de validación del funcionamiento de los convertidores de potencia CD-CD.

En estas simulaciones se trabaja por etapas y se concluye con pruebas a todo el sistema fotovoltaico en conjunto (esto se detalla al principio del capítulo 3).

Las simulaciones se realizan de esta manera para asegurar el óptimo acoplamiento entre las diferentes secciones y la estabilidad global del sistema fotovoltaico.

La simulación final que engloba a todo el sistema fotovoltaico pretende validar lo siguiente:

- 1) El sistema de control maestro que proporciona la capacidad de operación automatizada del sistema fotovoltaico (activación y desactivación del banco de baterías y los paneles fotovoltaicos según el nivel de irradiancia).
- 2) El suministro óptimo de energía eléctrica a la casa habitación (formas de onda de la señal de corriente y tensión eléctrica recibidas).

En el capítulo 3 se describe a detalle todo el proceso de diseño realizado.

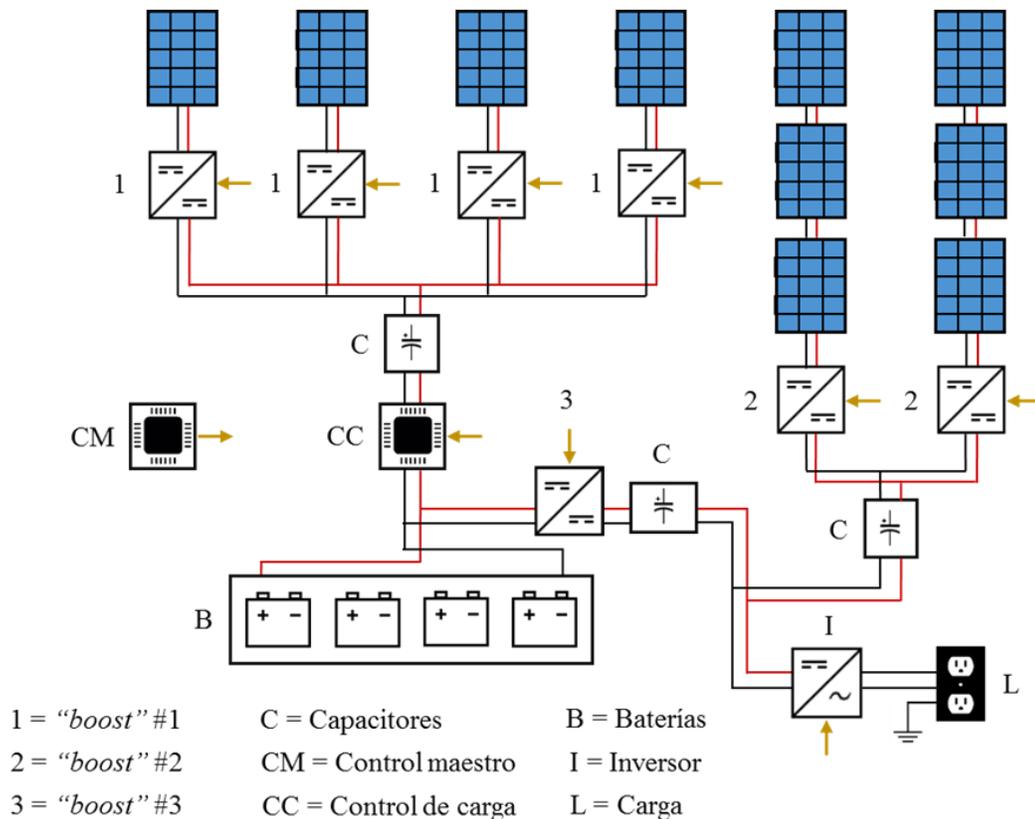


Figura 1. Esquema simplificado propuesto del sistema fotovoltaico aislado.

Capítulo 2

Marco Teórico

En este capítulo se abordan varios conceptos fundamentales referentes a los sistemas fotovoltaicos, así como los elementos y dispositivos electrónicos más comúnmente empleados en dichos sistemas.

2.1 Sistemas fotovoltaicos

La energía solar fotovoltaica es una fuente de energía que produce electricidad de origen renovable, obtenida directamente a partir de la radiación solar mediante un dispositivo semiconductor conocido como celda fotovoltaica.

Este tipo de energía se usa principalmente para producir electricidad a gran escala a través de redes de distribución, aunque también permite alimentar otro tipo de aplicaciones y sistemas autónomos, tales como refugios de montaña o viviendas aisladas de la red eléctrica.

La energía solar fotovoltaica no emite ningún tipo de contaminación durante su funcionamiento con lo que se contribuye a evitar la emisión de gases de efecto invernadero. Sin embargo, su principal desventaja consiste en que su producción depende de la radiación solar.

A continuación, se muestran algunas de las aplicaciones más destacadas de la energía solar fotovoltaica:

- Telecomunicaciones.
- Señalización.
- Dispositivos aislados.
- Electrificación rural.
- Sistemas de bombeo de agua.
- Sistemas híbridos solar-diésel.
- Transportes terrestres y aéreos.
- Transporte y navegación marítima.
- Fotovoltaica integrada en edificios.
- Fotovoltaica de conexión a la red.

Ahora, en la siguiente lista se muestran los componentes típicos de una instalación solar fotovoltaica:

- Paneles solares fotovoltaicos.
- Convertidores de potencia (CD-CD).
- Inversores (CD-CA).
- Seguidores solares (opcionales).
- Cableado.
- Baterías (opcionales).

2.1.1 Tipos de sistemas fotovoltaicos

Un sistema fotovoltaico puede variar en tipo, capacidad o especificaciones dependiendo de las necesidades humanas. Así, los tipos de sistemas fotovoltaicos se dividen en dos principales: los autónomos o aislados y los interconectados a la red eléctrica. Posteriormente se subdividen en dos variantes cada uno, ver figura 2 [1].

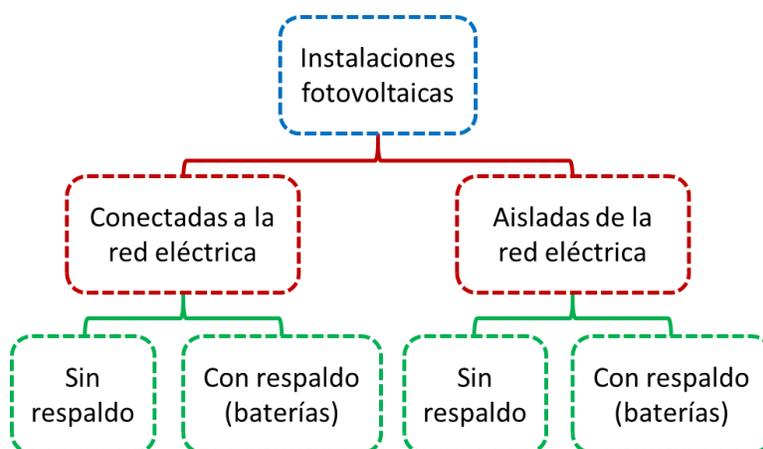


Figura 2. Tipos de sistemas fotovoltaicos.

2.1.2 Topologías comúnmente empleadas

En este apartado se mencionan algunas de las arquitecturas de sistemas fotovoltaicos más comunes.

La mezcla de grupos de módulos fotovoltaicos puede ser llamada: área, campo o arreglo fotovoltaico. Los paneles fotovoltaicos pueden estar arreglados en varias configuraciones las cuales determinan directamente la estructura y topología del dispositivo eléctrico encargado de acondicionar la energía eléctrica proveniente de los mismos, el cual puede ser un convertidor CD-CD o CD-CA.

Los principales tipos de configuración de paneles fotovoltaicos se presentan a continuación:

- Configuración central: los módulos son agrupados en cadenas cortas o largas, las cuales están conectadas en paralelo a un inversor central (ver figura 3).
- Configuración en cadena: cada cadena de paneles fotovoltaicos está conectada a un solo inversor monofásico. Cuando la tensión es baja se necesita un convertidor *boost* CD-CD (ver figura 3).

- Configuración multi cadena: cada cadena es provista de un convertidor CD-CD. Cada cadena tiene implementado su propio *MPPT* mediante un convertidor CD-CD (ver figura 3).
- Configuración modular: cada cadena está conectada a un convertidor CD-CD y posteriormente a un bus de CD. Para conectar la instalación a una red monofásica o trifásica, se requiere de uno o más inversores (ver figura 4).
- Configuración modular CA: cada módulo fotovoltaico tiene su propio inversor (ver figura 4).

En la tabla 1 se muestra una comparación entre las diferentes arquitecturas de sistemas fotovoltaicos [2].

| Tipo de configuración | Ventajas | Desventajas |
|-----------------------|---|--|
| Inversor central | Utilizado a altas potencias $P > 10 \text{ kW}$ | Pérdidas significativas de suministros en caso de falla del inversor |
| | Bajo costo de capacidad instalada | |
| | Buenos resultados en condiciones de sombra parcial | Baja eficiencia debido a la falta de <i>MPPT</i> por cada cadena |
| Cadena | Presenta <i>MPPT</i> a nivel de cadena | Costo relativamente alto |
| | Permite la construcción en pasos | |
| | Se utiliza a una potencia promedio de 10 - 12 kW | Solamente monofásico |
| Multi cadena | Cada cadena está equipada con un convertidor CD-CD con su propio <i>MPPT</i> | Bajo costo |
| | | En caso de falla en el inversor, el sistema se apaga |
| Modular | Se utiliza a altas potencias 10 - 30 kW | Alto costo |
| | Cuenta con <i>MPPT</i> en la cadena, baja pérdida de potencia en un evento de falla, siendo rápidamente reemplazado el módulo | Requiere personal altamente calificado y piezas de repuesto en stock |
| Modular CA | Cada panel fotovoltaico está provisto con su propio inversor y algoritmo <i>MPPT</i> | Alto costo |
| | | Baja potencia 1 kW |
| | | Requiere personal altamente calificado |

Tabla 1. Comparación entre arquitecturas de sistemas fotovoltaicos.

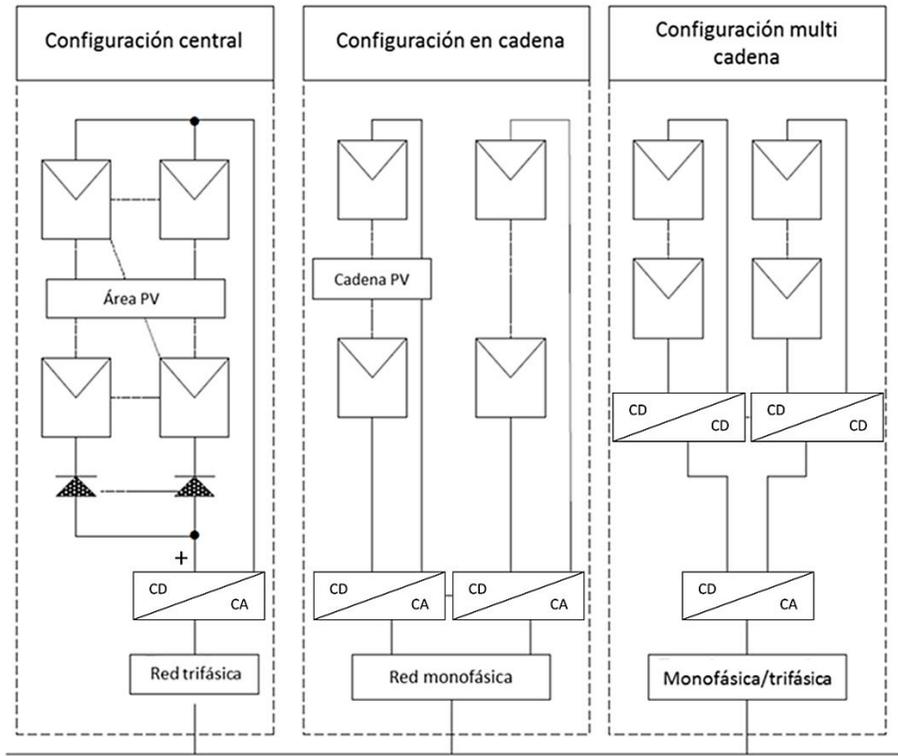


Figura 3. Configuración central, en cadena y multi cadena [2].

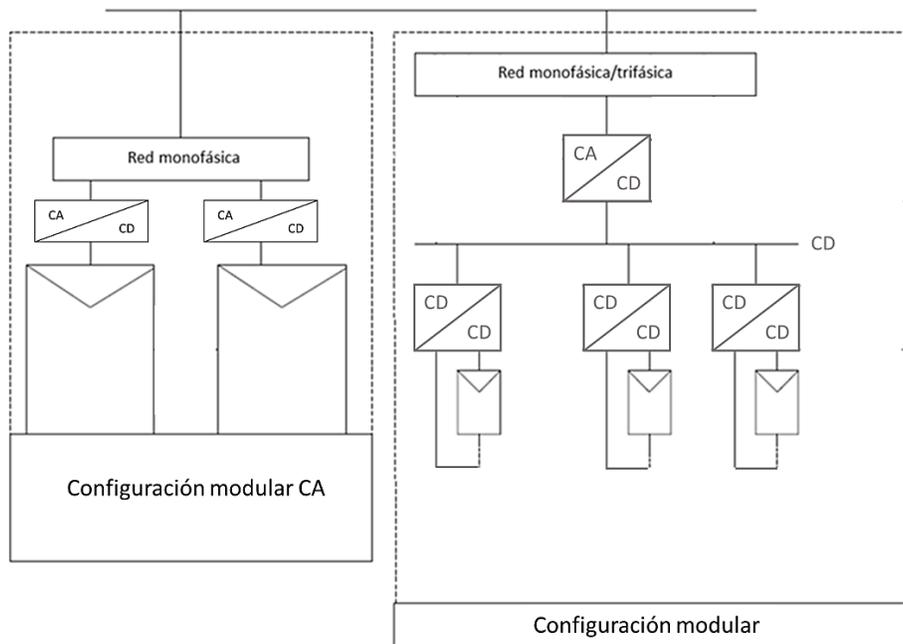


Figura 4. Configuración modular y modular CA [2].

2.2 Irradiancia solar

2.2.1 Irradiancia en el mundo

En este apartado se muestran los niveles de irradiancia solar en el mundo y posteriormente en México. En la figura 5 se muestra un planisferio horizontal con los niveles de irradiancia solar incidente de manera horizontal en todo el mundo. La unidad de medida de la irradiancia solar es W/m^2 .

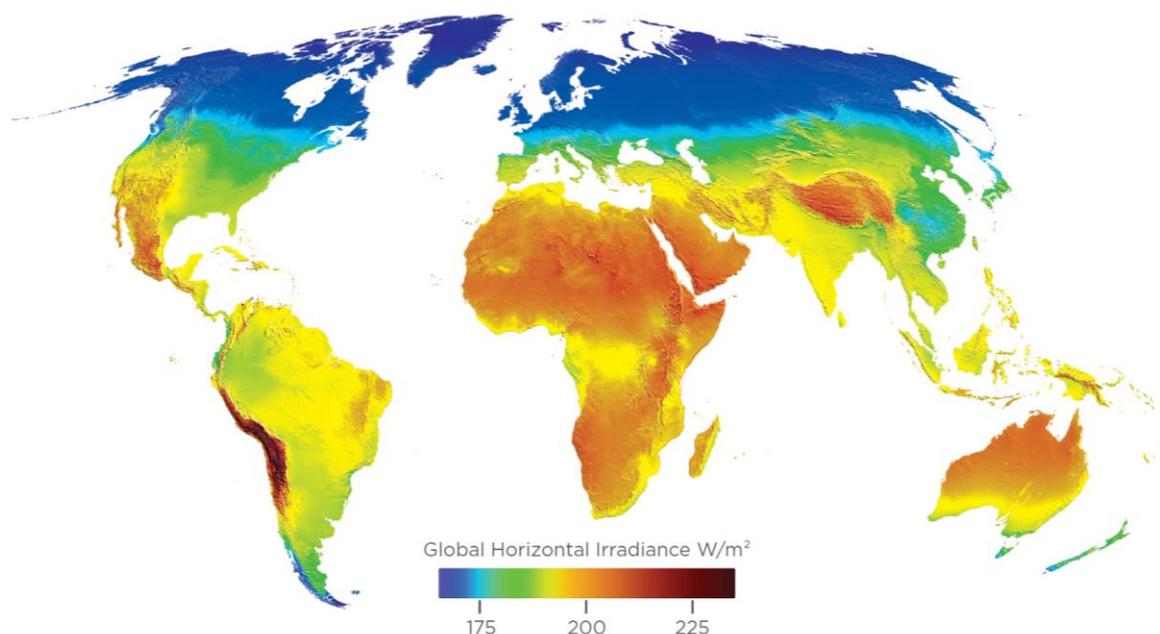


Figura 5. Niveles de irradiancia solar en el mundo [3].

2.2.2 Irradiancia en México

En este apartado se muestra el potencial de generación de electricidad a partir de la energía solar fotovoltaica en la República Mexicana. Para tal estudio se accede a la base de datos oficial de la Secretaría de Energía (SENER) y de la Comisión Federal de Electricidad (CFE) donde se investigan las estadísticas correspondientes.

La información más reciente disponible es del año 2016 y es plasmada en una serie de mapas identificados como “escenarios”.

Para la obtención de las zonas disponibles de alto potencial de energía solar, se asume una densidad de potencia por superficie de $66.67 MW/km^2$, resultado de un análisis de densidad de potencia por superficie. Al aplicar una restricción de continuidad de la superficie, solo se seleccionan aquellas áreas que permitan una capacidad instalada de 10 MW en el primer

escenario, 50 MW en el segundo escenario y 100 MW en el tercer y cuarto escenario, es decir, se descartan las áreas menores a 15, 75 y 150 hectáreas en cada escenario respectivamente.

Además, se excluyen los sitios con relación a aspectos técnicos y económicos, como: las zonas con irradiancia global horizontal menor a 5.5 kWh/m²/día, las zonas distantes a la Red Nacional de Transmisión, las zonas distantes a carreteras y las zonas con grandes pendientes.

Con relación a los aspectos ambientales: las áreas naturales protegidas y los humedales de gran importancia. En relación a los aspectos sociales (legales): las zonas con monumentos históricos y arqueológicos, y vías de comunicación (carreteras y vías férreas). En relación a los aspectos socioeconómicos: se excluyen los cuerpos de agua y las localidades urbanas y rurales. Sin embargo, en las localidades rurales no se consideraron aquellas con una cantidad de habitantes menor a 500, esto con el objeto de mejorar la precisión de la evaluación; debido a que en el país existen demasiadas localidades con muy pocos habitantes. Además, en dichas localidades, su población se encuentra dispersa, por lo que podría ser posible construir centrales fotovoltaicas.

Finalmente, se considera importante excluir aquellas zonas identificadas como de alto riesgo, por lo tanto, se excluyen las zonas aledañas a volcanes activos, zonas con mayor incidencia de ciclones tropicales y las zonas susceptibles de inundación [4].

En la tabla 2 se muestra el potencial solar fotovoltaico aprovechable en la República Mexicana (únicamente se consideran sistemas fotovoltaicos fijos).

| Escenario | Área disponible (km ²) | Capacidad instalable (MW) | Potencial de generación (GWh/a) | Emisiones de CO ₂ evitables (Mt*/a) |
|-----------|------------------------------------|---------------------------|---------------------------------|--|
| 1 | 511,174 | 1,171,881 | 2,121,803 | 963,299 |
| 2 | 275,039 | 639,420 | 1,156,286 | 524,954 |
| 3 | 59,609 | 139,000 | 252,545 | 114,656 |
| 4 | 204,297 | 462,279 | 837,560 | 380,252 |
| Σ (1-4) | 1,050,119 | 2,412,580 | 4,368,194 | 1,983,161 |

Tabla 2. Potencial solar fotovoltaico.

*1 Mt = 1,000,000,000 kg

2.3 Paneles fotovoltaicos

2.3.1 Composición y construcción

Los paneles o módulos fotovoltaicos, también conocidos como paneles solares o placas solares, están formados por un conjunto de celdas fotovoltaicas que producen electricidad a partir de la luz solar que incide sobre ellas mediante el efecto fotoeléctrico, ver figura 6.

Los paneles fotovoltaicos, en función del tipo de celdas que los componen, se dividen en:

Cristalinas:

- Mono cristalinas: se componen de secciones de un único cristal de silicio (Si). Son reconocibles por su forma circular u octogonal.
- Poli cristalinas: cuando están formadas por pequeñas partículas cristalizadas de silicio (Si).

Amorfas: cuando el silicio (Si) no se ha cristalizado.

La eficiencia de los paneles fotovoltaicos es mayor cuanto mayor es la cantidad de cristales que lo componen, pero al mismo tiempo aumenta su peso, grosor y costo [5]. El rendimiento de las cristalinas puede alcanzar el 22% mientras que el de las amorfas alcanza apenas un 10%, sin embargo, su costo y peso es muy inferior [6].

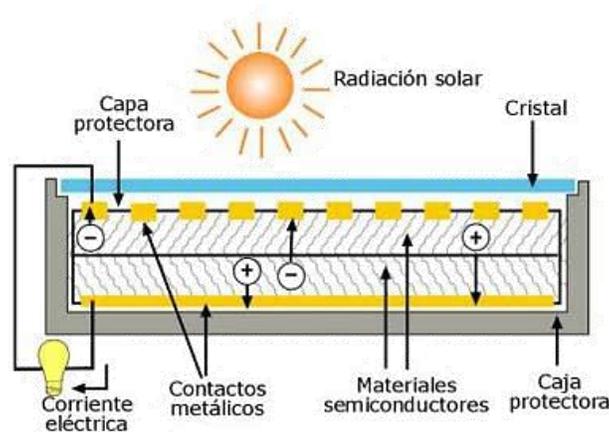


Figura 6. Diagrama de funcionamiento de una celda fotovoltaica.

2.3.2 Modelo matemático de un panel fotovoltaico

En la figura 7 se muestra el circuito eléctrico que simula el comportamiento de un panel fotovoltaico [7].

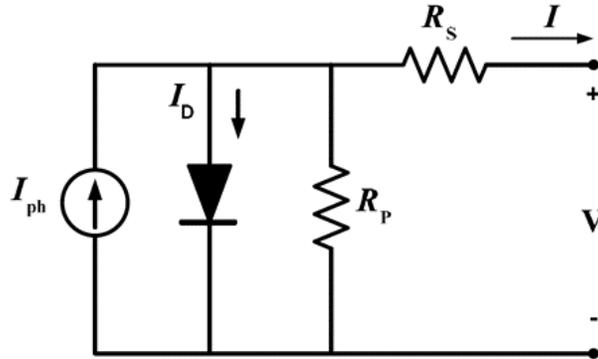


Figura 7. Modelo eléctrico de un panel fotovoltaico.

A partir del modelo eléctrico anterior, la ecuación matemática (1) que determina la cantidad de corriente eléctrica entregada por un panel fotovoltaico es la siguiente [8]:

$$I = I_{ph} - I_{sat} \left(e^{\frac{V + IR_s}{N_s A V_T}} - 1 \right) - \frac{V + IR_s}{R_p} \quad (1)$$

Las variables de la ecuación anterior se describen en la tabla 3.

| Variable | Descripción | Unidad |
|------------------|---|--------|
| I | Corriente en la terminal del módulo FV | A |
| I _{ph} | Corriente fotovoltaica | A |
| V | Tensión en la terminal del módulo FV | V |
| R _s | La resistencia de serie equivalente | Ω |
| R _p | La resistencia de paralelo equivalente | Ω |
| I _{sat} | Corriente de saturación del diodo | A |
| A | Factor de idealidad del diodo (1 ≥ A ≥ 2) | |
| N _s | Número de celdas conectadas en serie | |
| V _t | Tensión térmica del diodo (V _t = kT/q) | V |
| k | Constante de Boltzmann (1.3806503 e ⁻²³ J/K) | |
| T | Temperatura | K |
| q | Carga de electrón (1.60217646 e ⁻¹⁹ C) | |

Tabla 3. Variables de la ecuación de comportamiento de un panel fotovoltaico.

2.4 Baterías recargables

El banco de baterías se encarga de almacenar la energía para que pueda ser utilizada durante la noche o durante periodos prolongados de mal tiempo en los que no se tiene suficiente radiación solar.

2.4.1 Tipos de baterías

Una batería es un elemento que convierte energía química en energía eléctrica mediante un proceso electroquímico. Una celda es la unidad básica de una batería, por lo que una batería está formada por un conjunto de celdas. La celda está formada por dos electrodos (uno positivo y otro negativo) inversos en un electrolito, el electrolito es el medio iónico que permite la transferencia de electrones entre el ánodo y el cátodo.

Los factores que determinan la cantidad de energía que posee una batería son la capacidad y la tensión. La capacidad indica la cantidad de corriente que puede suministrar durante una descarga en un tiempo específico y para una tensión de corte. La capacidad se expresa en Amperios hora (Ah) y depende de varios factores, como la corriente, la temperatura o el estado de salud de la batería.

A mayor corriente de descarga, menor capacidad efectiva o aprovechable. Esto es debido a que la corriente determina la velocidad de reacción. A mayor corriente, las reacciones internas de la batería son más superficiales y por tanto la capacidad aprovechable disminuye.

El incremento de temperatura favorece a los procesos electroquímicos que tienen lugar en la batería, y por lo tanto la capacidad efectiva aumenta.

El estado de carga o *SOC (state of charge)* es un indicador de la energía almacenada en una batería. Este indicador se expresa en porcentaje y varía de 0 a 100%. Cuando el estado de carga es igual a 100% la batería se encuentra cargada completamente, y 0% cuando esté completamente descargada. Que el *SOC* sea igual a 0% no implica que no quede energía en el interior de la batería, de hecho, sí queda almacenada en el interior. El 0% indica el límite a partir del cual, si se continúa extrayendo energía de la batería, se producirán cambios irreversibles en esta, quedando gravemente deteriorada. Este límite lo marca la tensión de corte, esta tensión representa el valor mínimo de tensión por el cual, por debajo de este la batería se deteriora. La cantidad de energía que puede extraerse de una batería se denomina profundidad de descarga o *DOD (depth of discharge)*.

La capacidad de una batería se suele dimensionar de acuerdo al tipo de uso, consumo diario, días de autonomía o potencia máxima requerida por la instalación.

Existen diversos tipos de baterías que pueden ser empleadas en aplicaciones fotovoltaicas, algunas de ellas son las siguientes:

- Baterías de plomo-ácido: están formadas por electrodos de plomo bañados en un electrolito de ácido sulfúrico. En general son económicas y fáciles de fabricar. No admiten sobrecargas y tienen un peso y volumen elevados para la energía que almacenan. Admiten descargas profundas.
- Baterías de níquel-cadmio (Ni-Cd): están formadas por electrodos de cadmio bañados en un electrolito de hidróxido de potasio. Funcionan bien en un amplio rango de temperaturas y se pueden sobrecargar sin sufrir daños. Admiten descargas profundas y proporcionan un buen número de ciclos de recarga. Su peso y volumen son ligeramente menores en comparación con las baterías de plomo-ácido.
- Baterías de níquel-hidruro metálico (Ni-MH): están formadas por un ánodo de cadmio y un cátodo de aleación de hidruro metálico. Estas baterías están sustituyendo a las baterías de níquel-cadmio por contar con mayor capacidad de almacenamiento. Sin embargo, el número de ciclos de recarga que proporcionan es menor y no trabajan bien en condiciones de frío extremo.
- Baterías de iones de litio (Li-ion): están formadas por un ánodo de grafito y un cátodo de óxido de cobalto, trifilina u óxido de manganeso. Su capacidad de almacenamiento es elevada en relación a su peso y volumen.
- Baterías de polímero de litio (Li-Po): son una variación de las baterías de iones de litio. Éstas mejoran sus características de peso y volumen, mientras se mantiene la misma capacidad de almacenamiento.

El punto común entre los dos primeros tipos de baterías reside en su capacidad para ser cargadas y descargadas repetidamente, por lo que se denominan baterías de ciclo profundo. De este modo, su vida útil es muy superior al resto de baterías convencionales [9].

Para el caso de las baterías de plomo-ácido, éstas están constituidas por celdas individuales conectadas entre sí en serie y paralelo. Estas celdas tienen una tensión cercana a los 2 V.

Cada celda consta de un depósito con una mezcla de agua y ácido sulfúrico, el cual está lleno de placas de plomo paralelas entre si y separadas por un aislante eléctrico que deja pasar el electrolito. El tamaño del depósito, la densidad de la mezcla ácido-agua y la cantidad y el espesor de las placas de plomo es lo que determina la capacidad y potencia de la batería.

Normalmente, cuando la batería está cargada, en las placas positivas hay un recubrimiento de dióxido de plomo. A medida en que se descarga la batería las placas negativas, que están hechas de plomo esponjoso, se recubren de sulfato de plomo (ver figura 8).

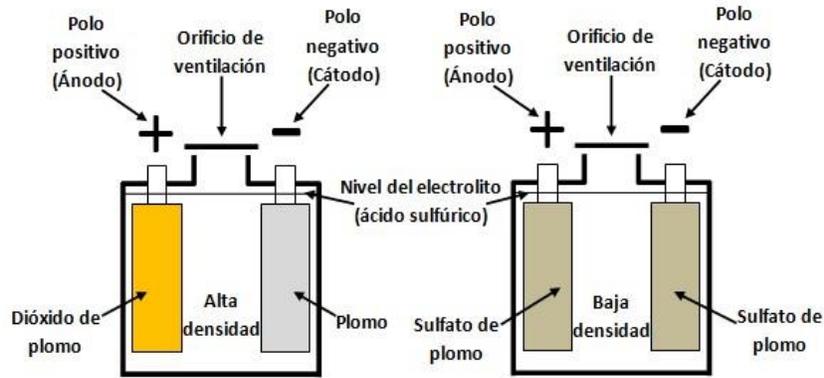


Figura 8. Batería cargada (izquierda) y batería descargada (derecha).

2.4.2 Modelo eléctrico de una batería

Existen diferentes maneras de modelar una batería, puesto que cada una tiene sus ventajas y desventajas. Se pueden clasificar principalmente en tres tipos:

- Modelos *lookup table*: los modelos *lookup table* (tabla de búsqueda) son aquellos métodos que establecen una relación directa entre el *SOC* y una medición física.
- Modelos físicos: basados en la definición de *SOC*. Buscan una relación entre la concentración disponible y la máxima del material activo en el ánodo. El contador Amperios hora de Coulomb es el más conocido y uno de los más utilizados.
- Modelos de regresión estadística: relación lineal o no lineal del *SOC* con las entradas sin tener una interpretación física. Los más destacados son las redes neuronales.

Dentro de los modelos físicos se encuentran los modelos eléctricos. En ellos mediante circuitos eléctricos se modelizan las reacciones químicas que se dan en una batería. Para ello se utilizan elementos eléctricos tales como resistencias y capacitores. En modelos de este tipo, no se suelen separar los procesos que tienen lugar en cada electrodo [10].

Uno de los modelos eléctricos más utilizados, principalmente por su sencillez, consiste en una resistencia constante en serie con una fuente de tensión ideal (ver figura 9). Existen otros modelos basados en éste los cuales establecen la resistencia en función del estado de carga [11].

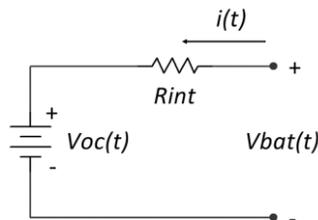


Figura 9. Modelo eléctrico *Thevenin*.

2.5 Convertidores de potencia

La conversión de potencia es el proceso de convertir una forma de energía en otra, esto puede incluir procesos electromecánicos o electroquímicos.

Los tipos más habituales de conversión de energía eléctrica son:

Convertidores CD a CD:

- Reductores.
- Elevadores.
- Reductores-elevadores.

Convertidores CA a CD:

- Rectificadores.
- Fuentes de alimentación conmutadas.

Convertidores CD a CA (inversores).

Convertidores CA a CA:

- Transformadores/autotransformadores (dispositivos eléctricos).
- Conversores CA-CA (dispositivos electrónicos).

Convertidores de tensión a corriente y viceversa.

2.5.1 Convertidores comúnmente empleados en aplicaciones fotovoltaicas

En este apartado se describen algunos de los convertidores de potencia utilizados en instalaciones fotovoltaicas.

En primer lugar, se tiene un convertidor bidireccional CD-CD aislado para aplicaciones fotovoltaicas. Este convertidor es usado como un circuito cargador/descargador de baterías, ver figura 10.

El convertidor de doble puente activo consiste de dos circuitos puente-completo por medio de un transformador de alta frecuencia. Este convertidor provee un flujo de energía bidireccional controlando los dos puentes de manera independiente. Las ventajas de este convertidor son aislamiento galvánico entre la entrada y la salida, poca cantidad de componentes pasivos, alta densidad de potencia y eficiencia. Al controlar el cambio de fase entre los puentes se logra controlar el flujo de energía [12].

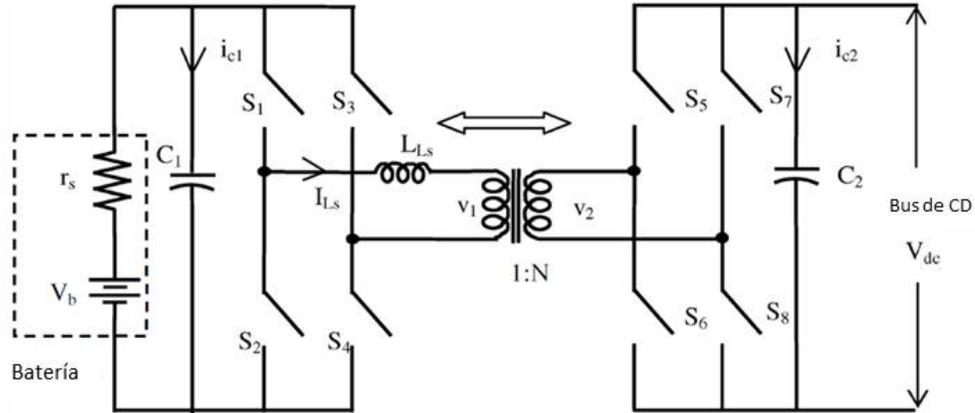


Figura 10. Convertidor bidireccional doble puente activo [12].

En sistemas fotovoltaicos los convertidores bidireccionales CD-CD son usados como cargadores/descargadores de baterías tal y como se muestra en la figura 11.

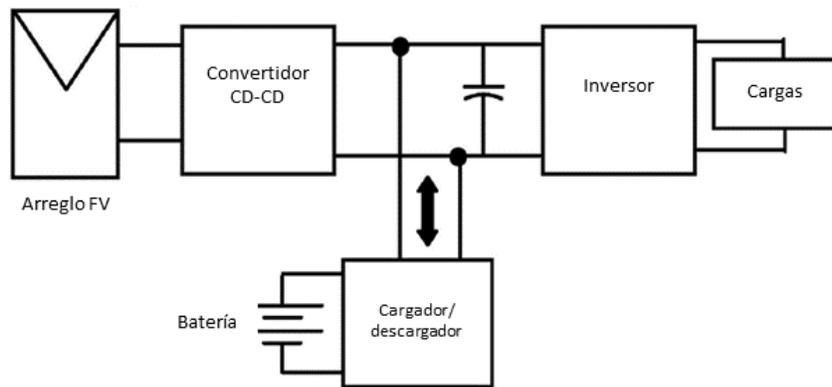


Figura 11. Sistema fotovoltaico con cargador/descargador de batería [12].

El siguiente modelo está compuesto por dos elementos fundamentales, los cuales son: un convertidor unidireccional CD-CD y un convertidor bidireccional CD-CD, ver figura 12.

En comparación con los sistemas fotovoltaicos autónomos tradicionales, este sistema presenta las ventajas de una mejor protección y un control más eficiente en el proceso de carga/descarga de la batería. El punto clave para el manejo de la energía del sistema es controlar eficientemente el convertidor bidireccional (la tensión y la corriente deben ser controladas) [13].

Este convertidor tiene tres modos de operación: *buck* (carga de la batería), *boost* (descarga de la batería) y apagado.

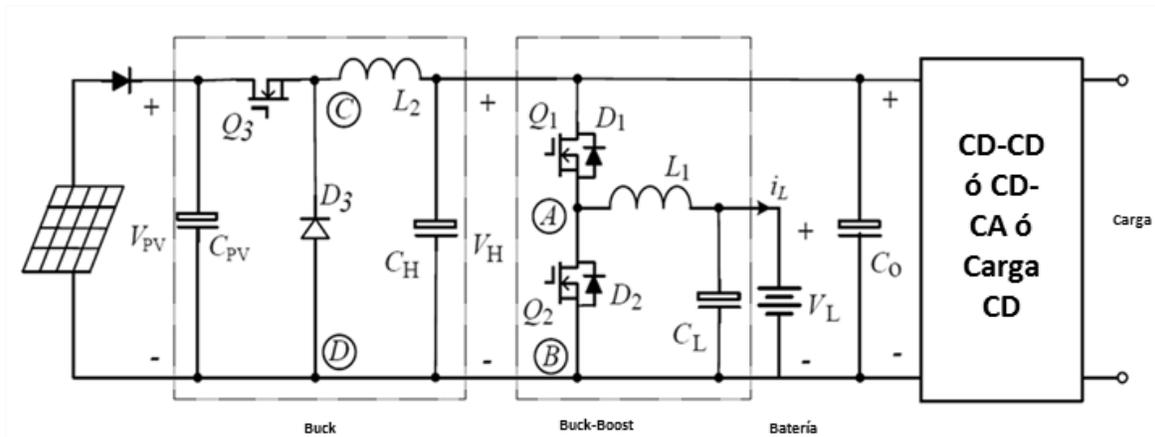


Figura 12. Convertidor compuesto CD-CD [13].

El último modelo a revisar es un convertidor tipo puente completo CD-CD para aplicaciones fotovoltaicas. Este convertidor es muy robusto, confiable y eficiente. En específico, para este diseño se tiene una eficiencia del 94%.

En la figura 13 se muestra la topología del convertidor puente completo CD-CD. Los *MOSFET* Q1 y Q4 al estar en modo de conducción permiten que los diodos D1-D4 operen y transmitan energía a la carga a través del filtro. Después, los *MOSFET* Q2 y Q3 al estar en modo de conducción permiten que los diodos D2 y D3 operen. La topología del convertidor puente completo CD-CD se usa en aplicaciones de media y alta potencia [14].

El transformador acopla la energía del lado primario al secundario, por lo tanto, la eficiencia depende en gran medida de su rendimiento. Un transformador con pocas pérdidas contribuye a tener una mayor eficiencia.

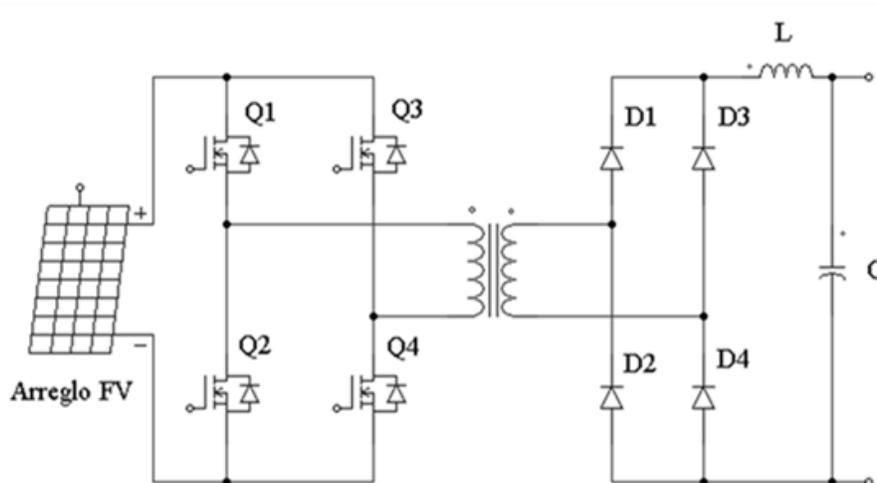


Figura 13. Convertidor puente completo CD-CD [14].

Capítulo 3

Diseño y simulación del sistema fotovoltaico propuesto

En este capítulo se detalla el proceso de diseño de los diferentes elementos y subsistemas que conforman al sistema principal, posteriormente se abordan temas como los niveles de irradiancia solar en la localidad seleccionada, consumo eléctrico estimado de la casa habitación, entre otros. Se analizan varias simulaciones realizadas para validar la propuesta de diseño del sistema fotovoltaico aislado.

En este capítulo se realiza la validación de la propuesta de diseño mostrada con anterioridad y para ello se divide el sistema fotovoltaico aislado en siete etapas independientes para realizar pruebas a cada una de ellas. Las etapas están distribuidas de la siguiente manera:

Etapla 1: se realizan pruebas con un panel fotovoltaico y un convertidor del tipo *boost* #1.

Etapla 2: se realizan pruebas con los mismos elementos de la etapa 1 pero se incluye el banco de baterías.

Etapla 3: se realizan pruebas con los mismos elementos de la etapa 2 pero se incluyen tres paneles fotovoltaicos más y tres convertidores del tipo *boost* #1 (siendo en total cuatro paneles fotovoltaicos y cuatro convertidores del tipo *boost* #1). Cada panel fotovoltaico está conectado a un convertidor *boost* #1 y éste último a un controlador de carga en común que, a su vez, se conecta con el banco de baterías.

El controlador de carga seleccionado es un circuito integrado modelo LTC4020 y es el encargado de gestionar de manera segura la energía proveniente de los convertidores *boost* #1 hacia el banco de baterías. Cabe aclarar que en las simulaciones no se utiliza este circuito integrado, únicamente se toma en cuenta como referencia para regular la tensión proveniente de los convertidores *boost* #1. Se sabe que la tensión que debe recibir el controlador de carga para que éste funcione correctamente es de 55 V por lo que la tensión regulada entregada por los convertidores *boost* #1 necesariamente tiene que ser la misma.

A partir de las simulaciones realizadas en las etapas 2 y 3 se identifica que con un total de cuatro paneles fotovoltaicos (conectados en paralelo) se consigue recargar por completo el banco de baterías (se contempla una descarga parcial de aproximadamente 30% de su capacidad máxima de almacenamiento). Esta última afirmación se detalla en el apartado 3.2.2.1.

El sistema fotovoltaico aislado contempla además otro conjunto de paneles fotovoltaicos que entreguen energía eléctrica a la casa habitación durante las horas de luz solar. Para cumplir con esta función es imprescindible utilizar un inversor de corriente para que la energía eléctrica generada por los paneles fotovoltaicos (CD) pueda ser utilizada por cualquier equipo o herramienta dentro de la casa habitación (CA).

La inversión de corriente eléctrica se lleva a cabo mediante un convertidor del tipo puente completo convencional y se busca contar con una tensión de 127 V_{RMS} a la salida de dicho inversor. Para conseguir esta tensión es necesario tener una tensión de entrada en el inversor de 180 V_{CD} y por esta razón se establece que exista una cadena fotovoltaica comprendida por tres paneles fotovoltaicos en serie (con esta interconexión se consigue una tensión cercana a 90 V_{CD} en la propia configuración).

Dicha cadena fotovoltaica se conecta a un convertidor *boost* #2 para regular y elevar la tensión a 180 V_{CD} y así proveer al inversor la tensión de entrada requerida por el mismo.

Etapa 4: se realizan pruebas con una cadena de tres paneles fotovoltaicos y el convertidor *boost* #2.

Debido al aumento de tensión que se lleva a cabo con el convertidor *boost* #2 la corriente disponible se reduce y por este motivo se decide colocar una segunda cadena fotovoltaica en paralelo a la primera. De esta forma el diseño final del sistema fotovoltaico aislado contempla dos cadenas fotovoltaicas en paralelo (con tres paneles fotovoltaicos cada una) que sirven como fuente de energía eléctrica para la casa habitación durante la mañana.

Etapa 5: se realizan pruebas con dos cadenas de paneles fotovoltaicos (cada una comprendida por tres paneles fotovoltaicos), dos convertidores del tipo *boost* #2 y el inversor monofásico.

Etapa 6: se realizan pruebas con el banco de baterías, un convertidor del tipo *boost* #3 y el inversor monofásico.

Etapa 7: se realizan pruebas a todo el sistema fotovoltaico aislado en conjunto. En esta etapa se valida el correcto funcionamiento de los sistemas de control y el acoplamiento entre las diferentes secciones.

La escala de tiempo utilizada en las simulaciones se ajusta de acuerdo a lo que se desea validar. Por ejemplo, para el caso de las pruebas con los convertidores tipo *boost* se utiliza un periodo de tiempo corto de 55 segundos ya que es tiempo suficiente para observar las posibles variaciones en el comportamiento del convertidor (estado transitorio).

En el caso de las etapas 2 y 3 en las cuales se analiza el tiempo de recarga del banco de baterías es necesario utilizar un periodo de tiempo más largo que corresponda al tiempo designado para recargar el banco de baterías.

Por último, en la etapa 7 se utiliza nuevamente un periodo de tiempo corto en el cual se pueden observar claramente las variaciones de tensión y corriente que están presentes en la casa habitación al momento de cambiar la fuente de alimentación.

3.1 Etapa 1

En la figura 14 se muestra el diagrama de la etapa 1 a simular.

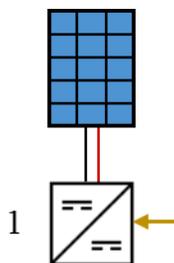


Figura 14. Diagrama de la etapa 1.

3.1.1 Selección del panel fotovoltaico

Los paneles fotovoltaicos seleccionados para desarrollar este proyecto son de la marca *Jinko Solar* y están contruidos a partir de celdas de silicio poli cristalino. Estos paneles son capaces de suministrar hasta 265 W ($V_{mp} = 31.4$ V y $I_{mp} = 8.44$ A) en el punto de máxima potencia considerando condiciones estándar de prueba ($1,000$ W/m², 25°C y un coeficiente de masa de aire de 1.5). La selección de dichos paneles fotovoltaicos se realiza en base a la facilidad de adquisición de los mismos en la ciudad de Cuernavaca.

A partir de las especificaciones provistas por el fabricante se utiliza la interfaz de *MATLAB - Simulink* para simular el comportamiento del panel fotovoltaico y así validar las condiciones y márgenes de operación del mismo.

3.1.1.1 Características del panel fotovoltaico

Las características físicas del panel fotovoltaico seleccionado se muestran en la tabla 4 mientras que las características eléctricas se muestran en la tabla 5.

| Características mecánicas | |
|---------------------------|--------------------------------|
| Tipo de celda | Poli cristalina (156 x 156 mm) |
| Número de celdas | 60 (6 x 10) |
| Peso | 19.0 kg |
| Cables de salida | 12 AWG (900 mm) |

Tabla 4. Características físicas del panel fotovoltaico.

| Características eléctricas | |
|---|--------|
| Potencia máxima (P_{max}) | 265 W |
| Voltaje de máxima potencia (V_{mp}) | 31.4 V |
| Corriente de máxima potencia (I_{mp}) | 8.44 A |
| Voltaje de circuito abierto (V_{oc}) | 38.6 V |
| Corriente de corto circuito (I_{sc}) | 9.03 A |
| Eficiencia del módulo (%) | 16.19% |

Tabla 5. Características eléctricas del panel fotovoltaico.

3.1.1.2 Simulación del modelo de panel fotovoltaico seleccionado

Los márgenes de operación del panel fotovoltaico seleccionado se ejemplifican mediante una gráfica que muestra su comportamiento teórico frente a diferentes niveles de irradiancia solar. La gráfica de la figura 15 muestra dicho comportamiento mientras que los gráficos de la figura 16 muestran el comportamiento del mismo en simulación [1-12].

Para generar los resultados de la figura 16 se utiliza el modelo eléctrico de la figura 7 junto con la ecuación (1) que describe la generación eléctrica fotovoltaica. Las condiciones de prueba de la simulación son:

- Simular un único panel fotovoltaico del modelo seleccionado (265 W).
- Temperatura del semiconductor: 25° C.
- Coeficiente de masa de aire: 1.5 (sin viento).

Adicionalmente, los parámetros y valores que se muestran en la ecuación (1) se calculan mediante el modelo eléctrico de *Simulink* de un panel fotovoltaico. Los parámetros del modelo eléctrico son los siguientes:

- Número de celdas conectadas en serie: 60.
- Factor de idealidad del diodo: 0.94967.
- Corriente de saturación del diodo: 31.241 pA.
- Resistencia equivalente en paralelo: 161.5834 Ω .
- Resistencia equivalente en serie: 0.32579 Ω .
- Corriente generada por la luz solar: 9.0646 A.

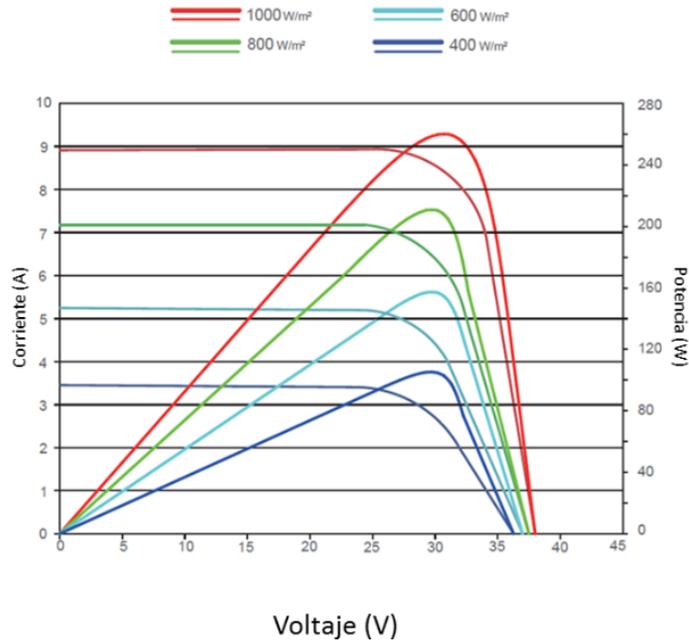


Figura 15. Comportamiento del panel fotovoltaico (otorgado por el fabricante).

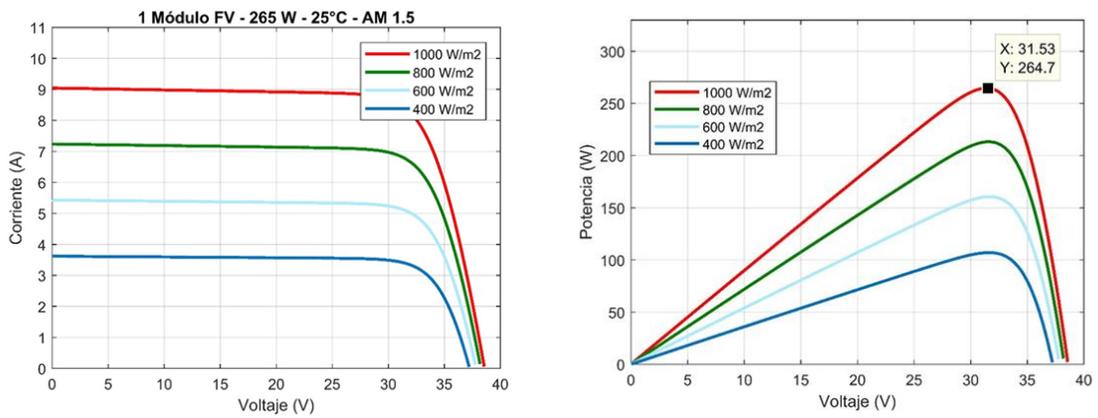


Figura 16. Comportamiento en simulación del panel fotovoltaico.

En la figura 17 se muestra el comportamiento en simulación de una cadena fotovoltaica comprendida por tres paneles fotovoltaicos en serie frente a cambios de temperatura en el semiconductor.

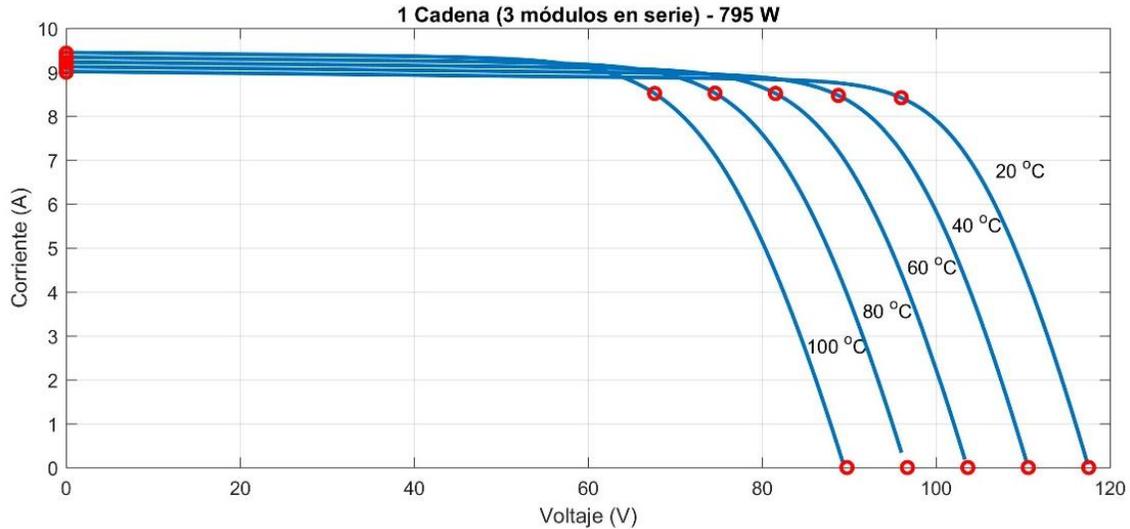


Figura 17. Comportamiento de una cadena fotovoltaica frente a variaciones de temperatura.

3.1.2 Selección del convertidor encargado de regular la tensión

De acuerdo a las características eléctricas del panel fotovoltaico seleccionado se sabe que la tensión entregada por el mismo será de 30 V aproximadamente en tanto la temperatura del semiconductor se mantenga constante; si la temperatura aumenta, la tensión disminuye.

En la literatura consultada se halla que el convertidor elevador tipo *boost* es uno de los convertidores de potencia más usualmente empleado en aplicaciones fotovoltaicas. Además, se sabe que este convertidor cuenta con las siguientes características:

- La corriente de entrada no es pulsante.
- La tensión de salida tiene referencia similar a la tensión de entrada.
- No es posible desconectar la salida de la entrada.

Por estas razones se decide utilizar el convertidor *boost* como elemento encargado de elevar y regular la tensión entregada por los paneles fotovoltaicos.

3.1.3 Convertidor de potencia tipo *boost*

3.1.3.1 Estructura general

El convertidor de potencia tipo *boost* es un convertidor CD a CD que entrega en la salida una tensión continua mayor que la de entrada. Es un tipo de fuente de alimentación conmutada que contiene al menos dos interruptores semiconductores (uno de estos forzosamente controlado), y al menos un elemento para almacenar energía [13-14]. En la figura 18 se muestra el diagrama eléctrico de dicho convertidor.

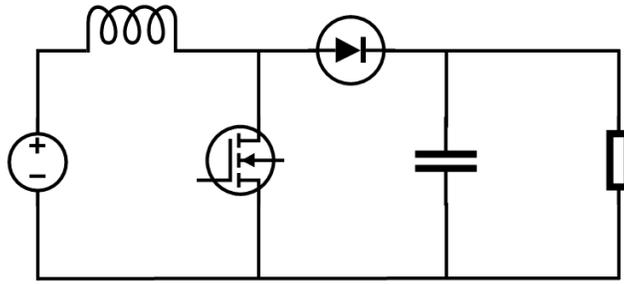


Figura 18. Convertidor *boost*.

El diseño de los convertidores *boost* contempla un funcionamiento en modo continuo por lo que la corriente a través del inductor nunca llega a cero. Los dos estados de operación presentes en cada convertidor son los siguientes:

Modo ON: la energía se transfiere de la fuente de alimentación a la bobina y del condensador a la carga, ver figura 19.

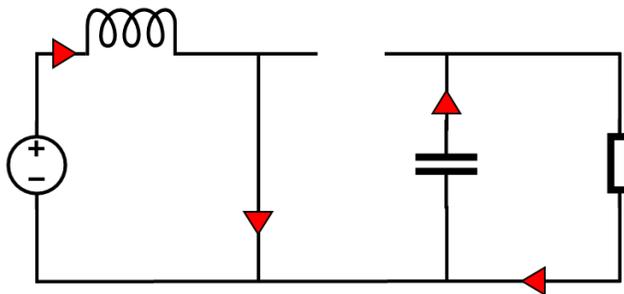


Figura 19. Convertidor *boost* en modo *ON*.

Modo OFF: la energía se transfiere de la fuente de alimentación y de la bobina al condensador y a la carga, ver figura 20.

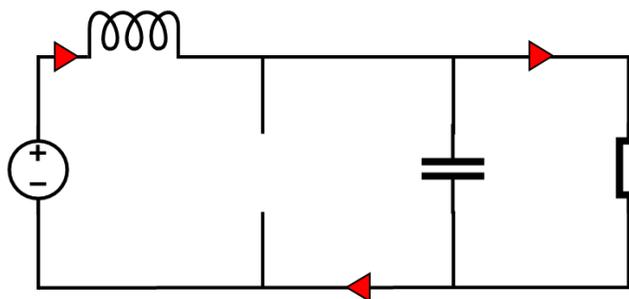


Figura 20. Convertidor *boost* en modo *OFF*.

3.1.3.2 Especificaciones de diseño del convertidor *boost* #1

En el diseño final propuesto para el sistema fotovoltaico aislado se contemplan tres modelos diferentes de la misma topología (*boost*). Los cálculos realizados para el diseño del primer convertidor *boost* son los siguientes:

$$V_{in} = 31.4 V$$

$$V_o = 55V$$

$$P_o = 265 W$$

$$f = 25 \cdot 10^3 \text{ Hz}$$

$$\Delta V_c = 3\% \cdot V_o = 1.65 V$$

$$\Delta i_L = (V_{in}/L) \cdot t_{on} = 0.964 A$$

$$I_o:$$

$$R = \frac{V_o^2}{P_o} = 11.42 \Omega$$

$$I_o = \frac{V_o}{R} = 4.82 A$$

$$D = 1 - \frac{V_{in}}{V_o} = 0.43$$

Inductor:

$$L = \frac{V_{in} \cdot D}{\Delta i_L \cdot f} = (559 \cdot 10^{-6}) H$$

Capacitor:

$$C = \frac{D \cdot I_o}{\Delta V_c \cdot f} = (50 \cdot 10^{-6}) F$$

Para el diseño de este convertidor se propone un rizo de corriente en el inductor de 0.96 A que corresponde a un 20% de la corriente de salida. Este valor puede ser mayor o menor, pero es indispensable proponerlo, o en su defecto, proponer un valor de inductor y después calcular el rizo de corriente que se tiene.

La potencia de funcionamiento asignada es de 265 W ya que es la potencia máxima que puede entregar un panel fotovoltaico del modelo seleccionado.

Además de diseñar el propio convertidor *boost* es necesario contar con un sistema de control que ajuste de manera automática el ciclo de trabajo de dicho convertidor para mantener una tensión de salida constante.

Para diseñar el sistema de control antes mencionado es preciso modelar el comportamiento del convertidor *boost*.

3.1.3.3 Modelado eléctrico del convertidor *boost*

El modelado del convertidor *boost* es necesario para poder diseñar un control proporcional, integral y derivativo (PID) eficaz que permita mantener una salida de tensión constante en dicho convertidor [15].

Para conseguir una aproximación más cercana al comportamiento real del convertidor *boost*, éste se modela incluyendo los efectos resistivos propios del inductor y del capacitor (dichos efectos también son conocidos como “parásitos”). En la figura 21 se muestra el diagrama eléctrico del convertidor a modelar.

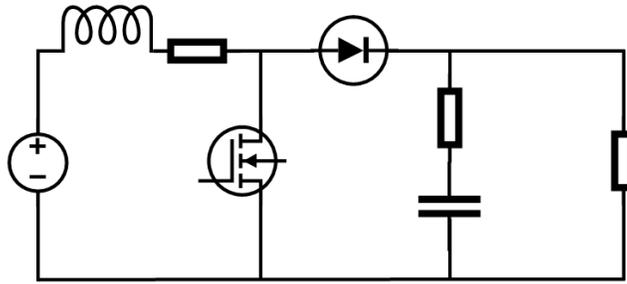


Figura 21. Convertidor *boost* con efectos resistivos (R_L y R_C).

El circuito eléctrico de la figura anterior es modelado utilizando *MATLAB – Simulink* y a partir de dicho modelado se diseña el algoritmo de control.

3.1.3.4 Lazo de control PID

Un controlador PID (controlador proporcional, integral y derivativo) es un método de control simultáneo por realimentación el cual calcula la desviación o error entre un valor medido y un valor deseado.

El algoritmo del control PID está comprendido por tres parámetros distintos: el proporcional, el integral y el derivativo. La suma de estos tres parámetros se usa para ajustar el sistema por medio de un elemento de control.

La respuesta del controlador puede describirse en términos de respuesta del control ante un error, el grado en el que el controlador sobrepasa el *set point* y el grado de oscilación del sistema.

Un controlador PID también puede ser llamado PI, PD, P o I en relación a la ausencia de las acciones de control respectivas. Esto se debe a que existe una enorme variedad de sistemas y de necesidades específicas en cada uno de ellos. Los controladores PI son bastante comunes ya que la acción derivativa es muy sensible al ruido [16].

Para el correcto funcionamiento de un controlador PID se necesitan los siguientes elementos:

- Un sensor (el cual determina el estado del sistema).
- Un controlador (es el que genera la señal que gobierna al actuador).
- Un actuador (es el que modifica al sistema de manera controlada).

El sensor proporciona una señal analógica o digital al controlador, la cual representa el punto actual en el que se encuentra el sistema.

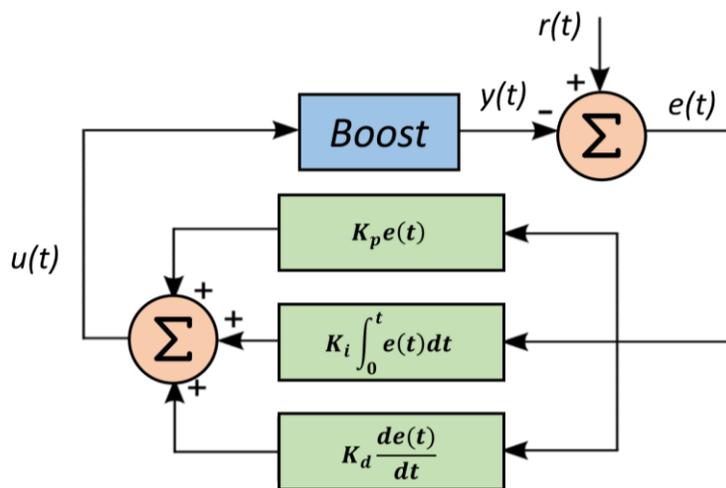
El controlador también recibe una señal externa que representa el valor que se desea alcanzar. Esta señal recibe el nombre de *set point* (o valor de referencia), la cual es de la misma naturaleza y tiene el mismo rango de valores que la señal que proporciona el sensor.

El controlador resta la señal de punto actual a la señal de referencia y así se obtiene la señal de error, que determina en cada instante la diferencia que hay entre el valor deseado (*set point*) y el valor medido. La señal de error es utilizada por cada uno de los 3 componentes del controlador PID. Las 3 señales sumadas, componen la señal de salida que el controlador utiliza para gobernar al actuador. La señal resultante de la suma de estas tres se llama variable manipulada.

Para este sistema, la forma final del algoritmo del PID es la siguiente:

$$duty = K_p e(t) + K_i \int_0^t e(t) dt + K_d \frac{de(t)}{dt}$$

A continuación, se muestra un diagrama de bloques del controlador PID en un lazo realimentado:



Las señales mostradas en el diagrama de bloques anterior corresponden a lo siguiente:

- $y(t)$ = señal de medición (tensión entregada por el convertidor *boost*).
- $r(t)$ = señal de referencia (valor de tensión deseada).
- $e(t)$ = señal de error (diferencia entre el valor deseado y el valor medido).
- $u(t)$ = señal de control (ciclo de trabajo).

Un control PID busca corregir eficazmente y en el mínimo tiempo posible los efectos de las perturbaciones en el sistema.

En la figura 22 se muestra un diagrama del lazo de control PI que se emplea en los convertidores *boost*.

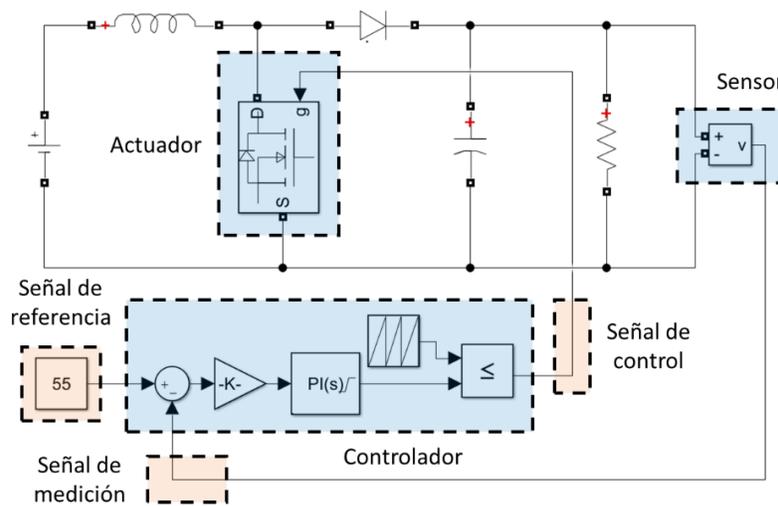


Figura 22. Lazo de control PI.

La función principal de los controladores PID en este sistema es la de mantener la tensión de salida de los convertidores *boost* regulada y constante ante cualquier variación de tensión en la entrada de los mismos.

En este escenario, el sensor viene a ser un sensor de tensión conectado a las terminales de salida del convertidor *boost*. Para tal fin puede considerarse el sensor SVL1 de la marca *Shenzhen SoCan* que es capaz de medir tensiones de hasta 300 V_{CD}. La señal de medición entregada por el sensor es del tipo análogo (0-5 V) y es proporcional (lineal) al valor de tensión medido.

El controlador es la rama que se ubica entre el sensor y el actuador y está compuesta por operadores lógicos, operadores algebraicos, un generador de pulsos y el respectivo algoritmo del propio controlador.

En última instancia el actuador está representado por el propio interruptor del convertidor *boost*.

Los valores obtenidos para el convertidor *boost* #1 se muestran a continuación.

Ganancias para el convertidor *boost* #1:

| K_p | K_i |
|---------|---------|
| 0.35197 | 1.14011 |

Estas ganancias han sido calculadas mediante la herramienta de ajuste y estabilidad dentro del bloque PI y permiten que el convertidor sea estable.

3.1.4 Simulación en *Simetrix*

Para el caso de los convertidores *boost* (diseños 1, 2 y 3) se valida inicialmente el comportamiento y estabilidad de los mismos mediante *Simetrix*, para posteriormente añadir las variaciones de tensión en la entrada y el lazo de control a cada uno de ellos en *Simulink*.

En la figura 23 se muestra el circuito eléctrico correspondiente al convertidor *boost* #1 y en la figura 24 se muestran los resultados de simulación.

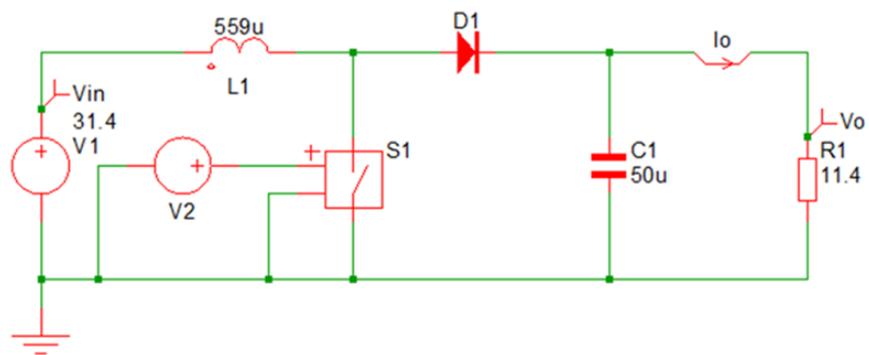


Figura 23. Circuito eléctrico del convertidor *boost* #1.

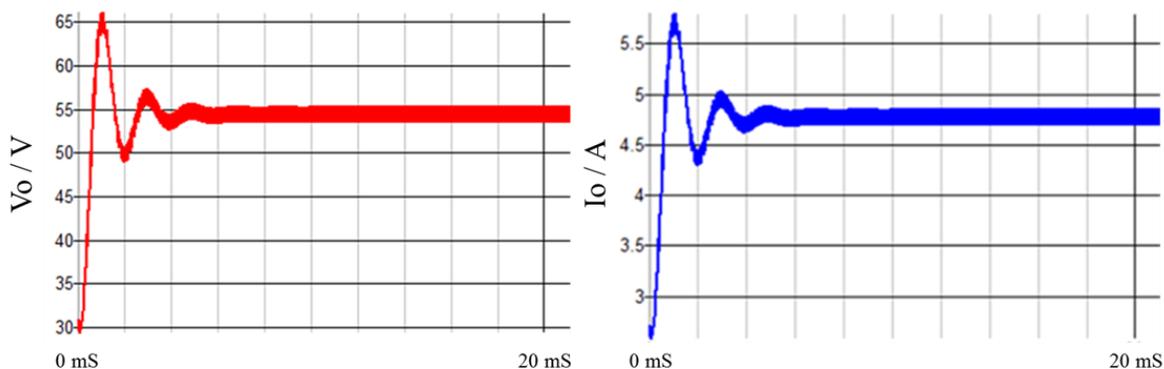


Figura 24. Formas de onda de la tensión de salida (V_o : 54.24 V) junto con la corriente de salida (I_o : 4.75 A).

3.1.5 Simulación en *Simulink*

En la figura 25 se muestra el circuito eléctrico correspondiente a la etapa 1 implementado en la interfaz de *MATLAB – Simulink*.

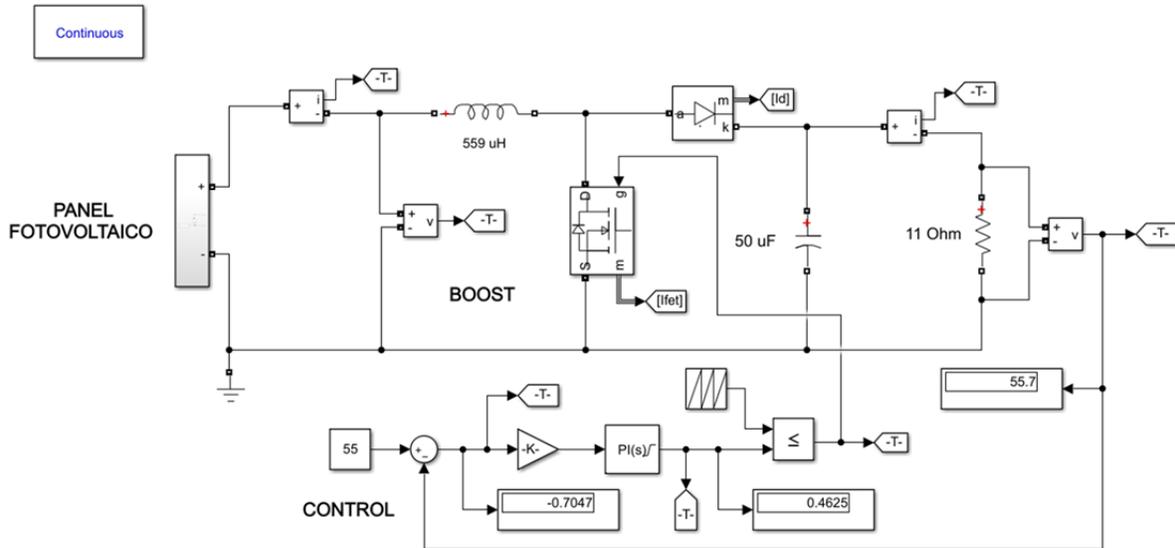


Figura 25. Circuito eléctrico de la etapa 1.

En la figura 26 se muestran las variaciones de tensión en el panel fotovoltaico debidas al aumento o disminución de la temperatura en el mismo. Esta tensión es la que “recibe” como entrada el convertidor *boost* #1.

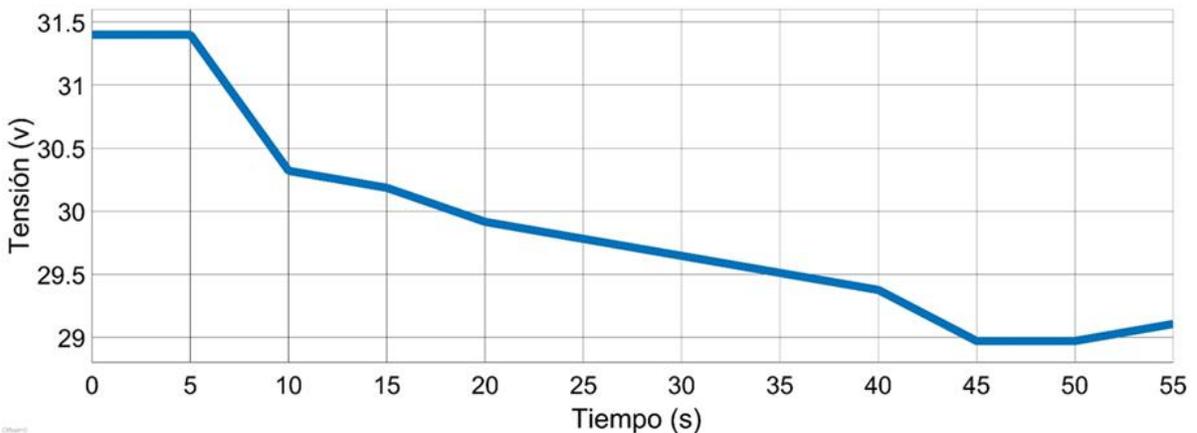


Figura 26. Variaciones de tensión en el panel fotovoltaico.

En la figura 27 se muestra la señal de tensión regulada entregada por el convertidor *boost* #1 y en la figura 28 se muestra la forma de onda de la misma señal.

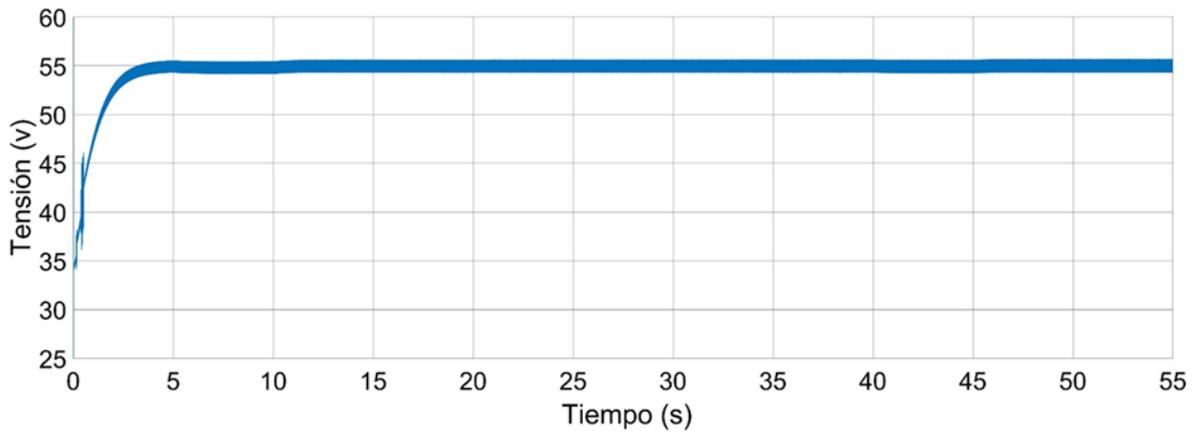


Figura 27. Tensión entregada por el convertidor *boost* #1.

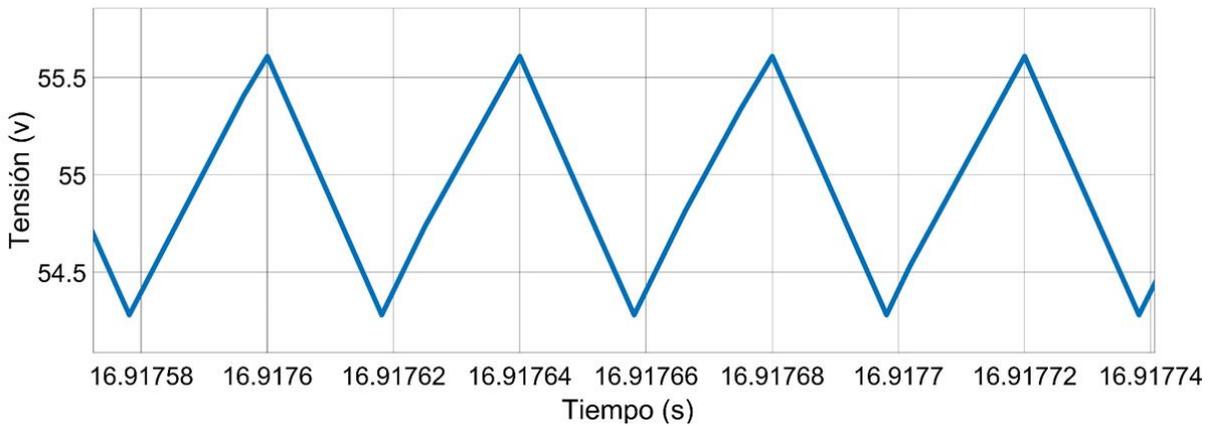


Figura 28. Forma de onda de la tensión entregada por el convertidor *boost* #1.

En la figura 29 se muestra la forma de onda del *PWM* utilizado para controlar el *MOSFET* del convertidor *boost* #1.

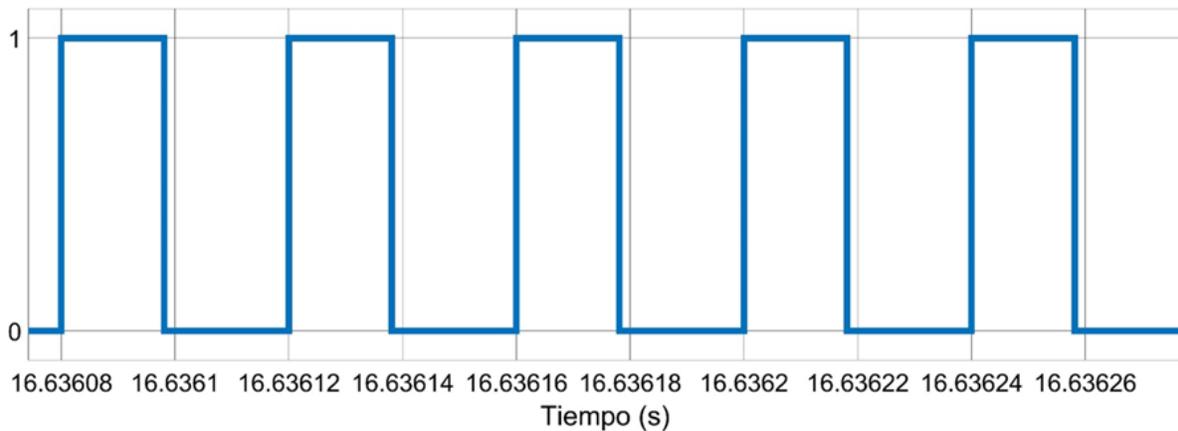


Figura 29. Forma de onda del *PWM* utilizado en el convertidor *boost* #1 ($F = 25$ kHz).

En la figura 30 se muestra la desviación que presenta la señal de salida de tensión del convertidor *boost* #1 con respecto a la señal de referencia (55 V).

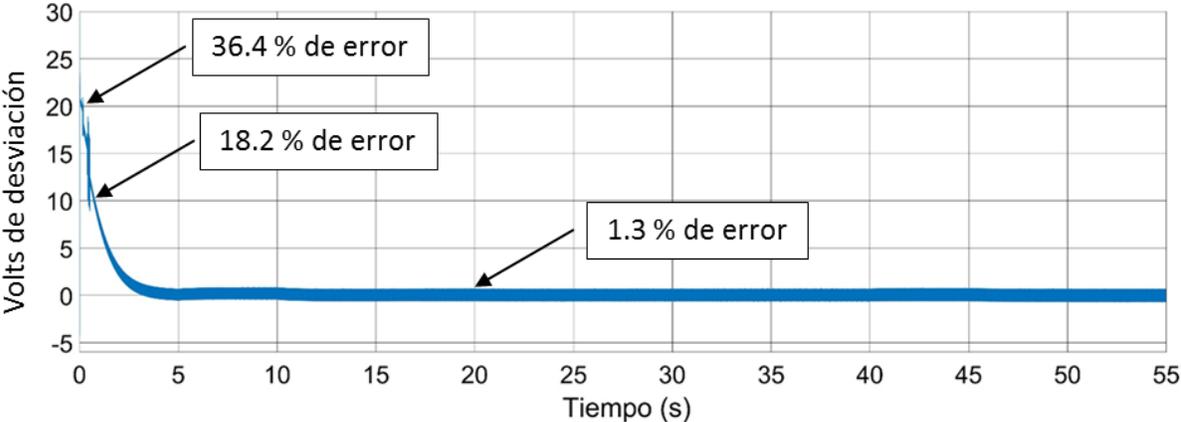


Figura 30. Señal de error que recibe el control PI.

En la figura 31 se muestra la compensación que realiza el control PI para mantener el error cercano a cero (dicha compensación se refiere al ciclo de trabajo).

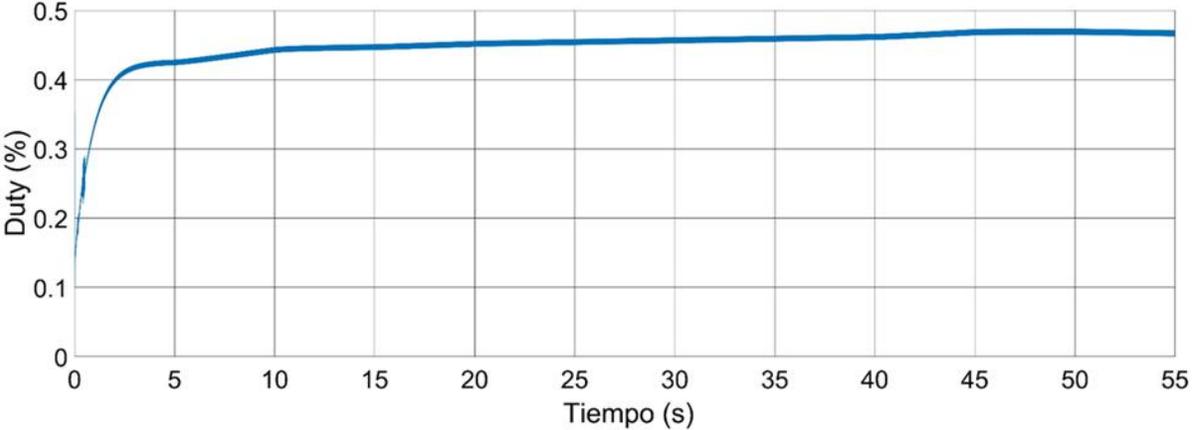


Figura 31. Ciclo de trabajo generado por el control PI.

3.2 Etapa 2

En la figura 32 se muestra la etapa del sistema fotovoltaico aislado a simular.

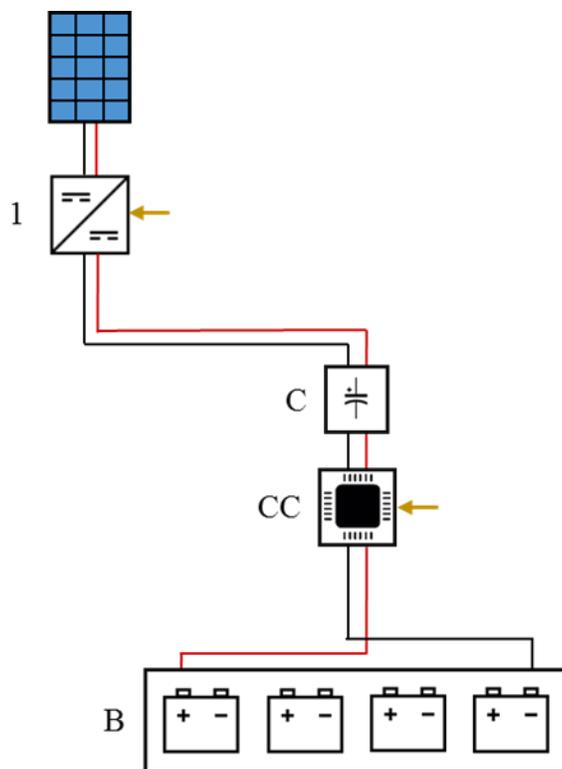


Figura 32. Diagrama de la etapa 2.

3.2.1 Requerimientos eléctricos de la casa habitación

En este apartado se aborda el tema del consumo eléctrico que presenta la casa habitación durante el día y la noche, y mismo que debe ser cubierto por el sistema fotovoltaico aislado.

Consumo diurno:

En la tabla 6 se muestran varios electrodomésticos y dispositivos electrónicos usualmente encontrados en casas habitación sencillas, por ejemplo, en zonas rurales o de difícil acceso a la energía eléctrica. Esta tabla considera el consumo eléctrico y el tiempo estimado de uso de cada aparato durante las horas de luz solar.

Posteriormente en la tabla 7 se muestran varios equipos y herramientas de trabajo también usualmente encontradas en dichas zonas.

| Equipo eléctrico | Potencia (W) | T. de uso (horas) | Consumo (Wh) |
|--|--------------|-------------------|--------------|
| Focos ahorradores (7 de 10 W c/u) | 70 | 4 | 280 |
| Licuada | 250 | 1 | 250 |
| Refrigerador (sin congelador) | 575 | 3 | 1,725 |
| Radio AM | 15 | 6 | 90 |
| TV (32") | 50 | 4 | 200 |
| Decodificador digital | 25 | 4 | 100 |
| Lavadora (6 kg) | 375 | 2 | 750 |
| Extras (cargadores, indicadores, etc.) | 15 | 6 | 90 |
| | 1,375 | | |

Tabla 6. Consumo eléctrico diurno de la casa habitación.

| Equipo eléctrico | Potencia (W) |
|----------------------------------|--------------|
| Bomba de agua para pozo (1.5 HP) | 1,100 |
| Sierra de banco | 1,000 |
| Compresor de aire (1.5 HP) | 1,200 |
| Molino eléctrico (1 HP) | 700 |
| Congelador | 600 |

Tabla 7. Consumo eléctrico de herramientas de trabajo.

Consumo nocturno:

En la tabla 8 se muestran los mismos electrodomésticos y dispositivos electrónicos de la tabla 6 pero ahora se consideran diferentes tiempos de uso de cada uno de ellos. Esta consideración se realiza en base a las horas de ausencia de luz solar (noche).

| Equipo eléctrico | Potencia (W) | T. de uso (horas) | Consumo (Wh) |
|--|--------------|-------------------|--------------|
| Focos ahorradores (7 de 10 W c/u) | 70 | 7 | 490 |
| Licuada | 250 | 1 | 250 |
| Refrigerador (sin congelador) | 575 | 2 | 1,150 |
| Radio AM | 15 | 6 | 90 |
| TV (32") | 50 | 5 | 250 |
| Decodificador digital | 25 | 5 | 125 |
| Lavadora (6 kg) | 375 | 1 | 375 |
| Extras (cargadores, indicadores, etc.) | 15 | 3 | 45 |
| | | | 2,775 |

Tabla 8. Consumo eléctrico nocturno de la casa habitación.

3.2.2 Banco de baterías

La selección de las baterías a utilizar se basa en: 1) los tipos más comúnmente empleados en sistemas fotovoltaicos, y 2) la facilidad de adquisición de las mismas en la ciudad de Cuernavaca.

Las características de las baterías son las siguientes:

- Tipo: plomo-ácido.
- Tensión nominal: 12 V.
- Capacidad: 185 Ah.
- Potencia almacenada: 2,220 Wh.

3.2.2.1 Dimensionamiento

El dimensionamiento del banco de baterías se basa principalmente en el consumo eléctrico promedio que presenta la casa habitación durante la noche. Este consumo se ejemplifica en el apartado 3.2.1 y en particular en la tabla 8 donde se observa que la energía usada durante la noche es de 2,775 Wh.

A partir del consumo eléctrico nocturno diario se establece que el sistema fotovoltaico aislado pueda contar con un respaldo energético extra para otros dos días más de funcionamiento sin necesidad de recargar el banco de baterías. Con esto, se tiene la energía suficiente para operar durante tres noches consecutivas de manera ininterrumpida.

Se sabe que el banco de baterías puede llegar a quedar completamente descargado por lo que es necesario utilizar las baterías apropiadas para este evento y que además cumplan con la capacidad energética requerida. Por ello, se seleccionan baterías del tipo plomo - ácido de ciclo profundo ya que permiten ser descargadas por completo sin sufrir daños o alteraciones a los componentes de la misma. La capacidad de las baterías seleccionadas es de 2,220 Wh y su tensión eléctrica de funcionamiento es de 12 V por lo que es necesario añadir tres baterías más para cubrir la demanda energética establecida con anterioridad y al mismo tiempo elevar la tensión eléctrica a 48 V (la capacidad total del banco de baterías asciende a 8,880 Wh).

3.2.2.2 Recarga controlada

El diseño del sistema fotovoltaico aislado contempla la inclusión de un circuito integrado (modelo LTC4020) como elemento de control y gestión de la recarga del banco de baterías [17-18].

Dicho circuito integrado se contempla que opere en modo de control de tensión ya que la misma es regulada desde los convertidores *boost* y debido a la naturaleza misma del sistema

se sabe que la corriente máxima aumenta o disminuye de manera paulatina en el transcurso del día.

En la figura 33 se muestra el diagrama eléctrico del circuito encargado de recargar el banco de baterías. El mismo se denomina “CC” en el diagrama mostrado en la figura 1.

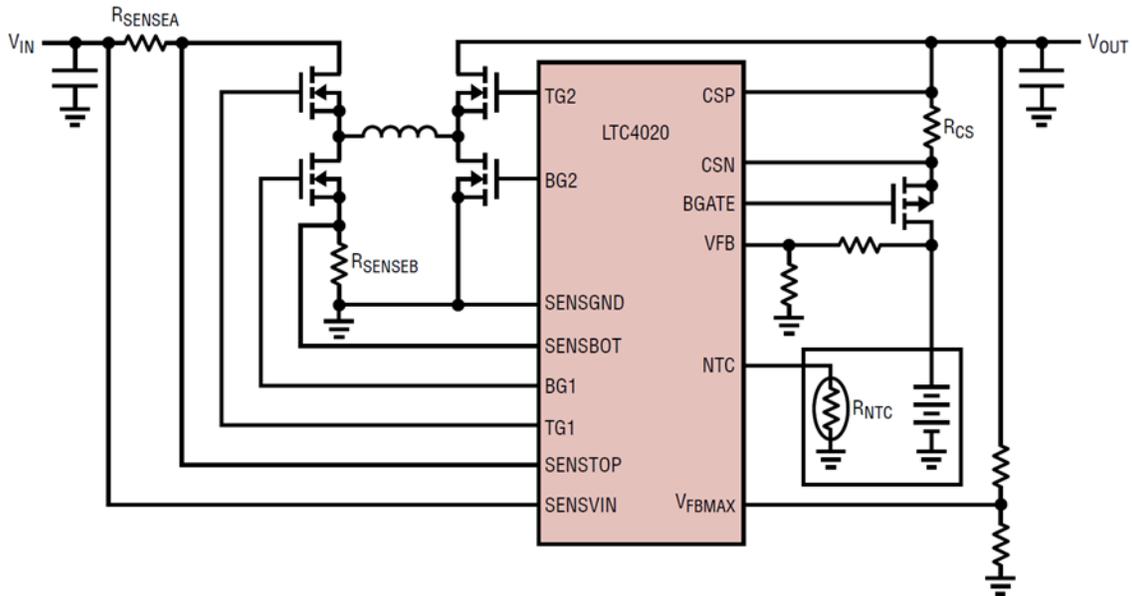


Figura 33. Diagrama eléctrico en conjunto con el circuito integrado LTC4020.

3.2.2.3 Perfiles de descarga

Una de las pruebas realizadas consiste en someter a una batería de las características seleccionadas a una descarga constante para verificar y analizar el comportamiento de la misma durante el intervalo de tiempo que permanece cargada. En la figura 34 se muestra el comportamiento de la batería frente a diferentes corrientes constantes de descarga, las cuales son (de izquierda a derecha): 185, 92.5, 61.66, 37, 18.5, 12.33 y 9.25 A.

Para generar los resultados de la figura 34 se utiliza un modelo eléctrico similar al de la figura 9. Las condiciones de prueba de la simulación son:

- Simular una única batería de las características mencionadas (12 V y 185 Ah).
- Temperatura ambiente: 25° C.
- Simulación en descarga constante (carga fija).
- Implementación del modelo eléctrico genérico (de *Simulink*) de una batería de plomo-ácido (fuente de tensión ideal: 12 V / resistencia en serie: 0.065 Ω).

Si se asigna la tensión de corte de la batería en 10 V, entonces se puede observar en la segunda gráfica (simulación) de la figura 34 que existe un rendimiento ligeramente inferior en relación al rendimiento teórico de funcionamiento que se muestra en la primera gráfica de la misma figura. El rendimiento obtenido en simulación es aceptable y se desarrollan todas las pruebas siguientes con este mismo modelo.

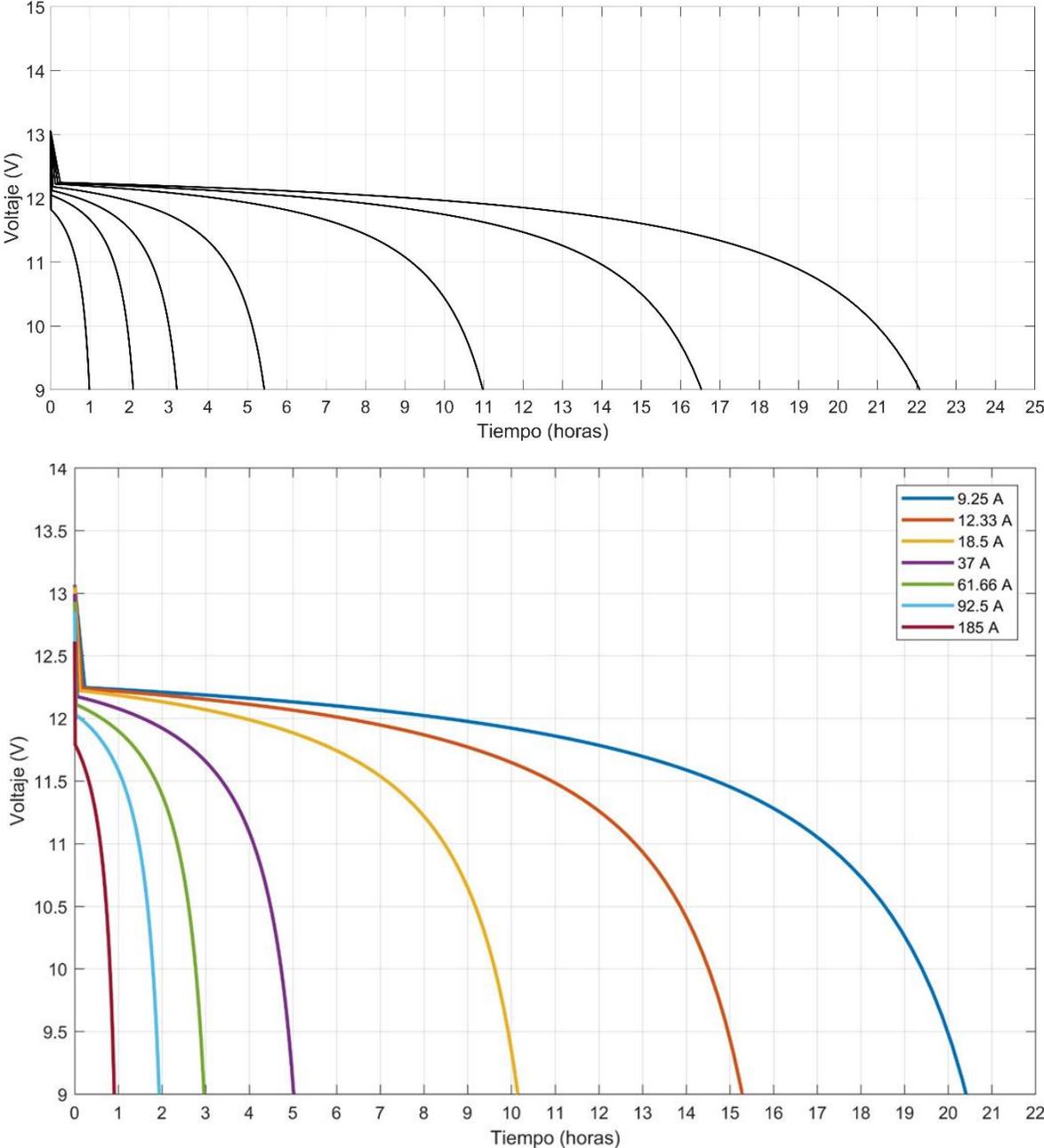


Figura 34. Comportamiento teórico y en simulación de la batería seleccionada.

3.2.3 Niveles de irradiancia en la localidad seleccionada

El diseño del sistema fotovoltaico aislado contempla una etapa de respaldo mediante baterías en conjunto con un sistema de gestión de energía que permite operar de manera automatizada y sin interrupciones durante el día y la noche.

La localidad seleccionada para instalar (teóricamente) el sistema fotovoltaico aislado es el Centro de Investigación y Desarrollo Tecnológico (CENIDET). La ubicación exacta de dicho sitio se investiga en La Administración Nacional de la Aeronáutica y del Espacio [19], mejor conocida como NASA (por sus siglas en inglés). Las coordenadas geográficas son las siguientes:

Latitud: 18.8764 / Longitud: -99.2198 / Elevación: 1,352 msnm

Tras obtener las coordenadas geográficas del CENIDET se investiga en la misma fuente el promedio mensual de irradiancia solar incidente en ese punto, ver tabla 9.

| Promediado Mensual de la Irradiancia (kW/m ²) Incidente en una Superficie Horizontal en las Horas Indicadas (GMT-06:00) | | | | | | | | | | | | |
|---|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|
| Lat 18.876 / Lon -99.22 | Ene | Feb | Mar | Abr | May | Jun | Jul | Ago | Sep | Oct | Nov | Dic |
| 0:00:00 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| 3:00:00 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| 6:00:00 | 0 | 0 | 0.01 | 0.02 | 0.03 | 0.03 | 0.02 | 0.02 | 0.01 | 0.01 | 0.01 | 0 |
| 9:00:00 | 0.31 | 0.37 | 0.46 | 0.52 | 0.5 | 0.43 | 0.43 | 0.43 | 0.4 | 0.42 | 0.39 | 0.33 |
| 12:00:00 | 0.73 | 0.81 | 0.91 | 0.91 | 0.86 | 0.74 | 0.78 | 0.76 | 0.71 | 0.73 | 0.74 | 0.7 |
| 15:00:00 | 0.56 | 0.67 | 0.74 | 0.71 | 0.65 | 0.62 | 0.66 | 0.61 | 0.55 | 0.52 | 0.51 | 0.51 |
| 18:00:00 | 0.07 | 0.11 | 0.13 | 0.12 | 0.12 | 0.13 | 0.14 | 0.12 | 0.08 | 0.05 | 0.04 | 0.04 |
| 21:00:00 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |

Tabla 9. Promediado mensual de la irradiancia solar incidente en CENIDET.

Las casillas en color verde suponen el valor máximo de irradiancia presente en todo el año en las horas indicadas. Mientras que las casillas en color rojo suponen el mínimo.

A partir de la tabla 9 se realiza una cuantificación de la energía solar disponible durante todo un día considerando los valores promedio mínimos de irradiancia para garantizar el rendimiento óptimo del sistema fotovoltaico aislado.

Se toma en cuenta la salida del sol a las 06:47 a.m. y la puesta del mismo a las 06:45 p.m., y se establece en 200 W/m² el nivel mínimo de irradiancia solar presente para que el sistema fotovoltaico aislado mantenga activos los paneles fotovoltaicos (para el nivel establecido se toma en cuenta la trayectoria del sol durante el día, así como la orografía de la ubicación seleccionada y los elementos físicos circundantes).

En la figura 35 se muestran los niveles promedio anuales máximos y mínimos de irradiancia solar presentes en el CENIDET. Si se considera el límite establecido en 200 W/m^2 se observa que existe un periodo de tiempo de al menos nueve horas consecutivas durante el día en las cuales el nivel de irradiancia es superior al límite establecido.

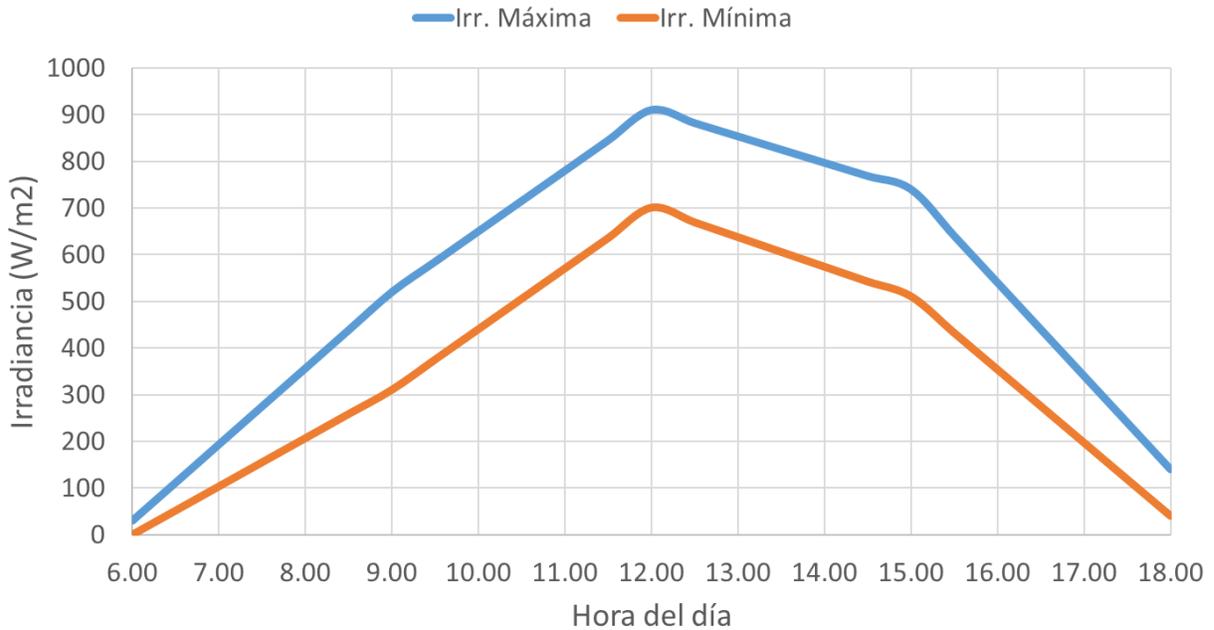


Figura 35. Niveles promedio anuales de la irradiancia máxima y mínima.

Se investiga también en la NASA el número de horas de luz solar que hay durante el día y se encuentra que la duración varía dependiendo de la estación del año. Por ejemplo, en el mes de diciembre se cuenta con un promedio de 11 horas de luz solar en el día mientras que en el mes de junio se tienen 13.2 horas, ver tabla 10.

| Promediado Mensual de Horas de Luz Solar por Día (horas) | | | | | | | | | | | | |
|--|------|------|-----|------|-----|------|------|------|------|------|------|-----|
| Lat 18.876 / Lon -99.22 | Ene | Feb | Mar | Abr | May | Jun | Jul | Ago | Sep | Oct | Nov | Dic |
| Horas | 11.1 | 11.5 | 12 | 12.5 | 13 | 13.2 | 13.1 | 12.7 | 12.2 | 11.7 | 11.2 | 11 |

Tabla 10. Promediado mensual de horas de luz solar por día.

3.2.4 Simulación en Simulink

En la figura 36 se muestra el circuito eléctrico correspondiente a la etapa 2. El controlador de recarga (CC) del banco de baterías no se muestra en los diagramas de simulación ya que está dentro del modelo de las baterías.

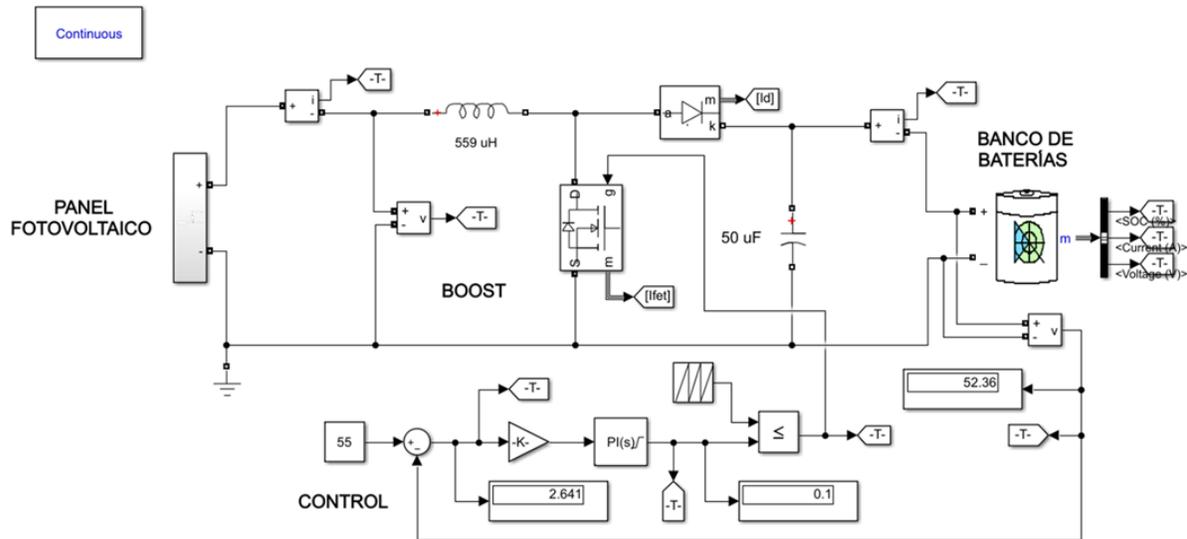


Figura 36. Circuito eléctrico de la etapa 2.

En la figura 37 se muestra el nivel de irradiancia promedio mínimo anual para la ubicación seleccionada con anterioridad. Luego, en la figura 38 se muestra el nivel de carga que el banco de baterías puede alcanzar en todo un día con los niveles de irradiancia de la figura 37.

En el apartado 3.2.2.1 se realiza el dimensionamiento del banco de baterías y de acuerdo al consumo eléctrico nocturno se sabe que el banco de baterías disminuye aproximadamente un 30% de su nivel de carga en una noche de uso normal.

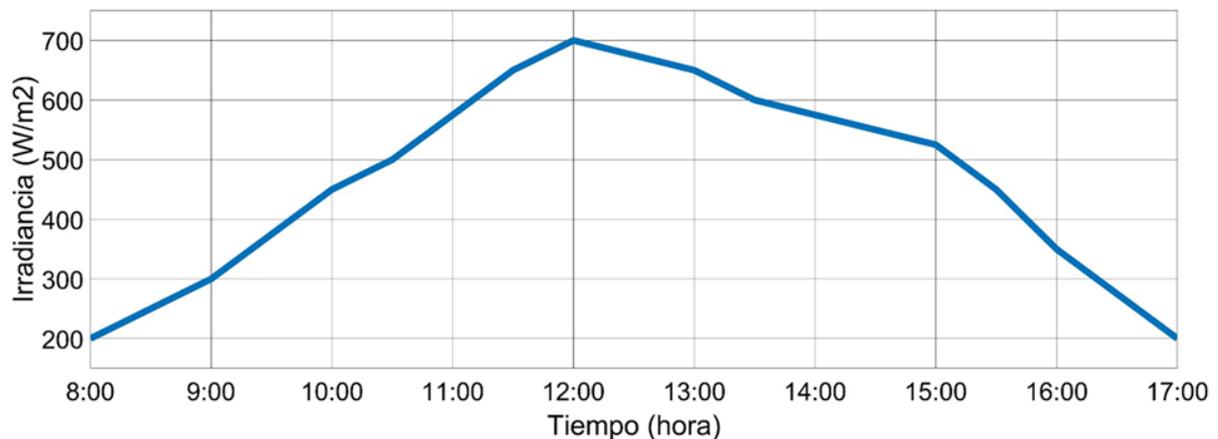


Figura 37. Irradiancia promedio mínima anual.

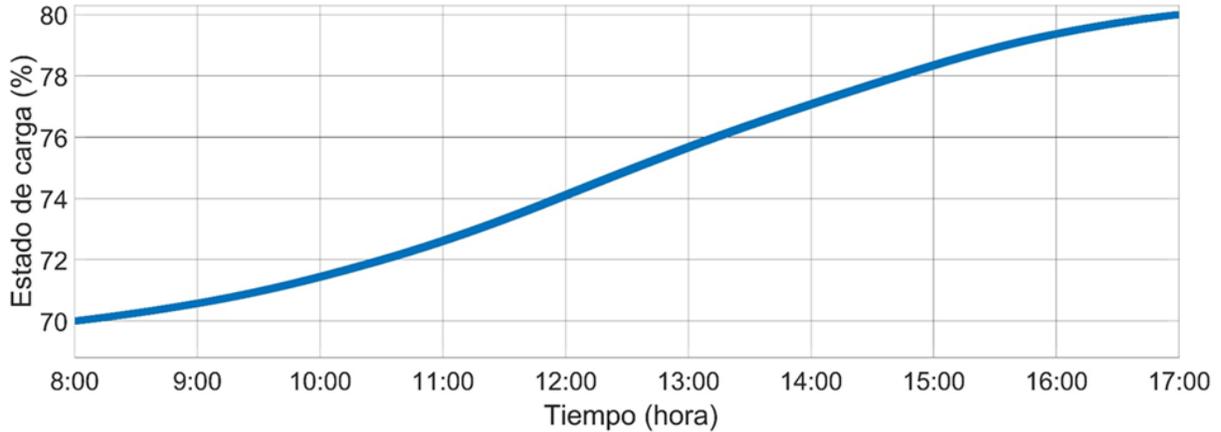


Figura 38. Nivel de carga del banco de baterías.

En la figura 39 se muestra el nivel de corriente admitido por el banco de baterías al ser recargado.

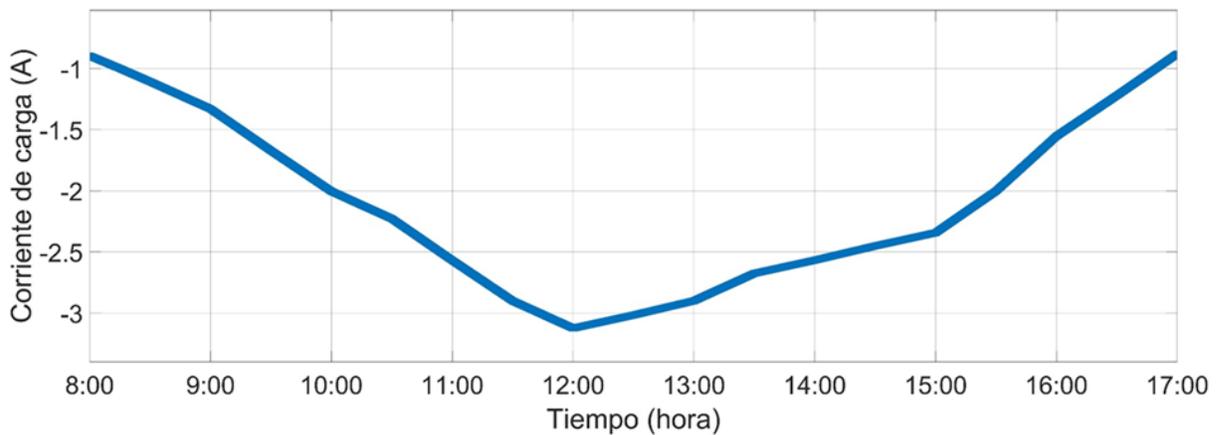


Figura 39. Corriente de carga del banco de baterías.

En la figura 40 se muestra el nivel de irradiancia promedio máximo anual para la ubicación seleccionada con anterioridad. Luego, en la figura 41 se muestra el nivel de carga que el banco de baterías puede alcanzar en todo un día con los niveles de irradiancia de la figura 40.

Posteriormente en la figura 42 se muestra el nivel de corriente admitido por el banco de baterías al ser recargado.

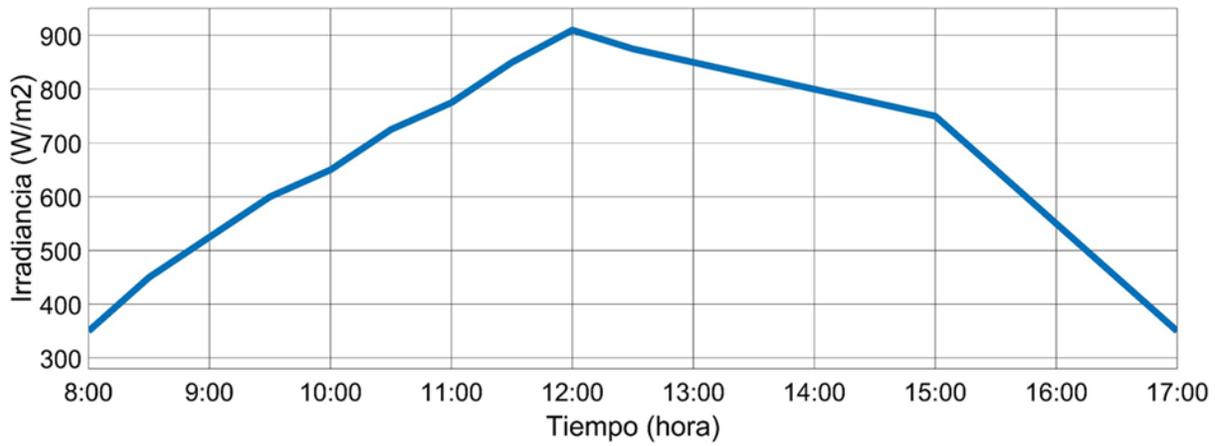


Figura 40. Irradiancia promedio máxima anual.

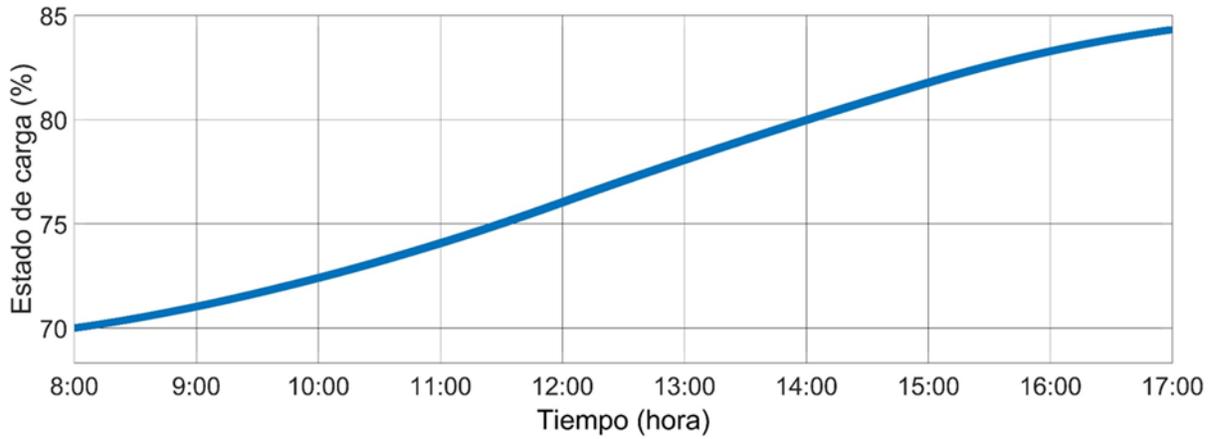


Figura 41. Nivel de carga del banco de baterías.

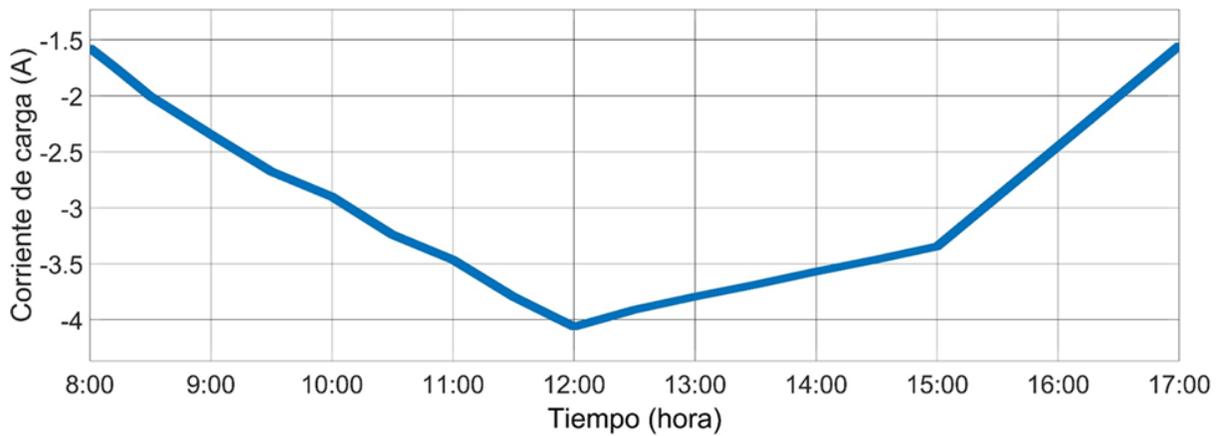


Figura 42. Corriente de carga del banco de baterías.

Es importante aclarar que en este apartado (3.2.4) las simulaciones que se presentan son pruebas que se basan en la recarga del banco de baterías a partir de un solo panel fotovoltaico y, tomando en cuenta los niveles de irradiancia reales presentes en la localidad establecida.

En el anexo 1 se muestran las pruebas realizadas utilizando dos y tres paneles fotovoltaicos para la recarga del banco de baterías. Ver anexo 1.

Las simulaciones realizadas en este apartado y en el anexo 1 sirven como fundamento para establecer la disposición final de los paneles fotovoltaicos encargados de recargar el banco de baterías. Dicha disposición queda como se muestra en la figura 43.

El nivel mínimo de carga que debe tener el banco de baterías para no sufrir daños es del 5% (según el fabricante, este valor puede aumentar o disminuir).

Se le recuerda al lector que a pesar de que los paneles pueden proporcionar hasta 8.4 A en el punto de máxima potencia (ver tabla 5), es necesario elevar la tensión de salida entregada por los mismos para poder conectarlos al cargador de baterías (LTC4020). Por consiguiente, la corriente máxima disponible en cada rama disminuye (cada una comprendida por un único panel fotovoltaico).

3.3.1 Simulación en *Simulink*

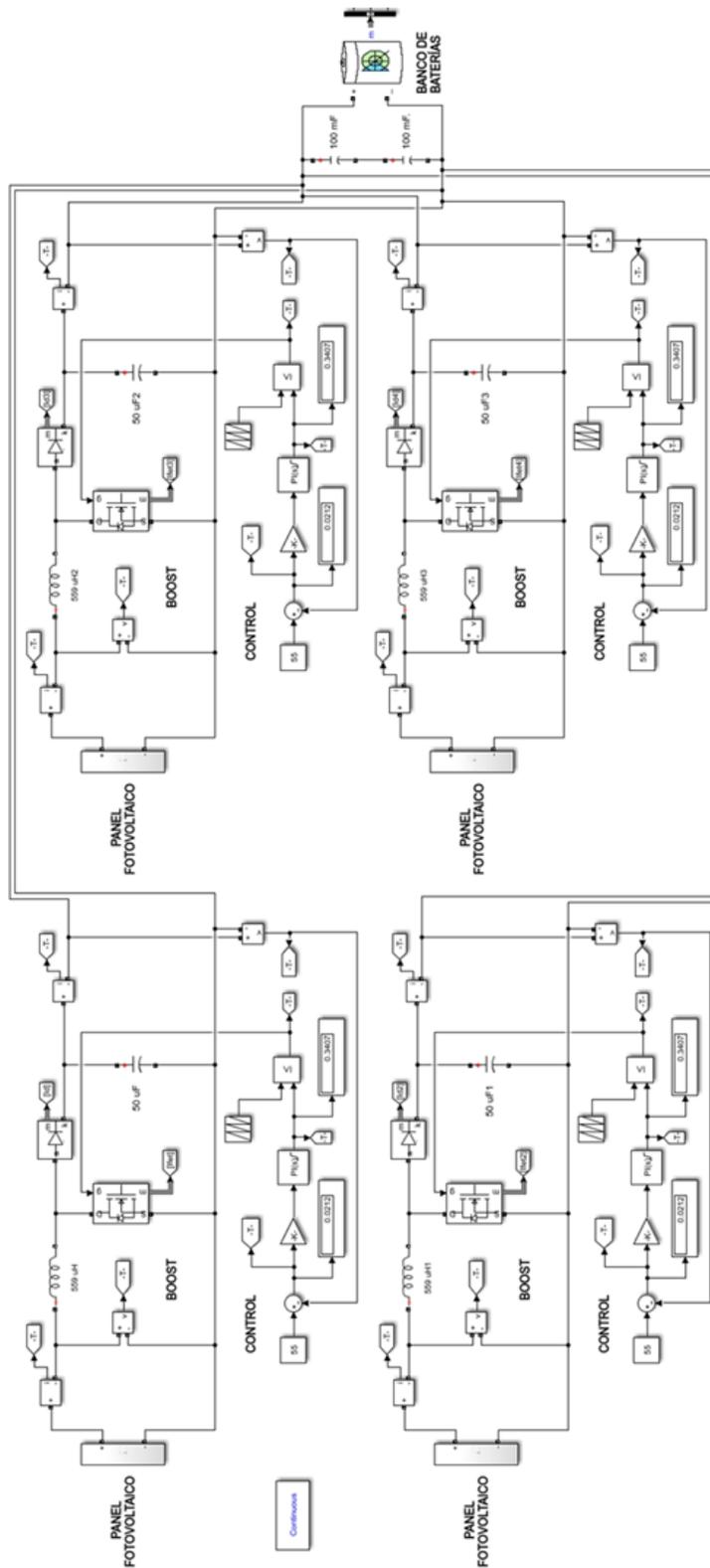


Figura 44. Circuito eléctrico de la etapa 3.

En la figura 45 se muestra el nivel de irradiancia promedio mínima anual para la ubicación seleccionada con anterioridad. Luego, en la figura 46 se muestra el nivel de carga que el banco de baterías puede alcanzar en todo un día con los niveles de irradiancia de la figura 45.

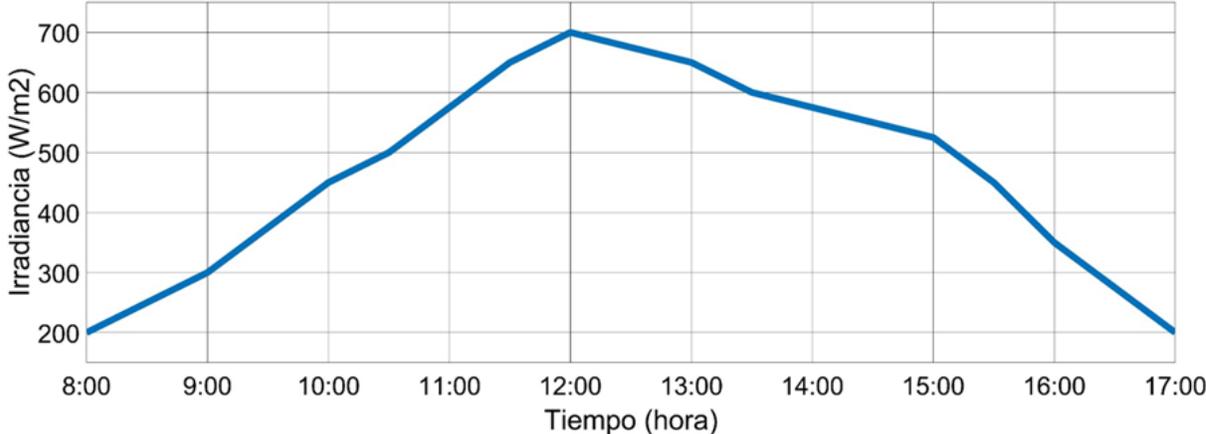


Figura 45. Irradiancia promedio mínima anual.

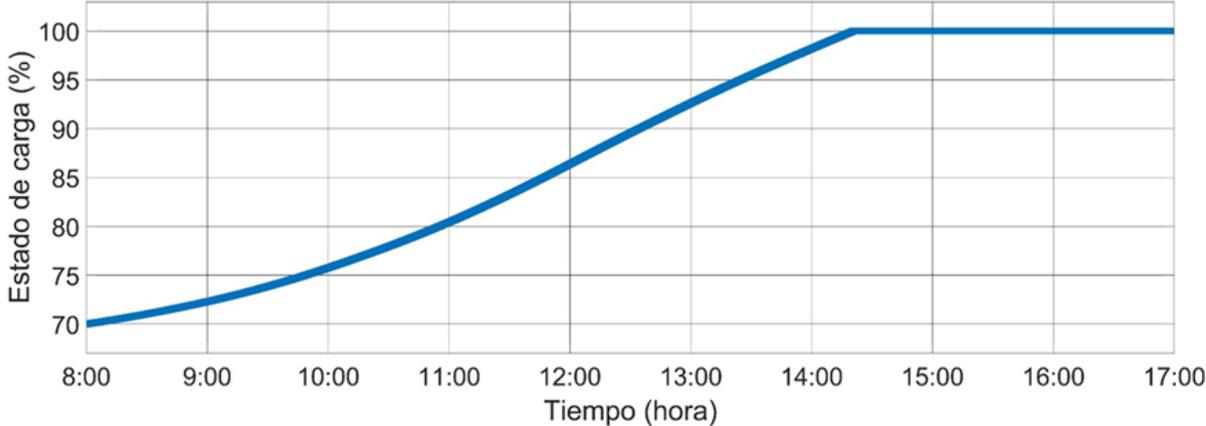


Figura 46. Nivel de carga del banco de baterías.

En la figura 47 se muestra el nivel de corriente admitido por el banco de baterías al ser recargado.

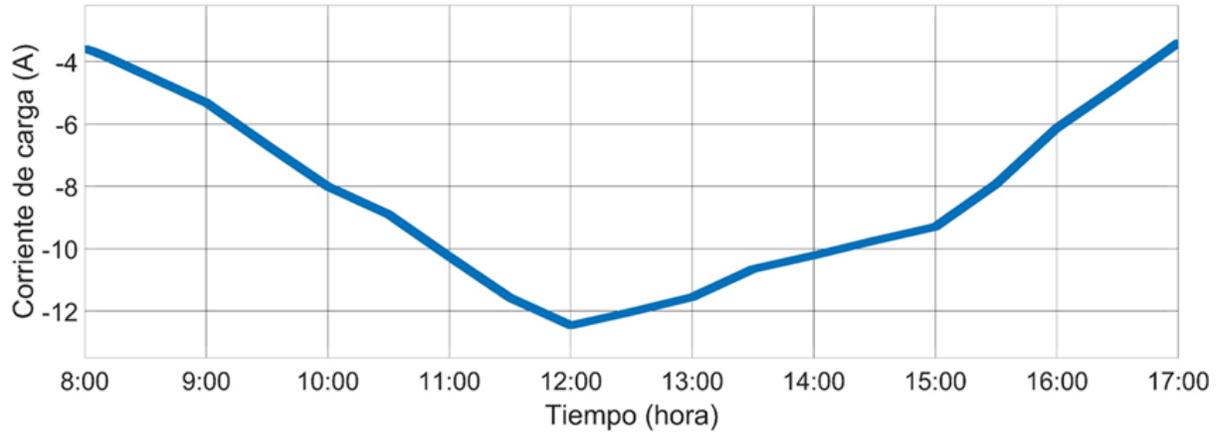


Figura 47. Corriente de carga del banco de baterías.

En la figura 48 se muestra el nivel de irradiancia promedio máximo anual para la ubicación seleccionada con anterioridad. Luego, en la figura 49 se muestra el nivel de carga que el banco de baterías puede alcanzar en todo un día con los niveles de irradiancia de la figura 48.

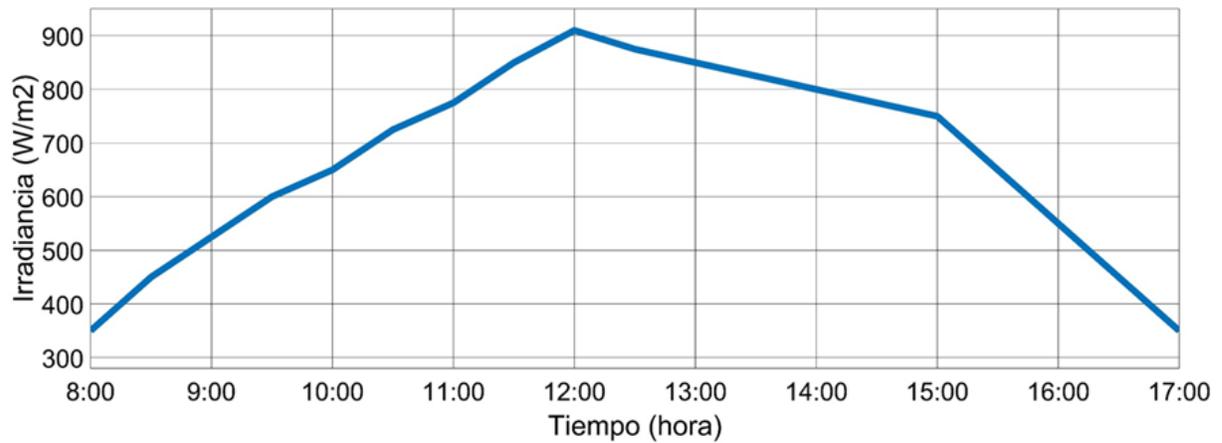


Figura 48. Irradiancia promedio máxima anual.

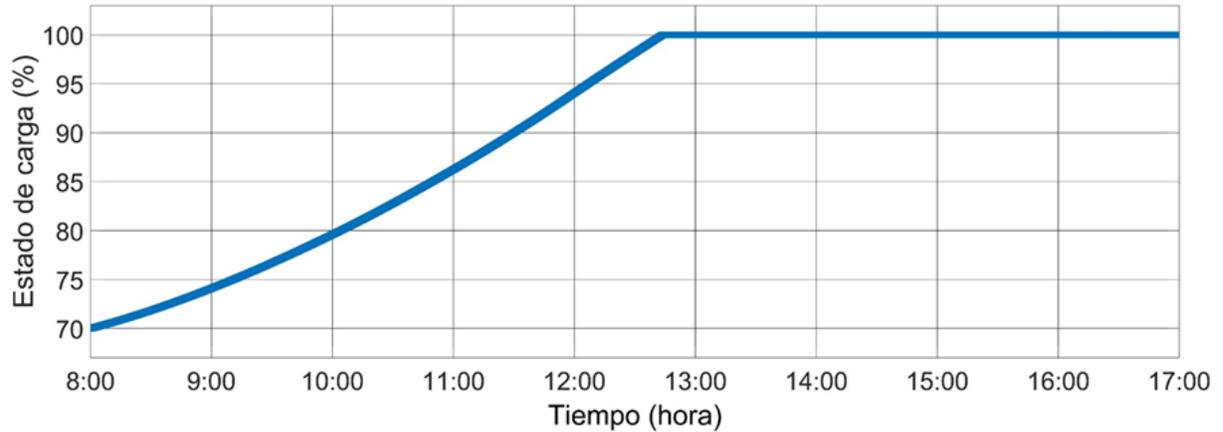


Figura 49. Nivel de carga del banco de baterías.

En la figura 50 se muestra el nivel de corriente admitido por el banco de baterías al ser recargado.

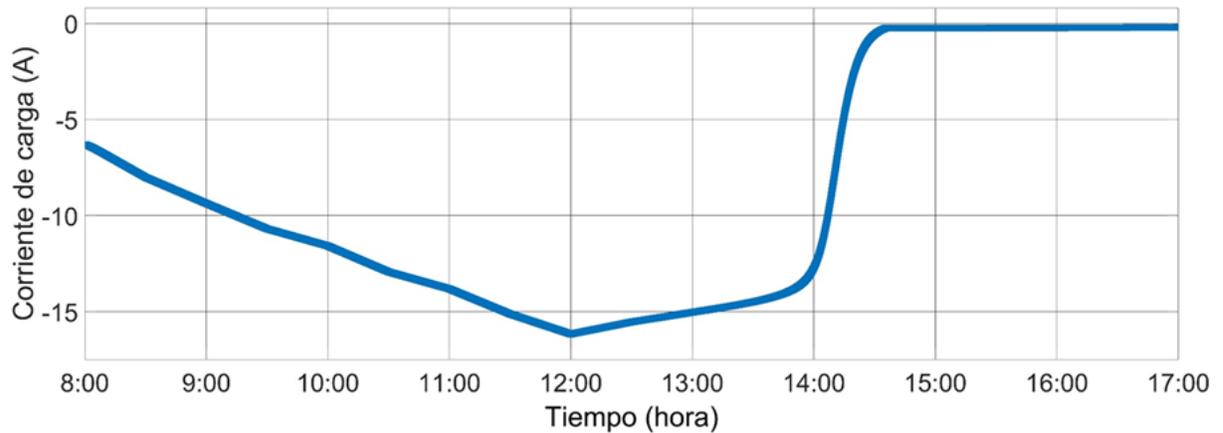


Figura 50. Corriente de carga del banco de baterías.

Las simulaciones realizadas en este apartado (3.3.1) validan el buen desempeño de la configuración establecida de paneles fotovoltaicos. Las gráficas de las figuras 46 y 49 demuestran que el banco de baterías se recarga en su totalidad al día siguiente después de una noche de uso normal (el banco de baterías inicia su recarga a partir del 70% de su capacidad de acuerdo a lo establecido en el apartado 3.2.2.1).

3.4 Etapa 4

En la figura 51 se muestra la etapa del sistema fotovoltaico aislado a simular.

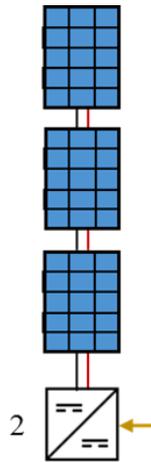


Figura 51. Diagrama de la etapa 4.

3.4.1 Especificaciones de diseño del convertidor *boost* #2

Posteriormente se diseña el segundo modelo de los convertidores *boost* propuestos y los cálculos realizados para el diseño del mismo son los siguientes:

$$V_{in} = 94.2 V$$

$$V_o = 180 V$$

$$P_o = 795 W$$

$$f = 25 \cdot 10^3 \text{ Hz}$$

$$\Delta V_c = 3\% \cdot V_o = 5.4 V$$

$$\Delta i_L = (V_{in}/L) \cdot t_{on} = 0.883 A$$

$$I_o:$$

$$R = \frac{V_o^2}{P_o} = 40.75 \Omega$$

$$I_o = \frac{V_o}{R} = 4.42 A$$

$$D = 1 - \frac{V_{in}}{V_o} = 0.48$$

Inductor:

$$L = \frac{V_{in} \cdot D}{\Delta i_L \cdot f} = (2.03 \cdot 10^{-3}) H$$

Capacitor:

$$C = \frac{D \cdot I_o}{\Delta V_c \cdot f} = (15.59 \cdot 10^{-6}) F$$

Para el diseño de este convertidor se propone un rizo de corriente en el inductor de 0.88 A que corresponde a un 20% de la corriente de salida. Este valor puede ser mayor o menor, pero es indispensable proponerlo, o en su defecto, proponer un valor de inductor y después calcular el rizo de corriente que se tiene.

La potencia de funcionamiento asignada para este segundo convertidor es de 795 W ya que es la potencia máxima que puede entregar una cadena fotovoltaica comprendida por tres paneles fotovoltaicos del modelo seleccionado.

3.4.2 Lazo de control PI

Ganancias para el convertidor *boost* #2:

| K_p | K_i |
|---------|---------|
| 0.42654 | 1.97102 |

Estas ganancias han sido calculadas mediante la herramienta de ajuste y estabilidad dentro del bloque PI y permiten que el convertidor sea estable.

3.4.3 Simulación en *Simetrix*

En la figura 52 se muestra el circuito eléctrico correspondiente al convertidor *boost* #2 y en la figura 53 se muestran los resultados de simulación. Se le recuerda al lector que la tensión de salida de este convertidor se establece así para obtener 127 V_{RMS} en la casa habitación.

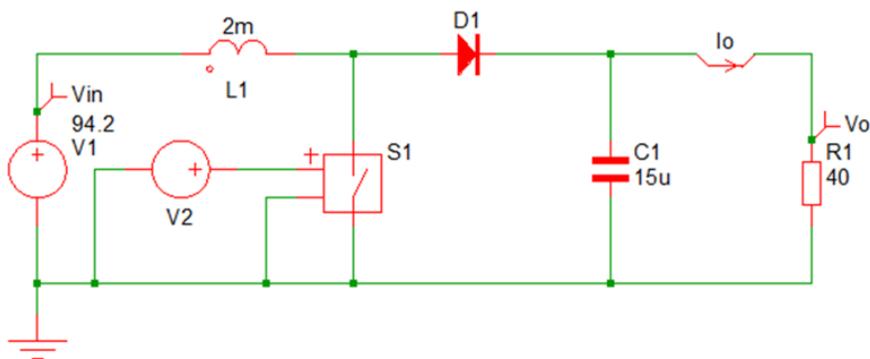


Figura 52. Circuito eléctrico del convertidor *boost* #2.

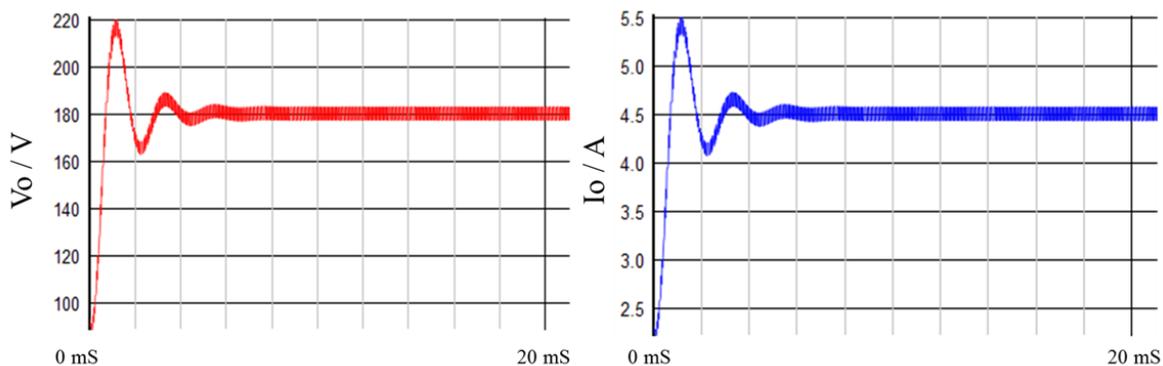


Figura 53. Formas de onda de la tensión de salida (V_o : 180.08 V) junto con la corriente de salida (I_o : 4.50 A).

3.4.4 Simulación en *Simulink*

En la figura 54 se muestra el circuito eléctrico correspondiente a la etapa 4 implementado en la interfaz de *MATLAB – Simulink*.

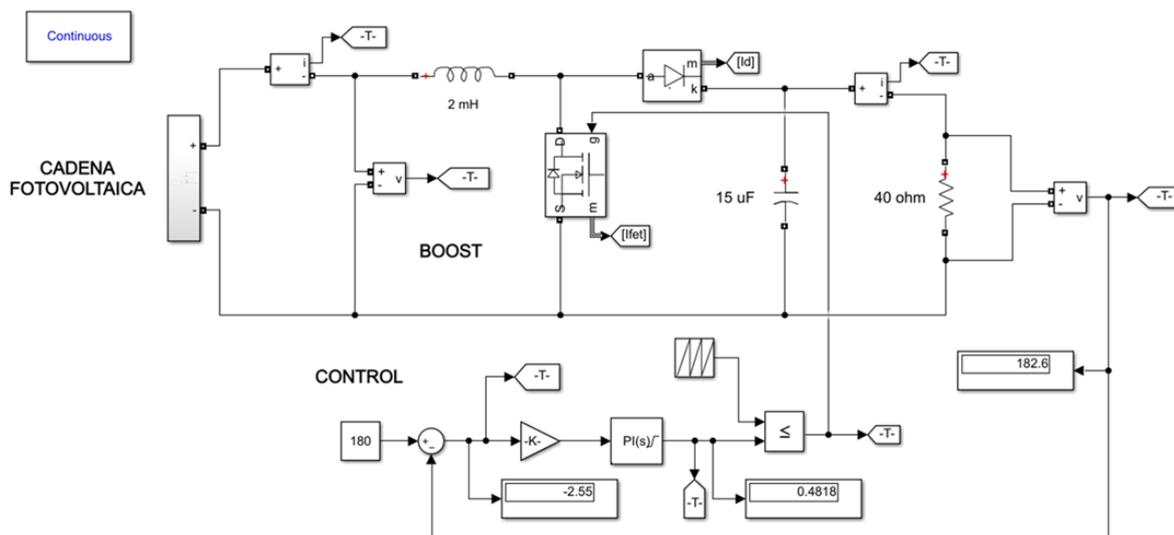


Figura 54. Circuito eléctrico de la etapa 4.

En la figura 55 se muestran las variaciones de tensión en la cadena fotovoltaica debidas al aumento o disminución de la temperatura en la misma. Esta tensión es la que “recibe” como entrada el convertidor *boost #2*.

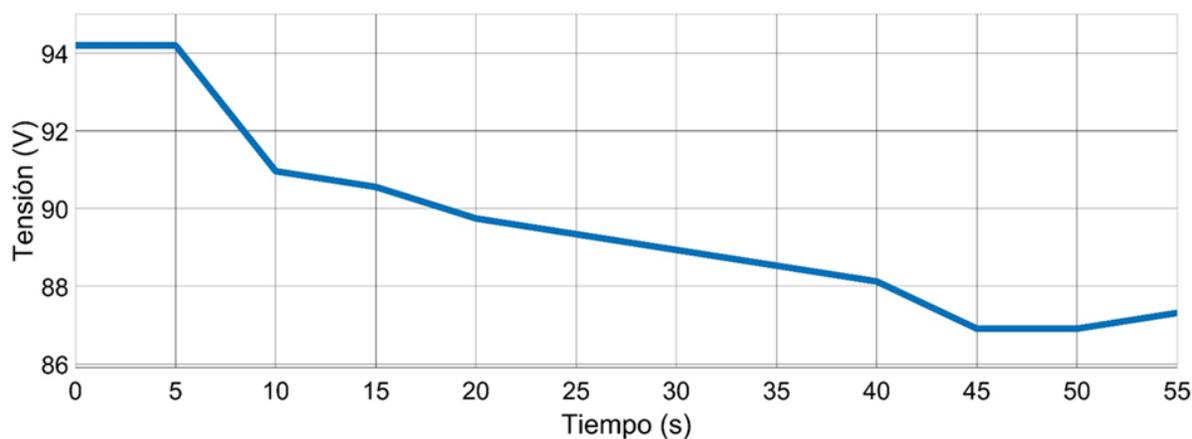


Figura 55. Variaciones de tensión en la cadena fotovoltaica.

En la figura 56 se muestra la señal de tensión regulada entregada por el convertidor *boost #2* y en la figura 57 se muestra la forma de onda de la misma señal.

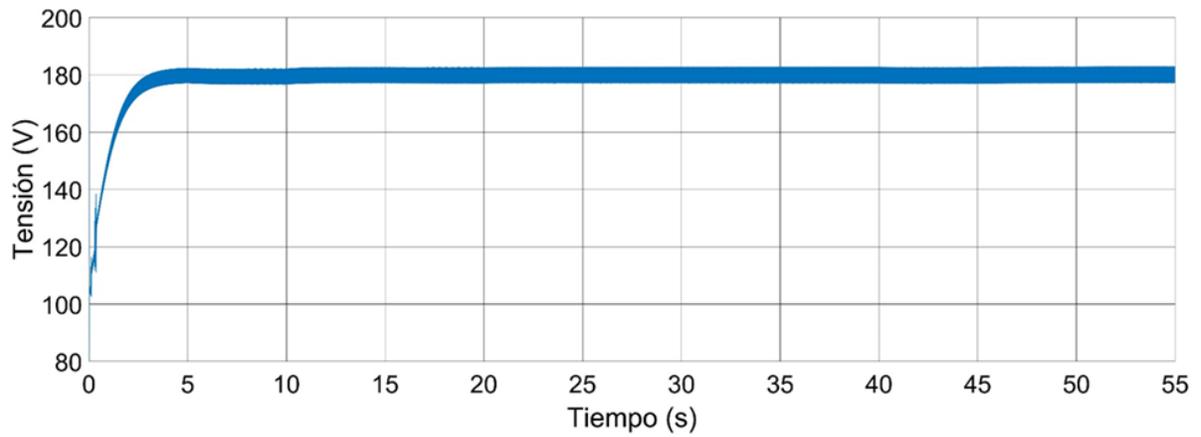


Figura 56. Tensión entregada por el convertidor *boost* #2.

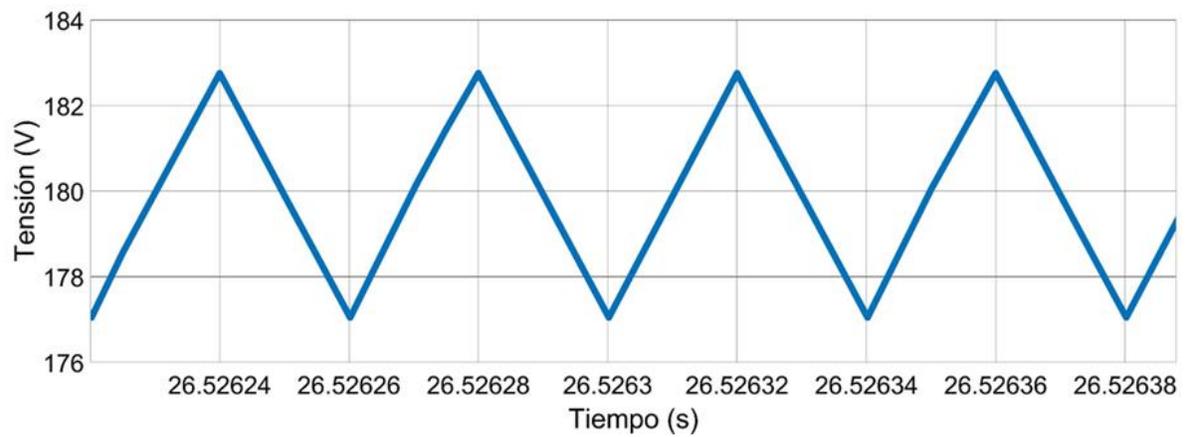


Figura 57. Forma de onda de la tensión entregada por el convertidor *boost* #2.

En la figura 58 se muestra la forma de onda del *PWM* utilizado para controlar el *MOSFET* del convertidor *boost* #2.

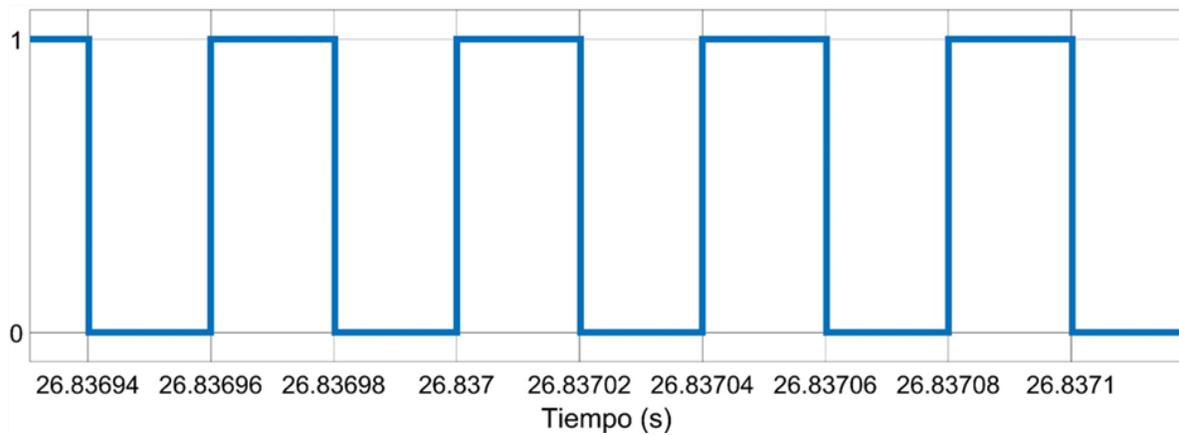


Figura 58. Forma de onda del *PWM* utilizado en el convertidor *boost* #2 ($F = 25$ kHz).

En la figura 59 se muestra la desviación que presenta la señal de salida de tensión del convertidor *boost* #2 con respecto a la señal de referencia (180 V).

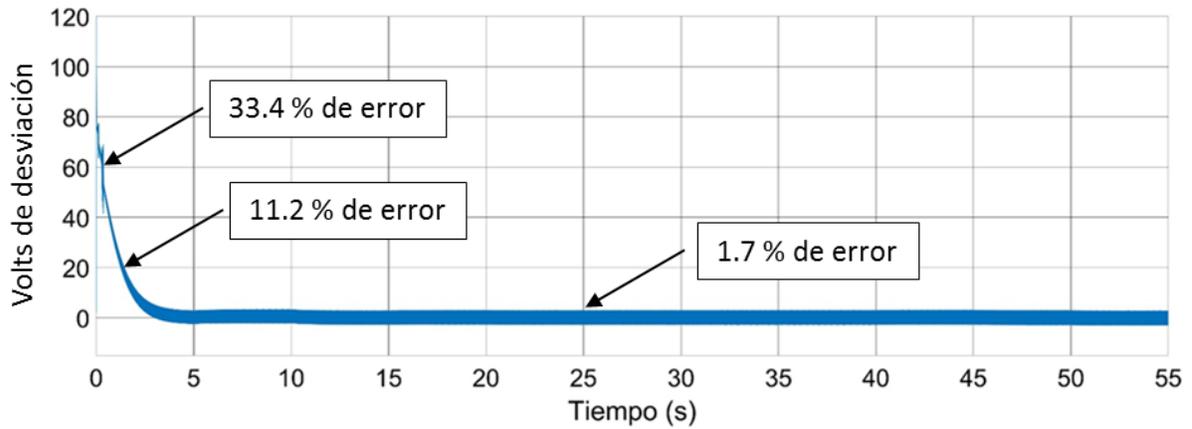


Figura 59. Señal de error que recibe el control PI.

En la figura 60 se muestra la compensación que realiza el control PI para mantener el error cercano a cero (dicha compensación se refiere al ciclo de trabajo).

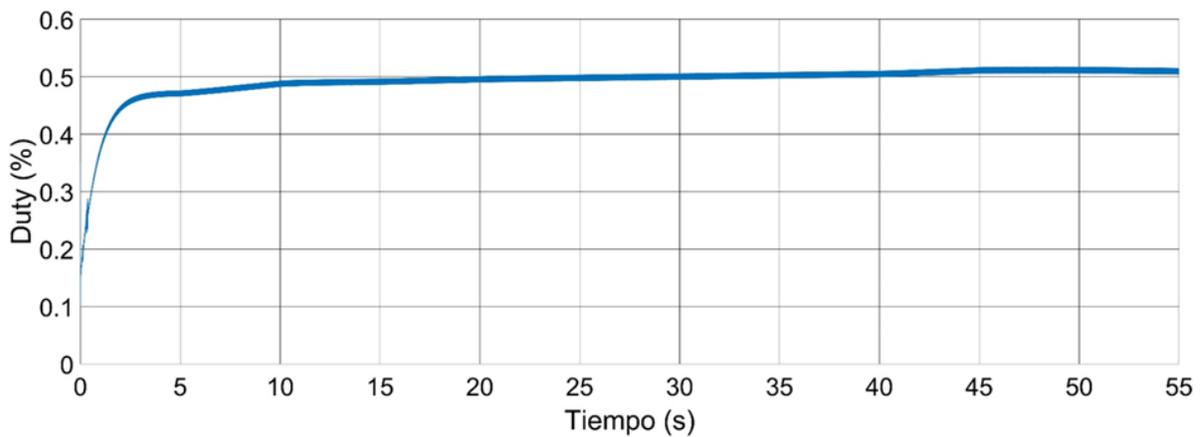


Figura 60. Ciclo de trabajo generado por el control PI.

3.5 Etapa 5

En la figura 61 se muestra la etapa del sistema fotovoltaico aislado a simular y en la figura 63 se muestra el circuito eléctrico correspondiente a esta etapa.

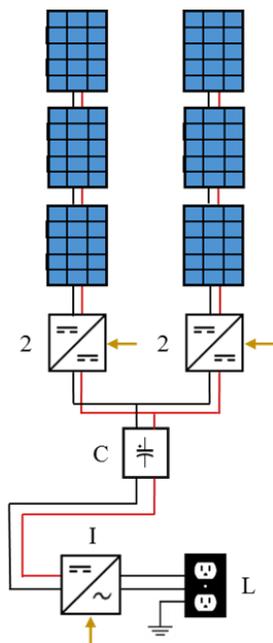


Figura 61. Diagrama de la etapa 5.

Para el desarrollo de esta etapa es necesario implementar un inversor monofásico ya que éste dispositivo permite la operación de aparatos eléctricos que funcionen con corriente alterna (60 Hz). La topología seleccionada es un puente completo convencional.

Las características del inversor monofásico son las siguientes:

- Tipo de modulación: *SPWM* unipolar.
- Índice de modulación: 0.8
- Tensión de entrada: 180 V_{CD} .
- Tensión de salida: 127 V_{RMS} .
- Tipo de interruptor: *MOSFET*.

$$V_{rms} = V_{pico} * \frac{1}{\sqrt{2}}$$

3.5.1 Inversor monofásico a implementar

Un inversor es un dispositivo eléctrico que transforma una tensión de entrada de corriente continua a una tensión simétrica de salida (senoidal, cuadrada o triangular) de corriente alterna, con una magnitud y frecuencia establecidas.

En general, los inversores se pueden clasificar en dos tipos:

- Inversores monofásicos.
- Inversores polifásicos.

La configuración seleccionada para implementar en las simulaciones es un puente completo convencional el cual invierte el sentido de la corriente en la carga mediante cuatro interruptores de potencia (*MOSFET*), los cuales trabajan en base a patrones de conmutación establecidos. En esta configuración siempre hay dos interruptores trabajando [20]. La selección de esta topología se basa en la sencillez de su control y su alta eficiencia.

En la figura 62 se muestra el diagrama eléctrico del inversor monofásico seleccionado.

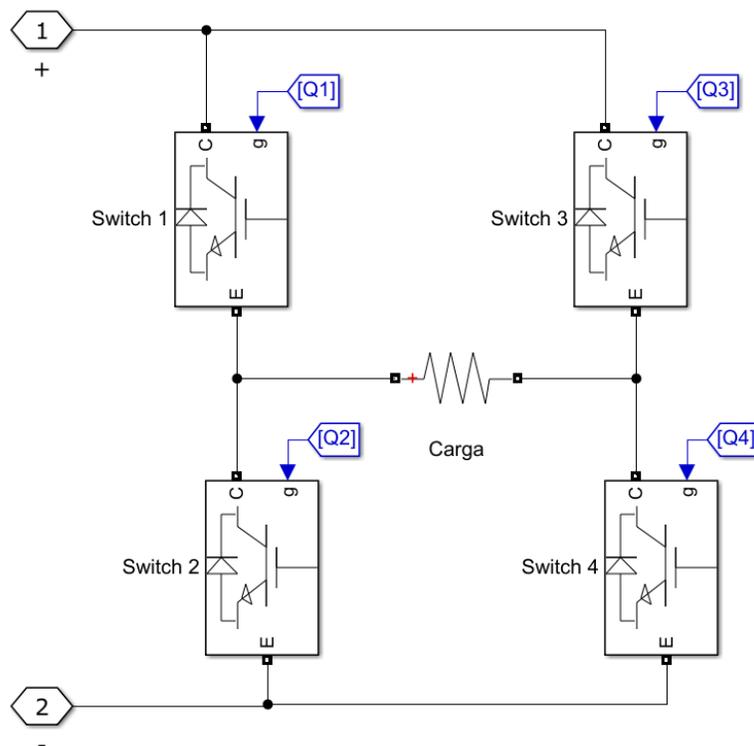


Figura 62. Inversor monofásico puente completo convencional.

3.5.2 Simulación en Simulink

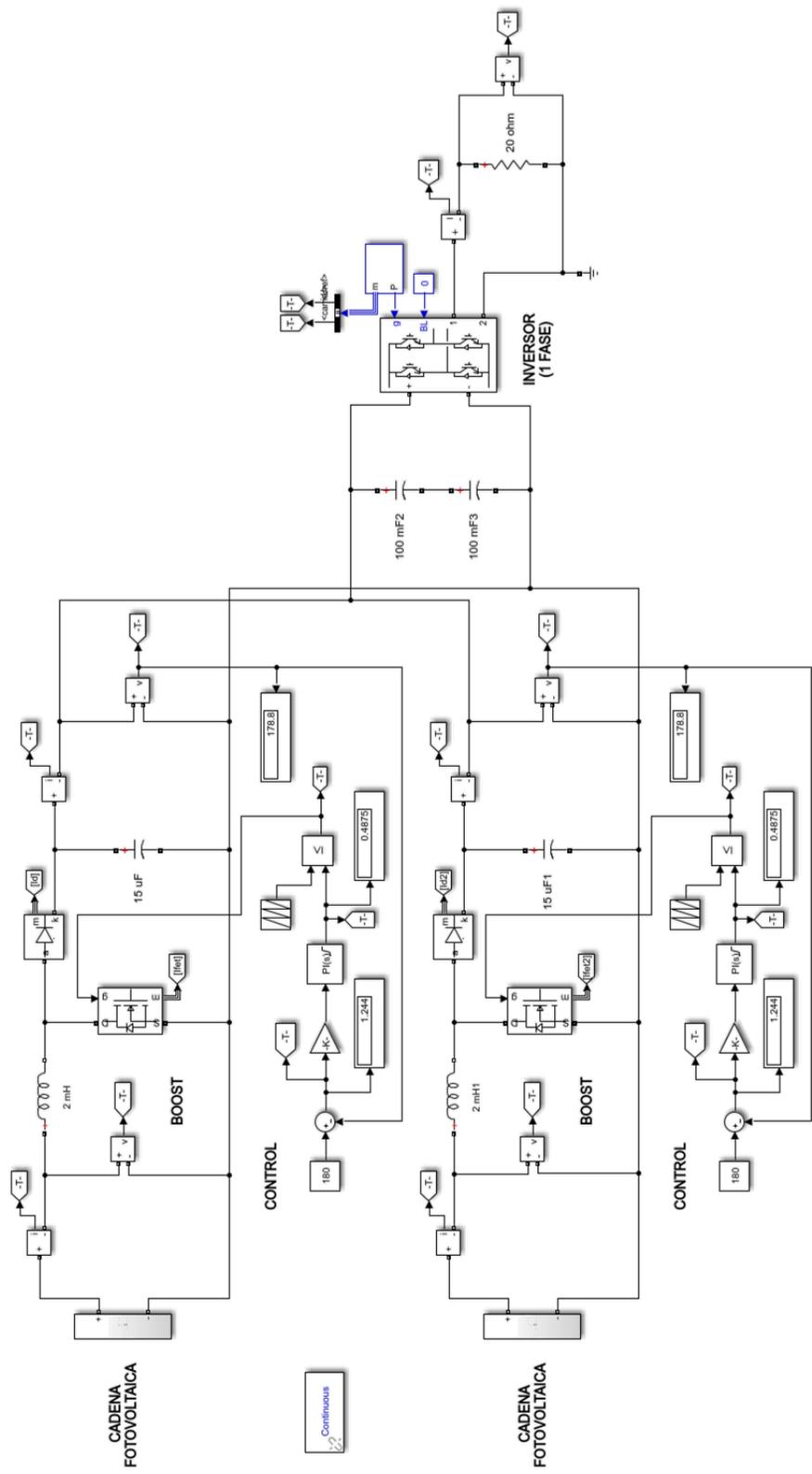


Figura 63. Circuito eléctrico de la etapa 5.

En la figura 64 se muestra la forma de onda de la señal portadora del inversor monofásico y posteriormente se muestra la forma de onda de la señal moduladora en la figura 65.

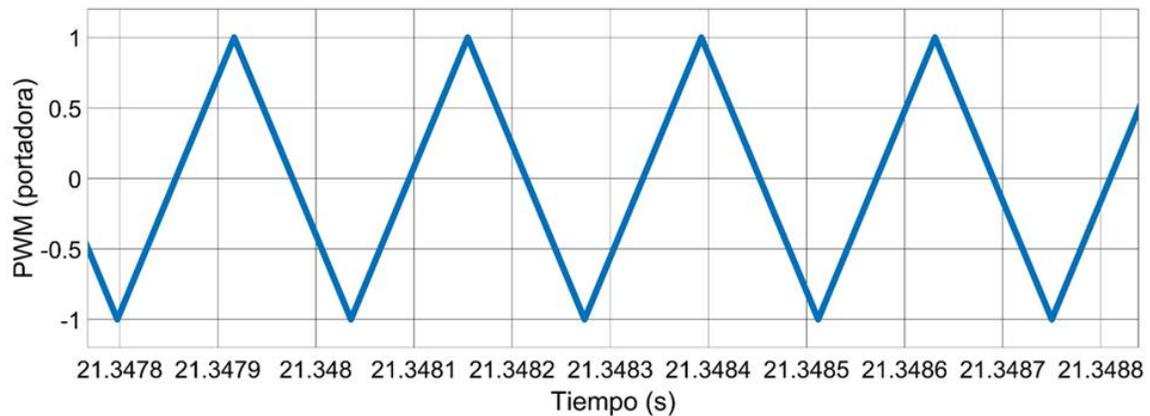


Figura 64. Señal portadora ($F = 4,200$ Hz).

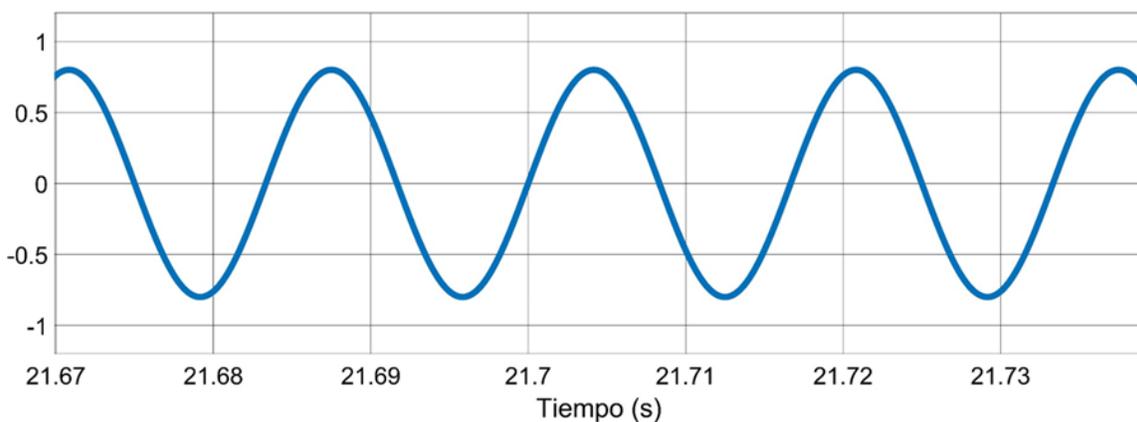


Figura 65. Señal moduladora ($F = 60$ Hz).

Se le hace notar al lector que la escala de tiempo de las figuras 66 y 68 corresponde al tiempo asignado previamente para todas las simulaciones de este tipo. El intervalo asignado es el tiempo en el cual se introducen las variaciones de tensión presentes en los paneles fotovoltaicos durante el día.

El objetivo de las figuras 66 y 68 es observar el comportamiento de las señales durante el estado transitorio y posteriormente en estado estable.

En la figura 66 se muestra la señal de tensión eléctrica entregada a la casa habitación por el inversor monofásico y en la figura 67 se muestra la forma de onda de la figura 66.

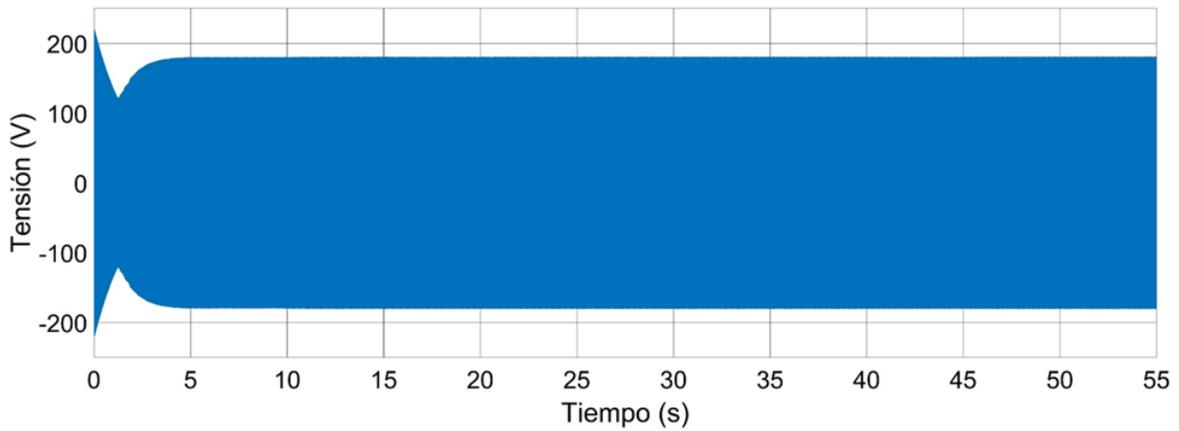


Figura 66. Señal de tensión eléctrica entregada por el inversor monofásico.

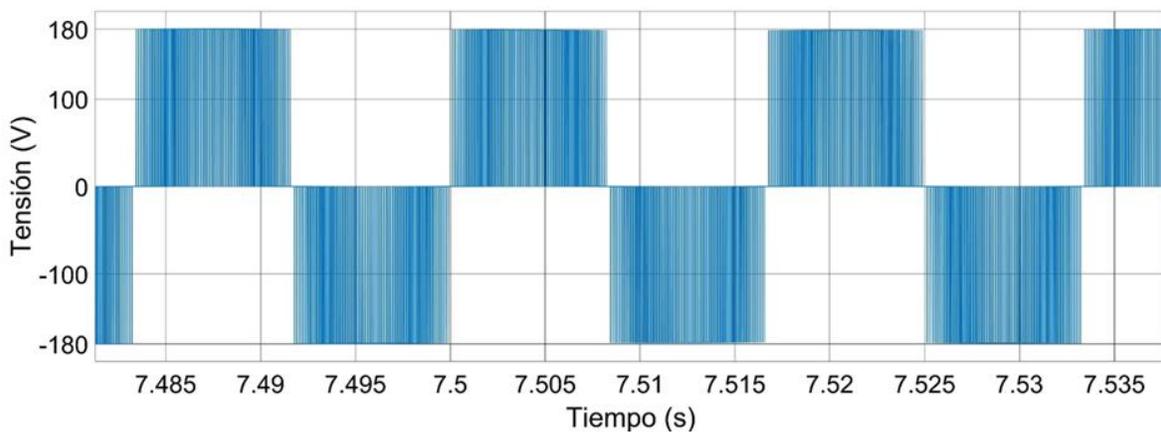


Figura 67. Forma de onda de la señal de tensión eléctrica entregada por el inversor monofásico.

En la figura 68 se muestra la señal de corriente eléctrica entregada a la casa habitación por el inversor monofásico y en la figura 69 se muestra la forma de onda de la figura 68.

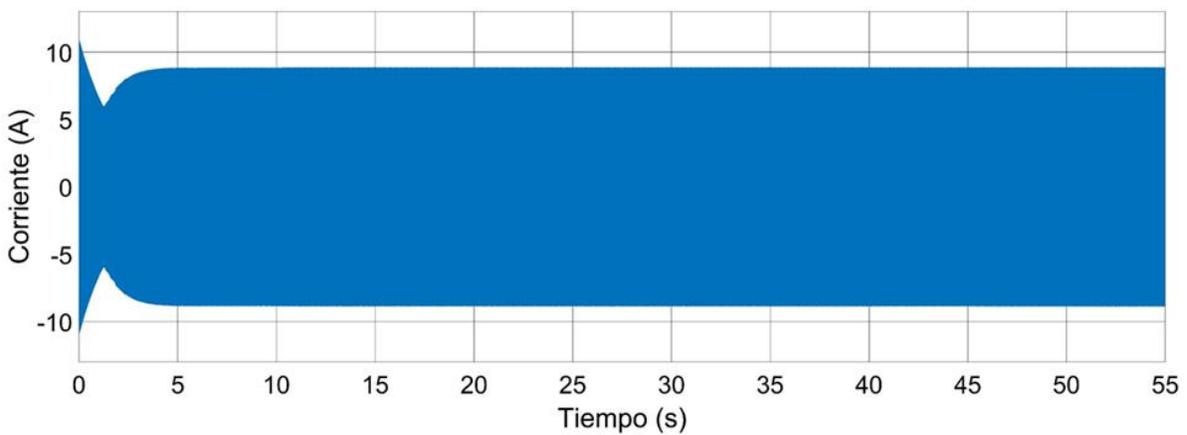


Figura 68. Señal de corriente eléctrica entregada por el inversor monofásico.

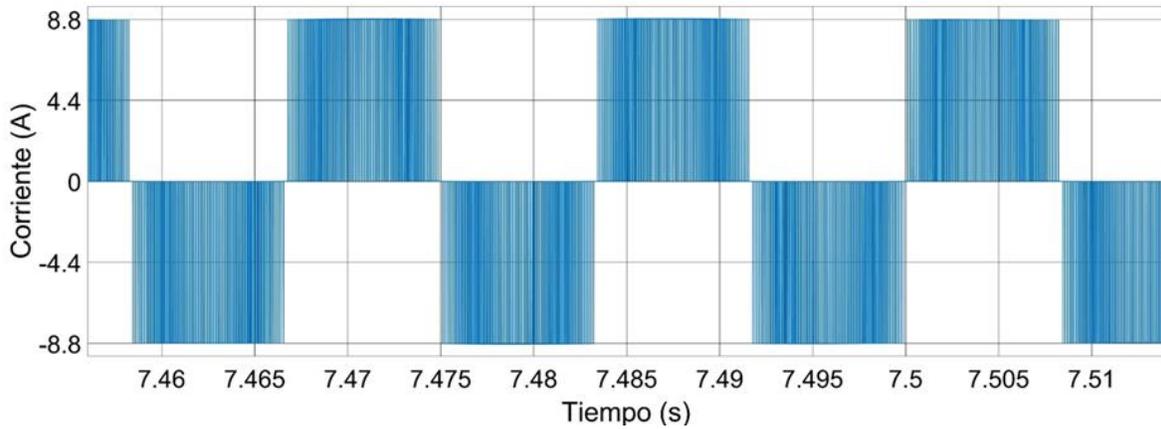


Figura 69. Forma de onda de la señal de corriente eléctrica entregada por el inversor monofásico.

3.5.3 Diseño de filtro LC

Las figuras 66 y 68 confirman que el inversor monofásico y los demás elementos de esta etapa funcionan correctamente. Sin embargo, como se puede observar en las figuras 67 y 69 la energía eléctrica entregada a la casa habitación requiere filtrarse para poder ser utilizada sin inconveniente alguno. A pesar de que muchos aparatos eléctricos funcionan con la tensión pulsada entregada por el inversor monofásico, es posible que su vida útil se vea afectada.

Un circuito LC, también conocido como circuito resonante u oscilador LC, es un circuito eléctrico formado por una bobina (inductor) y un condensador eléctrico (capacitor), los cuales se encuentran conectados entre sí.

Una de las aplicaciones más comunes que tienen estos circuitos es la de filtrar señales [21].

En la figura 70 se muestra el diagrama eléctrico del filtro LC diseñado.

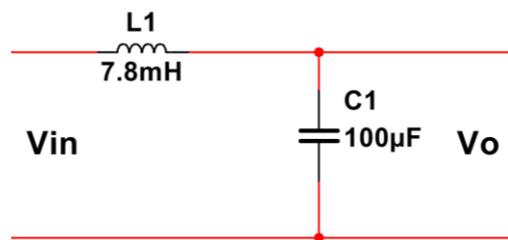


Figura 70. Diagrama eléctrico del filtro LC.

La consideración principal para el diseño del filtro LC es la de mantener únicamente la señal de 60 Hz presente en la salida del inversor monofásico.

La frecuencia de resonancia de este circuito depende de los valores del capacitor y del inductor, y está dada por la siguiente fórmula:

$$F = \frac{1}{2\pi\sqrt{LC}}$$

Si se sabe que éste circuito cumple con la misma función que un filtro pasa bandas, y además la frecuencia que se desea mantener (60 Hz) es muy cercana a cero, entonces el diseño contempla una frecuencia de resonancia ligeramente superior (180 Hz) a la que se desea mantener. Al realizar este pequeño ajuste se puede observar claramente en la figura 71 que la frecuencia deseada (60 Hz) se mantiene sin ser atenuada ni amplificada.

Para el diseño del filtro LC se establece la frecuencia de resonancia en 180 Hz, se propone un capacitor de 100 uF y se obtiene un inductor de 7.81 mH.

El cálculo de la función de transferencia para el filtro LC se realiza mediante el método de impedancias, quedando de la siguiente manera:

$$V_o = V_{in} * \left(\frac{Z_2}{Z_1 + Z_2} \right)$$
$$Z_1 = L_1 = Ls$$
$$Z_2 = C_1 = \frac{1}{Cs}$$
$$\frac{V_o}{V_{in}}(s) = \frac{\frac{1}{Cs}}{Ls + \frac{1}{Cs}} = \frac{\frac{1}{Cs}}{\frac{LCs^2 + 1}{Cs}} = \frac{1}{LCs^2 + 1}$$
$$\frac{V_o}{V_{in}}(s) = \frac{\frac{1}{LC}}{s^2 + \frac{1}{LC}}$$

El gráfico de bode y la gráfica de fase muestran el comportamiento del filtro LC en un determinado rango de frecuencias. Estos gráficos se muestran en la figura 71.

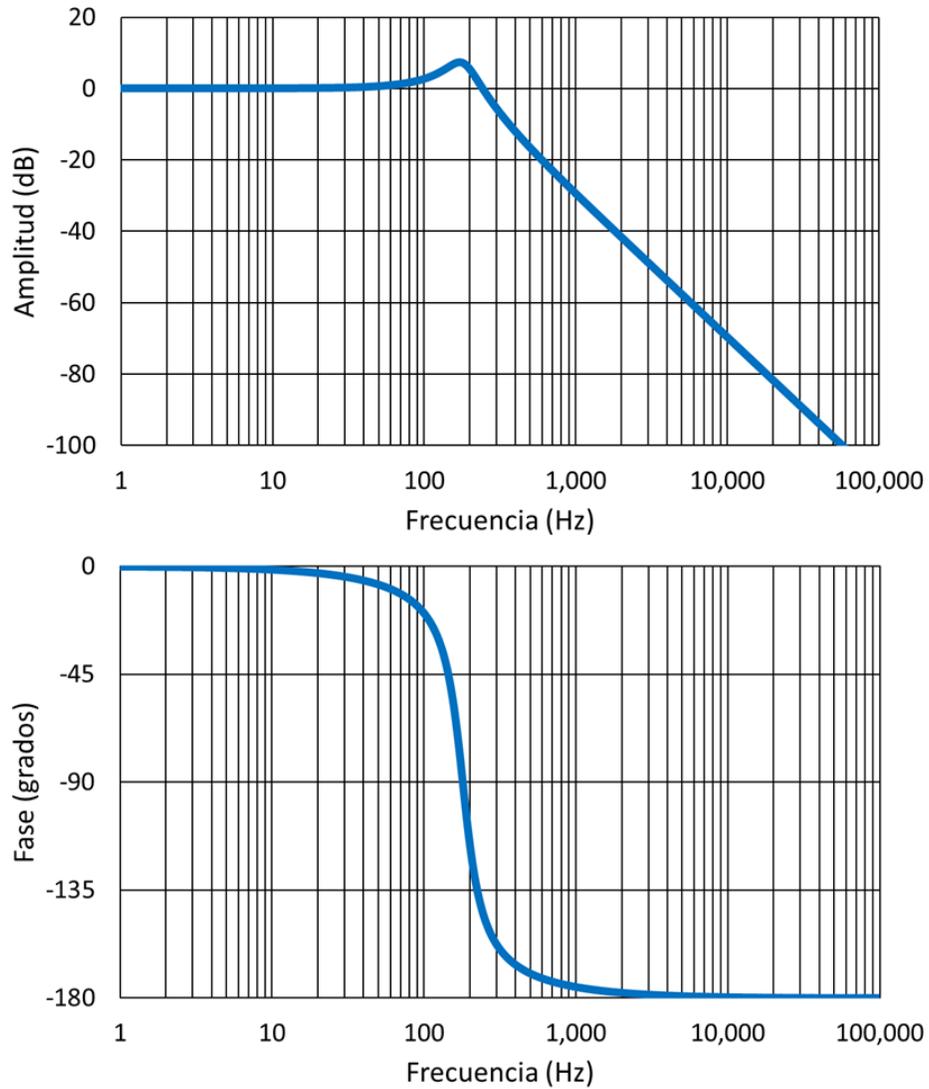


Figura 71. Gráficos de bode y de fase del filtro LC diseñado.

A partir del circuito eléctrico de la figura 63 se implementa el filtro LC de la figura 70 y el resultado de esta implementación es la entrega de una señal senoidal pura de corriente alterna a la casa habitación (ver figuras 72 y 73).

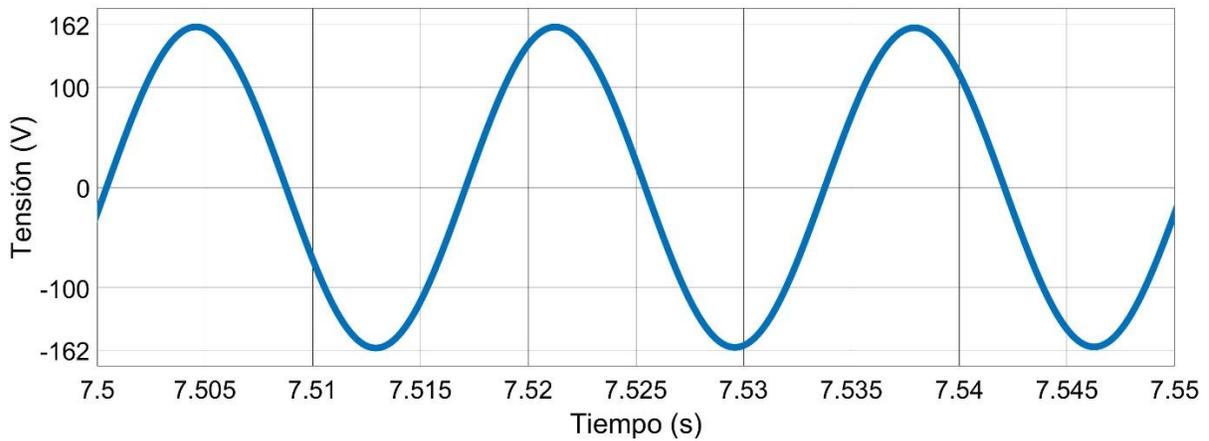


Figura 72. Forma de onda de la señal de tensión eléctrica filtrada entregada por el inversor monofásico.

Como se puede observar en la gráfica anterior la tensión pico es de 162 V mientras que el valor eficaz es de 115 V_{RMS}.

De acuerdo a la NOM-001-SEDE-2012 publicada en el Diario Oficial de la Federación, en lo referente a la utilización de instalaciones eléctricas, se establece que la tensión nominal presente en una casa residencial deberá ser de 120 V_{RMS} (una fase). Teniendo como tolerancia una diferencia de $\pm 8\%$.

En base a lo anterior se puede observar que el sistema funciona dentro de los rangos permitidos.

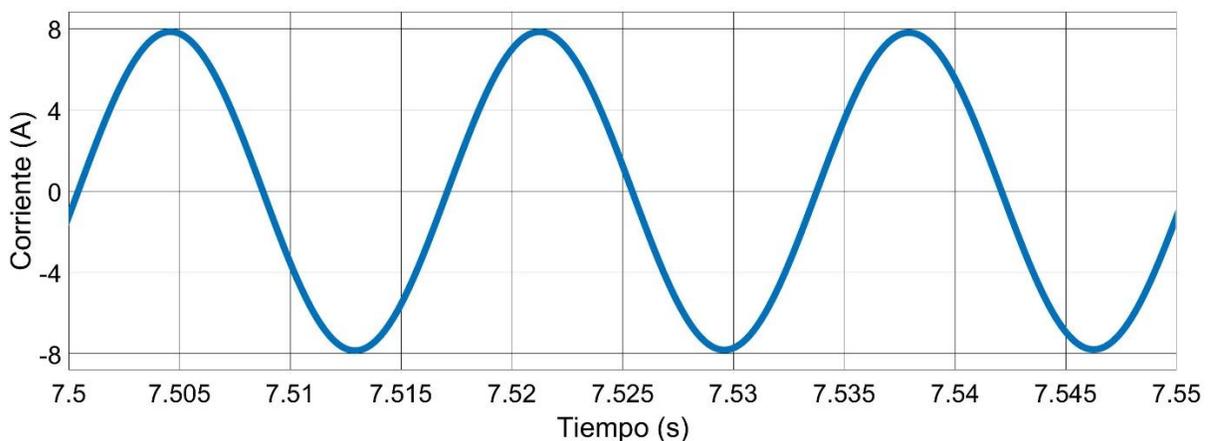


Figura 73. Forma de onda de la señal de corriente eléctrica filtrada entregada por el inversor monofásico.

3.6 Etapa 6

En la figura 74 se muestra la etapa del sistema fotovoltaico aislado a simular.

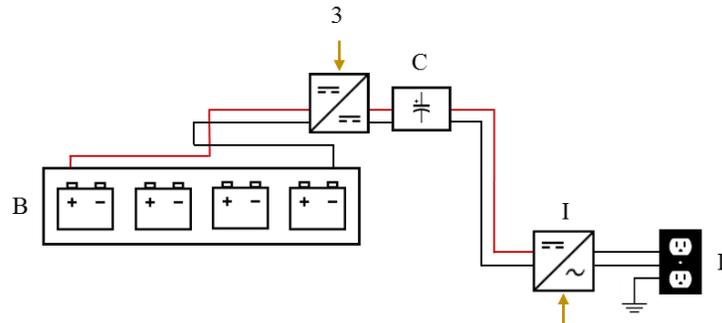


Figura 74. Diagrama de la etapa 6.

3.6.1 Especificaciones de diseño del convertidor *boost* #3

Finalmente, se diseña el tercer modelo de los convertidores *boost* propuestos y los cálculos realizados para el diseño del mismo son los siguientes:

$$V_{in} = 48 \text{ V}$$

$$V_o = 180 \text{ V}$$

$$P_o = 2175 \text{ W}$$

$$f = 25 \cdot 10^3 \text{ Hz}$$

$$\Delta V_c = 3\% \cdot V_o = 5.4 \text{ V}$$

$$\Delta i_L = (V_{in}/L) \cdot t_{on} = 2.417 \text{ A}$$

$$I_o:$$

$$R = \frac{V_o^2}{P_o} = 14.9 \Omega$$

$$I_o = \frac{V_o}{R} = 12.08 \text{ A}$$

$$D = 1 - \frac{V_{in}}{V_o} = 0.73$$

Inductor:

$$L = \frac{V_{in} \cdot D}{\Delta i_L \cdot f} = (582.62 \cdot 10^{-6}) \text{ H}$$

Capacitor:

$$C = \frac{D \cdot I_o}{\Delta V_c \cdot f} = (65.64 \cdot 10^{-6}) \text{ F}$$

Para el diseño de este convertidor se propone un rizo de corriente en el inductor de 2.4 A que corresponde a un 20% de la corriente de salida. Este valor puede ser mayor o menor, pero es indispensable proponerlo, o en su defecto, proponer un valor de inductor y después calcular el rizo de corriente que se tiene.

La potencia de funcionamiento asignada para este tercer convertidor es de 2,175 W ya que es la potencia máxima que puede entregar el banco de baterías en un escenario de consumo máximo por parte de la respectiva casa habitación (se considera un consumo de 1,375 W por parte de los electrodomésticos y 800 W por parte de algún equipo de trabajo (congelador, por ejemplo)). Dichos consumos eléctricos se detallan en el apartado 3.2.1.

3.6.2 Lazo de control PI

Ganancias para el convertidor *boost* #3:

| K_p | K_i |
|---------|---------|
| 0.37320 | 1.54305 |

Estas ganancias han sido calculadas mediante la herramienta de ajuste y estabilidad dentro del bloque PI y permiten que el convertidor sea estable.

3.6.3 Simulación en *Simetrix*

En la figura 75 se muestra el circuito eléctrico correspondiente al convertidor *boost* #3 y en la figura 76 se muestran los resultados de simulación.

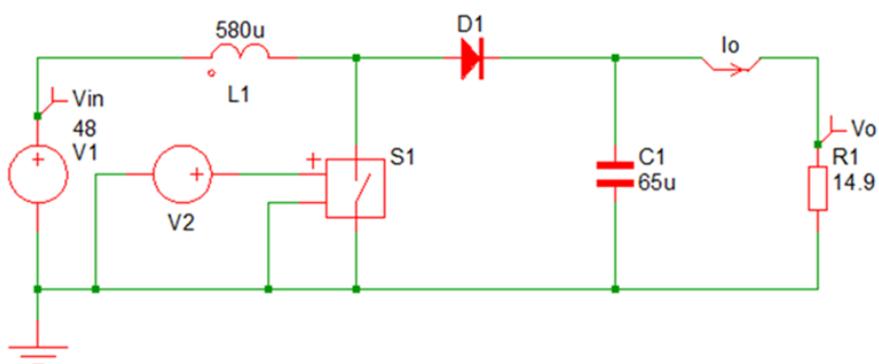


Figura 75. Circuito eléctrico del convertidor *boost* #3.

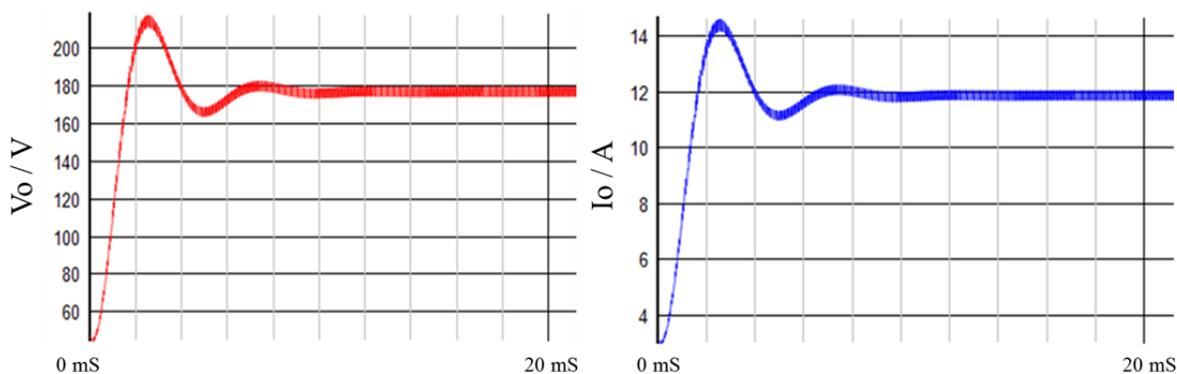


Figura 76. Formas de onda de la tensión de salida (V_o : 176.06 V) junto con la corriente de salida (I_o : 11.81 A).

3.6.4 Simulación en Simulink

En la figura 77 se muestra el circuito eléctrico correspondiente a la etapa 6 implementado en la interfaz de *MATLAB – Simulink*.

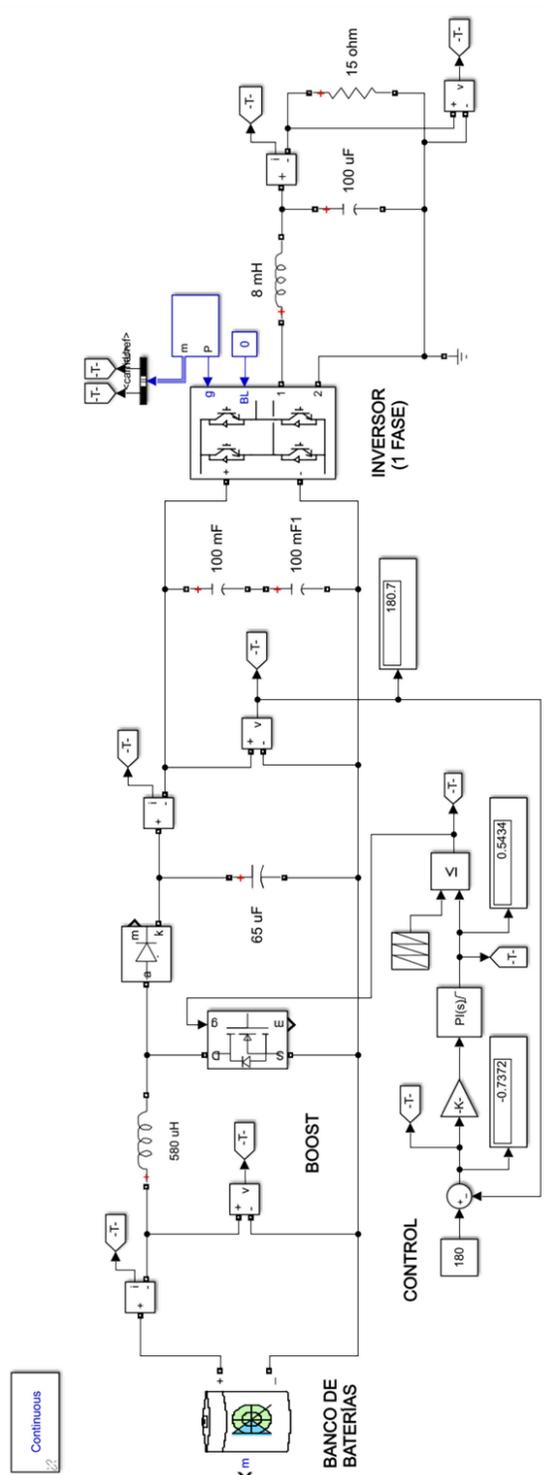


Figura 77. Circuito eléctrico de la etapa 6.

El objetivo de las figuras 78 y 80 es observar el comportamiento de las señales durante el estado transitorio y posteriormente en estado estable.

En la figura 78 se muestra la señal de tensión eléctrica entregada a la casa habitación por el inversor monofásico y en la figura 79 se muestra la forma de onda de la figura 78.

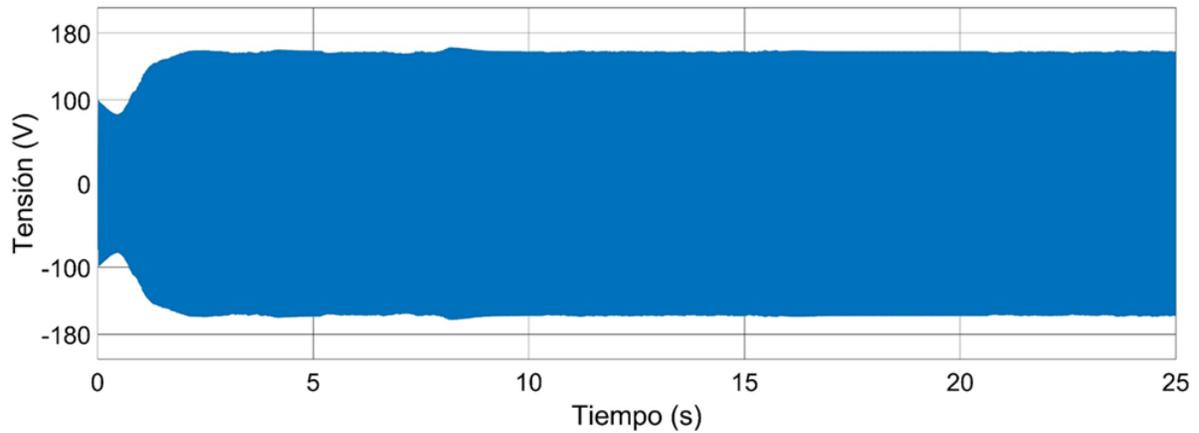


Figura 78. Señal de tensión eléctrica entregada por el inversor monofásico.

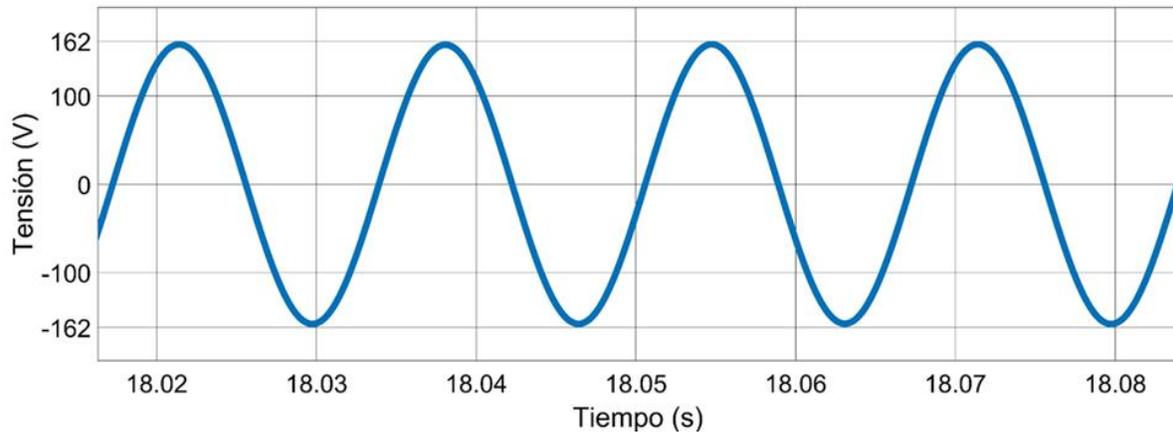


Figura 79. Forma de onda de la señal filtrada de tensión eléctrica entregada por el inversor monofásico.

En la figura 80 se muestra la señal de corriente eléctrica entregada a la casa habitación por el inversor monofásico y en la figura 81 se muestra la forma de onda de la figura 80.

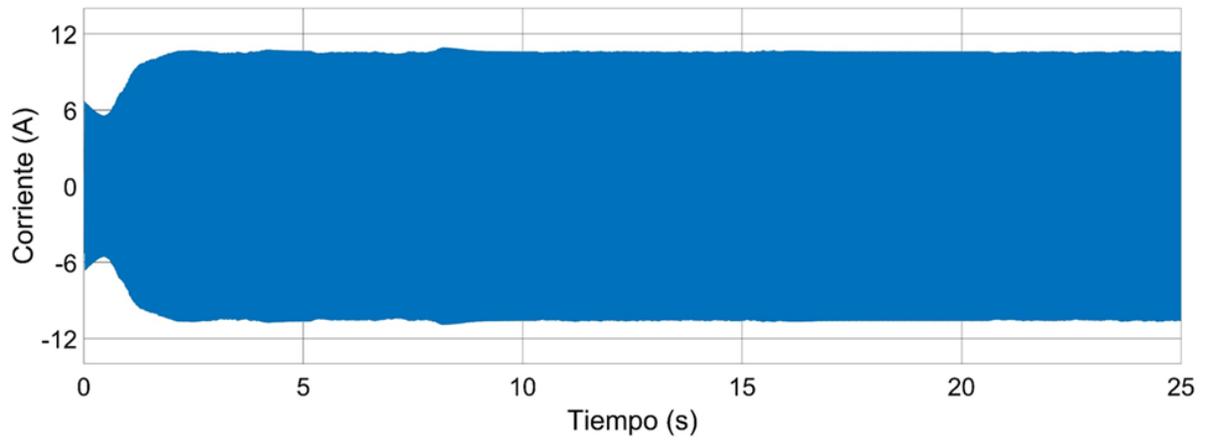


Figura 80. Señal de corriente eléctrica entregada por el inversor monofásico.

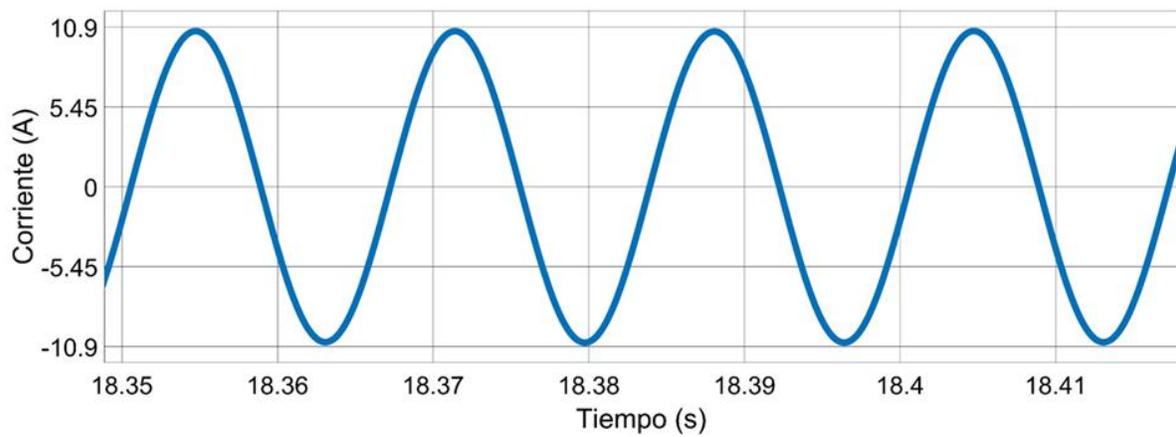


Figura 81. Forma de onda de la señal filtrada de corriente eléctrica entregada por el inversor monofásico.

3.7 Etapa 7

En la figura 82 se muestra la secuencia de funcionamiento que debe realizar el sistema fotovoltaico aislado de manera automatizada. El primer cambio sucede cuando se pasa de operar con paneles fotovoltaicos (incluida la recarga del banco de baterías) a operar únicamente con el banco de baterías. El segundo cambio se realiza cuando se pasa de operar con el banco de baterías a operar con los paneles fotovoltaicos (inicia la recarga del banco de baterías).

Estos cambios se realizan de manera automatizada en relación al nivel de irradiancia que se tenga. Para una irradiancia mayor a 200 W/m^2 se activan los paneles fotovoltaicos para suministrar energía eléctrica a la casa habitación y al mismo tiempo recargar el banco de baterías. Y para una irradiancia menor a 200 W/m^2 se desactivan los paneles fotovoltaicos y se utiliza únicamente el banco de baterías para suministrar energía eléctrica a la casa habitación [22-23].

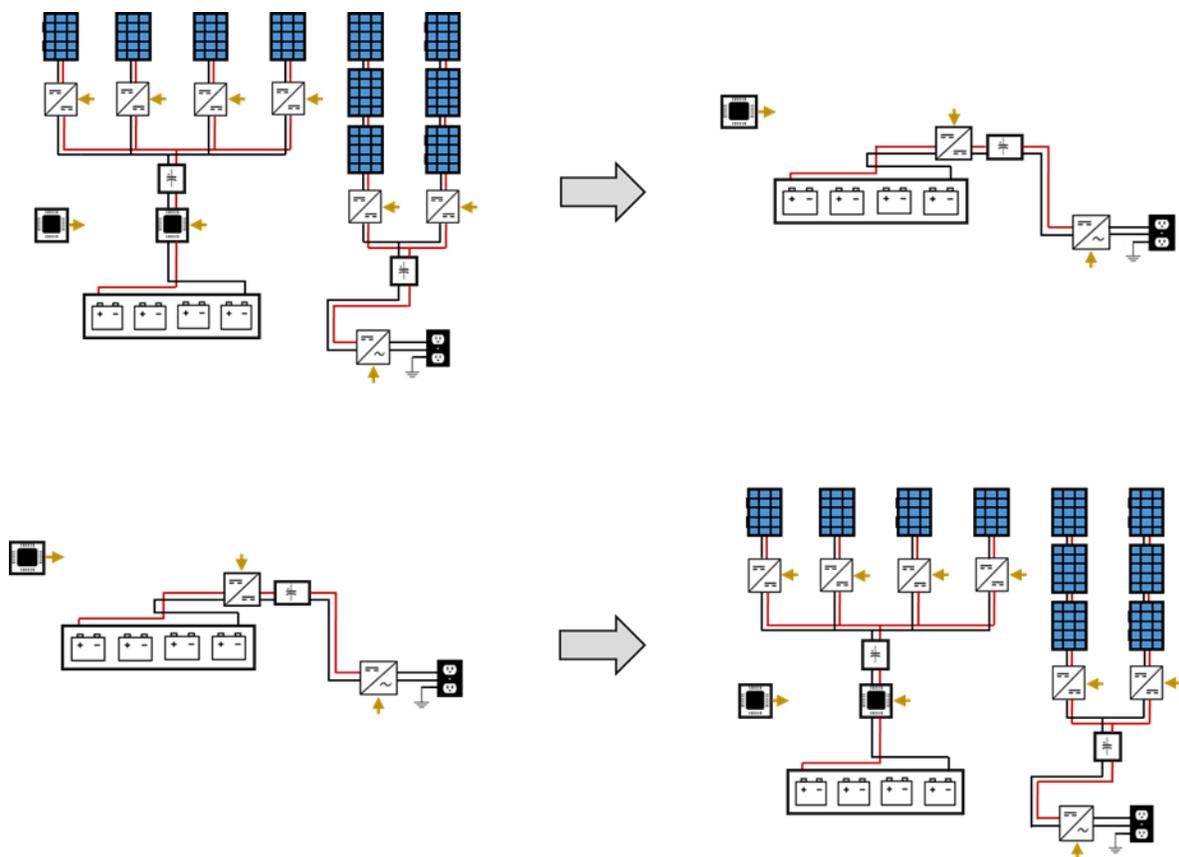


Figura 82. Secuencia automatizada de funcionamiento del sistema fotovoltaico aislado.

3.7.1 Simulación en Simulink

En la figura 83 se muestra el circuito eléctrico de todo el sistema fotovoltaico aislado.

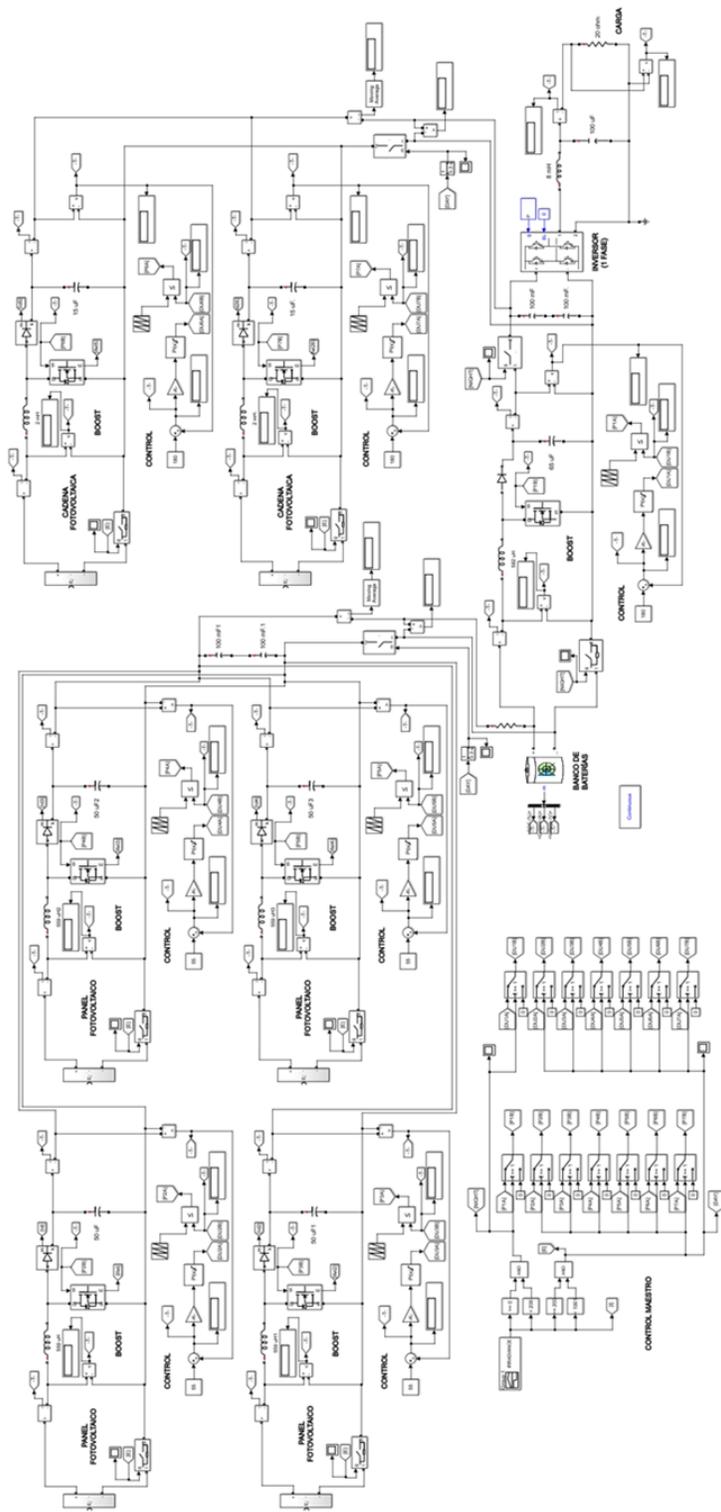


Figura 83. Circuito eléctrico del sistema fotovoltaico aislado.

El control maestro encargado de coordinar a todo el sistema fotovoltaico aislado basa su funcionamiento en una única variable: la irradiancia solar.

El diseño del mismo contempla las herramientas disponibles dentro de *Simulink* para conseguir implementarlo sin necesidad de recurrir a ningún software de terceros.

El funcionamiento se basa en leer la señal de irradiancia generada continuamente y compararla entre dos rangos. Cada rango tiene dos valores específicos de umbral mínimo y máximo. Los rangos son los siguientes:

| Rango | Niveles de irradiancia (W/m ²) | |
|-------|--|----------|
| Día | ≥ 200 | < 1001 |
| Noche | ≥ 0 | < 200 |

Los dos comparadores del rango “día” están conectados a las entradas de una compuerta lógica tipo *AND* por lo que únicamente si ambas condiciones se cumplen (*True* y *True*), tendremos una salida *True* de la compuerta (lo mismo para el rango “noche”). Esta señal se envía a unos interruptores especiales que interrumpen o permiten el ciclo de trabajo de los convertidores *boost* correspondientes.

De acuerdo al valor de irradiancia asignado como punto límite de funcionamiento de los paneles fotovoltaicos, se activan o desactivan los convertidores asociados a dichos paneles. Por el contrario, se activa o desactiva el convertidor asignado para acondicionar la energía proveniente del banco de baterías. En la figura 84 se muestra el control maestro diseñado.

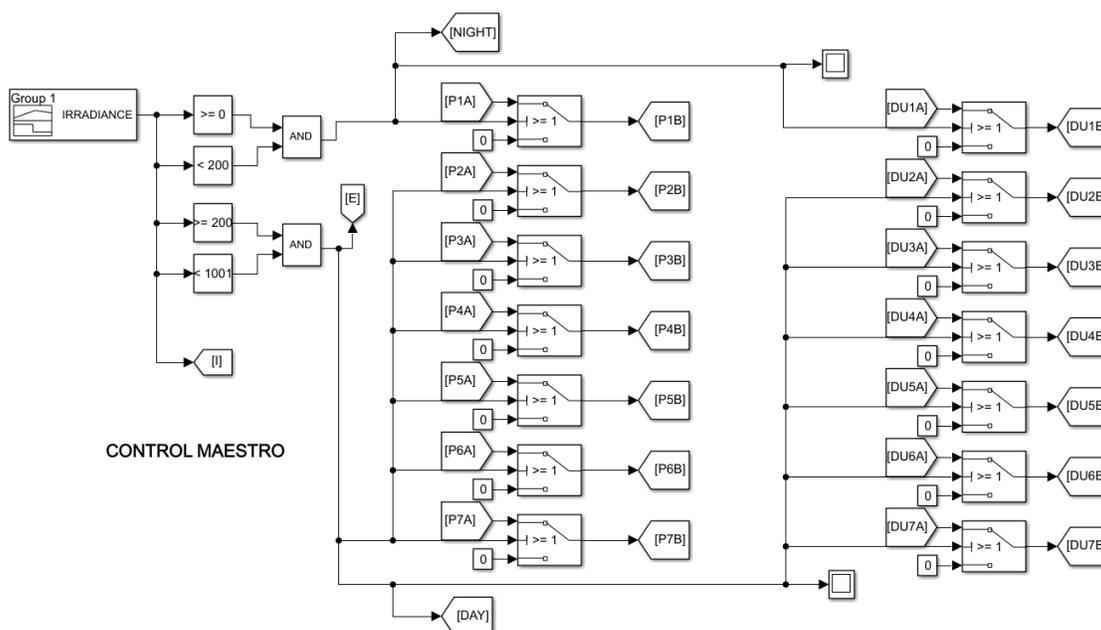


Figura 84. Control maestro del sistema fotovoltaico aislado.

El objetivo de las figuras 85, 86 y 87 es observar el comportamiento de las señales durante los estados transitorios (acoplamiento) y posteriormente en estado estable.

En las figuras 85 y 86 se muestra el comportamiento que presenta la tensión y la corriente eléctrica en la casa habitación durante el acoplamiento y desacoplamiento del banco de baterías y los paneles fotovoltaicos.

Los intervalos de tiempo de las figuras 85, 86 y 87 hacen referencia a lo siguiente:

Cuando: $0 \leq t \leq 10$, Irradiancia $\leq 200 \text{ W/m}^2$

Cuando: $10 \leq t \leq 35$, Irradiancia $\geq 200 \text{ W/m}^2$

Cuando: $35 \leq t \leq 45$, Irradiancia $\leq 200 \text{ W/m}^2$

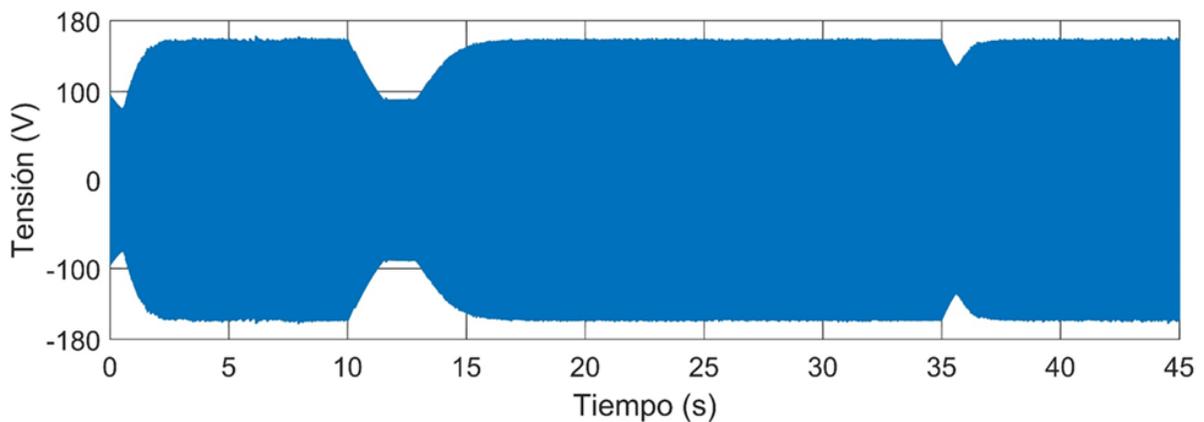


Figura 85. Señal de tensión eléctrica entregada a la casa habitación por el inversor monofásico (0-10 s: opera banco de baterías, 10-35 s: operan paneles fotovoltaicos y 35-45 s: opera banco de baterías).

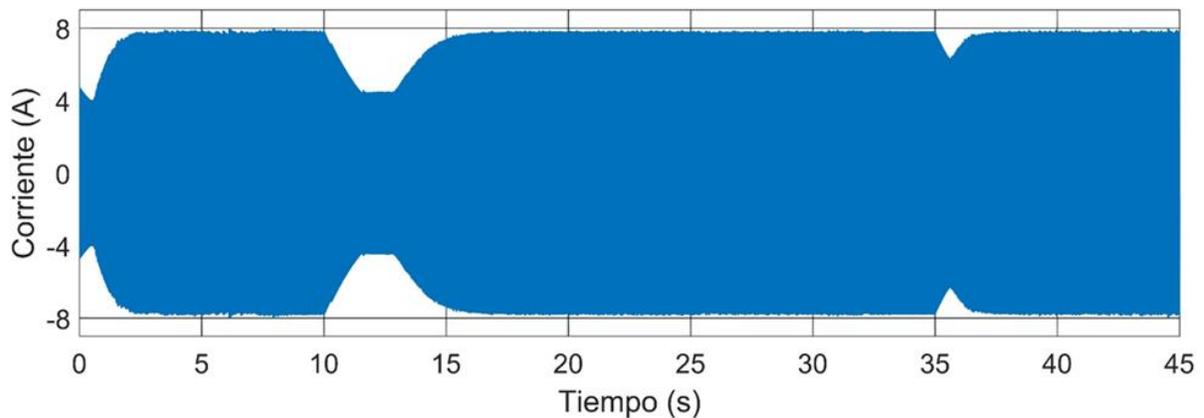


Figura 86. Señal de corriente eléctrica entregada a la casa habitación por el inversor monofásico (0-10 s: opera banco de baterías, 10-35 s: operan paneles fotovoltaicos y 35-45 s: opera banco de baterías).

En la figura 87 se muestra el comportamiento que presenta el banco de baterías durante el acoplamiento y desacoplamiento del mismo para ser utilizado como fuente de suministro de energía eléctrica o al momento de ser recargado.

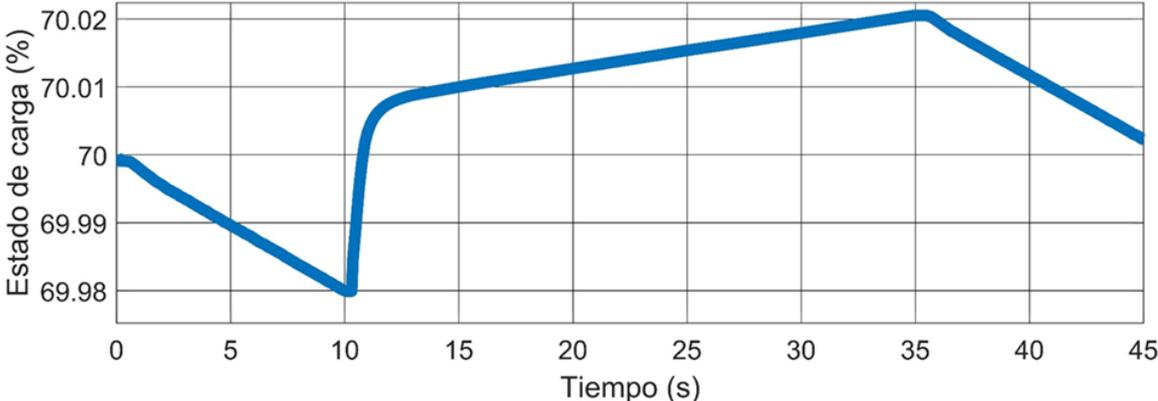


Figura 87. Variación del estado de carga del banco de baterías (0-10 s: en uso, 10-35 s: recargándose y 35-45 s: en uso).

Capítulo 4

Conclusiones

En este capítulo se realiza una discusión de los resultados obtenidos y posteriormente se plantean los posibles trabajos que pueden derivar de este proyecto.

4.1 Resultados obtenidos

Al concluir con todas las simulaciones previstas para la validación de la propuesta de diseño del sistema fotovoltaico asilado se puede afirmar que todas y cada una de las secciones cumplen con su función y que en conjunto trabajan coordinadamente y sin problemas.

De cada etapa se puede destacar lo siguiente:

Etapa 1: las pruebas realizadas con un panel fotovoltaico y un convertidor del tipo *boost* #1 validaron el buen funcionamiento del control PI y del propio convertidor.

En *Simetrix*, se analiza el comportamiento del convertidor *boost* #1 sin variaciones de tensión en la entrada y con un ciclo de trabajo constante. Con esto, se observa que el estado transitorio de dicho convertidor dura 12 ms (máximo). Posteriormente se mantiene en estado estable.

Para el caso de *Simulink*, se simula el mismo convertidor en conjunto con el control PI diseñado y se realizan variaciones de tensión en la entrada del mismo. El estado transitorio de este convertidor dura 5 segundos (máximo). Posteriormente se mantiene en estado estable aun con las variaciones de tensión presentes en la entrada del mismo.

La desviación de la señal de tensión de salida con respecto a la señal de referencia, mantiene un error constante de 1.3 % posterior al estado transitorio.

Etapa 2: las pruebas realizadas con los mismos elementos de la etapa 1 y el banco de baterías permitieron validar el nivel de carga que se consigue con los niveles de irradiancia seleccionados.

Inicialmente se opta por utilizar un circuito integrado (LTC4020) para recargar el banco de baterías. Este circuito integrado admite una tensión de 55 V para la recarga. Por este hecho, las configuraciones a probar de paneles fotovoltaicos parten de un único panel fotovoltaico en serie con un convertidor *boost* (cada panel fotovoltaico entrega una tensión cercana a los 31 V).

A partir de las simulaciones realizadas en esta etapa y en el anexo 1 se observa lo siguiente:

- 1- Con los niveles mínimos de irradiancia solar:
 - 1 panel fotovoltaico recarga el banco de baterías del 70 al 80 por ciento de su capacidad en un lapso de 9 horas.
 - 2 paneles fotovoltaicos recargan el banco de baterías del 70 al 90 por ciento de su capacidad en un lapso de 9 horas.
 - 3 paneles fotovoltaicos recargan el banco de baterías del 70 al 100 por ciento de su capacidad en un lapso de 9 horas.

- 2- Con los niveles máximos de irradiancia solar:
 - 1 panel fotovoltaico recarga el banco de baterías del 70 al 84 por ciento de su capacidad en un lapso de 9 horas.
 - 2 paneles fotovoltaicos recargan el banco de baterías del 70 al 98 por ciento de su capacidad en un lapso de 9 horas.
 - 3 paneles fotovoltaicos recargan el banco de baterías del 70 al 100 por ciento de su capacidad en un lapso de 6 horas.

Etapa 3: las pruebas realizadas con cuatro paneles fotovoltaicos y cuatro convertidores del tipo *boost* #1 y el banco de baterías permitieron validar el nivel de carga que se consigue con los niveles de irradiancia seleccionados.

A partir de los resultados obtenidos en la etapa 2 y tomando en cuenta la directriz de asegurar la carga completa del banco de baterías diariamente, se establece que la recarga se efectúe mediante 4 paneles fotovoltaicos. Los resultados obtenidos son los siguientes:

- 1- Con los niveles mínimos de irradiancia solar:
 - 4 paneles fotovoltaicos recargan el banco de baterías del 70 al 100 por ciento de su capacidad en un lapso de 6.3 horas.
- 2- Con los niveles máximos de irradiancia solar:
 - 4 paneles fotovoltaicos recargan el banco de baterías del 70 al 100 por ciento de su capacidad en un lapso de 4.6 horas.

Etapa 4: las pruebas realizadas con una cadena de tres paneles fotovoltaicos y un convertidor del tipo *boost* #2 validaron el buen funcionamiento del control PI y del propio convertidor.

En *Simetrix*, se analiza el comportamiento del convertidor *boost* #2 sin variaciones de tensión en la entrada y con un ciclo de trabajo constante. Con esto, se observa que el estado transitorio de dicho convertidor dura 10 ms (máximo). Posteriormente se mantiene en estado estable.

Para el caso de *Simulink*, se simula el mismo convertidor en conjunto con el control PI diseñado y se realizan variaciones de tensión en la entrada del mismo. El estado transitorio de este convertidor dura 5 segundos (máximo). Posteriormente se mantiene en estado estable aun con las variaciones de tensión presentes en la entrada del mismo.

La desviación de la señal de tensión de salida con respecto a la señal de referencia, mantiene un error constante de 1.7 % posterior al estado transitorio.

Etapa 5: las pruebas realizadas con dos cadenas de paneles fotovoltaicos (cada una comprendida por tres paneles fotovoltaicos), dos convertidores del tipo *boost* #2 y un inversor monofásico permitieron validar el acoplamiento y buen funcionamiento de estos elementos en conjunto. Así como la entrega óptima de energía eléctrica a la casa habitación.

Los resultados obtenidos en *Simulink* muestran que el estado transitorio del sistema dura 5 segundos (máximo). Posteriormente se mantiene estable.

La inversión de tensión se realiza correctamente y el valor pico de la misma es de 180 V (127 V_{RMS}) mientras que la corriente pico es de 8.8 A en estado estable.

La inclusión del filtro LC a la salida del inversor monofásico ocasiona una ligera reducción en los valores de tensión y corriente. Como resultado se obtiene una señal senoidal pura con valores de tensión y corriente de 162 V (115 V_{RMS}) y 8 A respectivamente, en estado estable.

Etapa 6: las pruebas realizadas con el banco de baterías, un convertidor del tipo *boost* #3 y un inversor monofásico validaron el buen funcionamiento del control PI y del propio convertidor, así como la inversión de tensión correspondiente.

En *Simetrix*, se analiza el comportamiento del convertidor *boost* #3 sin variaciones de tensión en la entrada y con un ciclo de trabajo constante. Con esto, se observa que el estado transitorio de dicho convertidor dura 16 ms (máximo). Posteriormente se mantiene en estado estable.

Para el caso de *Simulink*, se simula el mismo convertidor en conjunto con el banco de baterías (como fuente de alimentación) y el inversor monofásico. La señal de salida del inversor es filtrada y se obtienen valores de tensión y corriente de 162 V (115 V_{RMS}) y 10.9 A respectivamente, en estado estable.

Etapa 7: las pruebas realizadas a todo el sistema fotovoltaico aislado permitieron la validación del buen funcionamiento de los sistemas de control PI y del control maestro que administra a todo el sistema. De igual manera se validó el acoplamiento entre las diferentes secciones y el suministro eléctrico ininterrumpido a la casa habitación.

En *Simulink* se realiza la inclusión de todos los componentes y sistemas de control diseñados con anterioridad y se programa el control maestro para que gestione de manera automatizada el cambio de la fuente de alimentación que energiza a la casa habitación durante el día.

El aspecto más importante a validar en esta etapa es observar el comportamiento de los estados transitorios reflejados en la casa habitación, ocasionados por el acoplamiento y desacoplamiento del banco de baterías y de los paneles fotovoltaicos.

Las simulaciones muestran lo siguiente:

- La tensión recibida en la casa habitación es de 162 V (115 V_{RMS}) en estado estable.
- La tensión máxima recibida en la casa habitación es de 162 V (115 V_{RMS}).
- La tensión mínima recibida en la casa habitación es de 90 V (64 V_{RMS}) por un periodo de 3 s máximo.
- La corriente recibida en la casa habitación es de 8 A en estado estable.
- La corriente máxima recibida en la casa habitación es de 8 A.
- La corriente mínima recibida en la casa habitación es de 4 A por un periodo de 3 s máximo.

4.2 Discusión de resultados

El esquema de diseño del sistema fotovoltaico aislado propuesto en este documento es validado de manera puntual y general por medio de una serie de simulaciones llevadas a cabo en *Simetrix* y *Simulink*.

Para el caso de *Simetrix* las simulaciones consistieron en validar el correcto funcionamiento de los tres modelos de convertidores *boost* que son empleados en las diferentes etapas del sistema.

En cuanto a *Simulink*, se ejecutaron simulaciones en donde se incluían los convertidores *boost* previamente diseñados en conjunto con uno o más elementos del sistema. Dicho sistema se separa en siete etapas o “partes” para lograr observar y analizar con mejor detalle el comportamiento de cada una de ellas y la interacción en conjunto.

Finalmente, en esta misma plataforma se realizan simulaciones en las que se incluye un control maestro encargado de gestionar de manera automatizada las conexiones activas del sistema basándose en un umbral de irradiancia solar.

El buen funcionamiento del sistema propuesto es validado y consecuentemente también los objetivos iniciales del proyecto.

Las principales ventajas del sistema propuesto son:

- Se dimensiona cada componente y etapa de acuerdo a las necesidades específicas del caso propuesto.
- Se cuenta con un respaldo energético que puede proveer de energía eléctrica a la casa habitación por un periodo de hasta tres días sin necesidad de ser recargado en este tiempo.
- La topología propuesta para la recarga del banco de baterías permite seguir recargándolo aún en caso de falla de algún panel fotovoltaico o de un convertidor *boost* #1.
- Se cuenta con un sistema de control maestro que permite la operación del sistema fotovoltaico de manera automatizada.
- Se asegura la entrega de energía eléctrica de manera ininterrumpida a la casa habitación.

Las principales desventajas del sistema propuesto son:

- Carencia de una salida de corriente continua en la casa habitación. Únicamente se cuenta con salidas de corriente alterna.

- Ausencia de un control maestro avanzado que permita el desvío o re direccionamiento de la energía entregada por lo paneles fotovoltaicos. Resultando así en un mejor aprovechamiento de la energía solar disponible.
- Limitación en la validación del mismo ya que la fase de experimentación no se realizó por motivos de tiempo.
- Ausencia de una interfaz de control para el usuario a través de la cual le sea posible monitorear el sistema y configurarlo de acuerdo a sus propias necesidades.

4.3 Trabajos futuros

Con base en los resultados obtenidos y las conclusiones generales del proyecto se puede plantear al menos tres propuestas de investigación y desarrollo que deriven del mismo. Estas se enlistan a continuación:

- Diseño y desarrollo de un sistema de gestión de energía que permita administrar la energía proveniente de los paneles fotovoltaicos de una manera más conveniente para el usuario. Esto es, desviar la mayor cantidad posible de energía eléctrica a la casa habitación si la demanda en la misma es muy elevada, o bien, redirigirla hacia el banco de baterías si la demanda fuera muy baja.
- Diseño e inclusión de un subsistema de generación eléctrica (eólico o hidráulico) que trabaje en conjunto con los paneles fotovoltaicos y permita a la casa habitación disponer de una mayor cantidad de energía eléctrica.
- Diseño de una interconexión que permita vincular al sistema fotovoltaico con otro sistema eléctrico (riego, bombeo de agua, iluminación, etc.), al cual pueda temporalmente proveerle energía eléctrica para su funcionamiento.

Referencias

Capítulo 2

- [1] A. P. Kirk, *Solar Photovoltaic Cells: Photons to Electricity*: Academic Press, 2014.
- [2] H. I. Cristian and M. Raducu, “Energy efficiency analysis of various topologies, control techniques and technologies used for photovoltaic panels Part I: On the PV modeling and problem of extracting the maximum power,” in *Electronics, Computers and Artificial Intelligence (ECA)*, 2014 6th International Conference on, 2014, pp. 23-28.
- [3] www.vaisala.com/es/ / 2016.
- [4] www.dgel.energia.gob.mx/azel/ / 2016.
- [5] O. D. Basak, and B. S. Sazak, “Effect of Developments on a PV System Efficiency”, in *Electrical and Electronics Engineering (ISEEE)*, 2013 4th International Symposium on, 2013, pp. 1-6.
- [6] www.jinkosolar.com/ / 2017.
- [7] B. Alajmi, K. Ahmed, S. Finney, B. Williams, “A Maximum Power Point Tracking Technique for Partially Shaded Photovoltaic Systems in Microgrids”, *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, vol.60, no.4, pp.1596-1606, April 2013.
- [8] A. H. ALQahtani, "A simplified and accurate photovoltaic module parameters extraction approach using matlab," 2012 IEEE International Symposium on Industrial Electronics, Hangzhou, 2012, pp. 1748-1753.
- [9] www.fullriverbattery.com/ / 2017.
- [10] J. G. Zabaleta, I. S. M. Biurrun, J. M. P. Miqueleiz, “Cálculo del estado de carga en baterías de plomo-ácido: diseño y validación experimental,” *Licenciatura Tesis de Grado, Ingeniería Industrial, Informática y de Telecomunicación, UPNA*, 2016.
- [11] M. Ceraolo, “New Dynamical Models of Lead-Acid Batteries”, *IEEE Transactions on Power Systems*, vol. 15, no. 4, pp. 1184-1190, November 2010.
- [12] B. Indu Rani, “Design and Control of Isolated Bi-Directional DC-DC Converter for Photovoltaic Applications”, *Department of Electrical and electronics Engineering VV College of Engineering*, 2015.
- [13] Z. Liao and X. Ruan, “Control Strategy of Bi-Directional DC/DC Converter for Novel Stand-alone Photovoltaic Power System”, *IEEE Vehicle Power and Propulsion Conference (VPPC)*, September 3-5, 2008, Harbin, China.
- [14] S. B. Chavan and M. S. Chavan, “Design and Implementation of Full Bridge DC-DC Converter for Photovoltaic Application”, *International Conference on Energy Systems and Applications (ICESA 2015)*, 2015, Pune, India.

Capítulo 3

- [1] M. Gradela, J. Rafael, "Comprehensive Approach to Modeling and Simulation of Photovoltaic Arrays", IEEE Transactions on Power Electronics, vol. 24, no. 5, Mayo 2005.
- [2] S. Pukhrem, "A Photovoltaic Panel Model in Matlab Simulink", Faculty of Electrical Engineering. Wroclaw University of Technology. Disponible en: https://www.researchgate.net/publication/255721161_A_PHOTOVOLTAIC_PANEL_MODEL_IN_MATLABSIMULINK
- [3] K. Matsuda, N. Nagaoka, T. Higo and A. Namba, "A simple lumped-equivalent circuit of a photovoltaic panel for transient simulations," 2014 49th International Universities Power Engineering Conference (UPEC), Cluj-Napoca, 2014, pp. 1-5.
- [4] N. N. B. Ulapane, C. H. Dhanapala, S. M. Wickramasinghe, S. G. Abeyratne, N. Rathnayake and P. J. Binduhewa, "Extraction of parameters for simulating photovoltaic panels," 2011 6th International Conference on Industrial and Information Systems, Kandy, 2011, pp. 539-544.
- [5] M. S. Thomas and A. Nisar, "Data-driven modeling and simulation of PV array," 2015 2nd International Conference on Computing for Sustainable Global Development (INDIACom), New Delhi, 2015, pp. 308-313.
- [6] A. Fezzani, I. Hadj Mahammed and S. Said, "MATLAB-based modeling of shading effects in photovoltaic arrays," 2014 15th International Conference on Sciences and Techniques of Automatic Control and Computer Engineering (STA), Hammamet, 2014, pp. 781-787.
- [7] Ravi Nath Tripathi, A. Singh and M. Badoni, "A MATLAB-simulink-based solar photovoltaic array (SPVA) module with MPPT," 2013 International Conference on Emerging Trends in Communication, Control, Signal Processing and Computing Applications (C2SPCA), Bangalore, 2013, pp. 1-6.
- [8] R. Krishan, Y. R. Sood and B. Uday Kumar, "The simulation and design for analysis of photovoltaic system based on MATLAB," 2013 International Conference on Energy Efficient Technologies for Sustainability, Nagercoil, 2013, pp. 647-651.
- [9] A. Jenifer., N. R. Newlin, G. Rohini. and V. Jamuna., "Development of Matlab Simulink model for photovoltaic arrays," 2012 International Conference on Computing, Electronics and Electrical Technologies (ICCEET), Kumaracoil, 2012, pp. 436-442.
- [10] A. H. ALQahtani, "A simplified and accurate photovoltaic module parameters extraction approach using matlab," 2012 IEEE International Symposium on Industrial Electronics, Hangzhou, 2012, pp. 1748-1753.
- [11] M. Bouzguenda, T. Salmi, A. Gastli and A. Masmoudi, "Evaluating solar photovoltaic system performance using MATLAB," 2012 First International Conference on Renewable Energies and Vehicular Technology, Hammamet, 2012, pp. 55-59.
- [12] J. Kitson et al., "A photovoltaic panel modelling method for flexible implementation in Matlab/Simulink using datasheet quantities," 2017 IEEE 26th International Symposium on Industrial Electronics (ISIE), Edinburgh, 2017, pp. 946-951.

- [13] J. Kamala and J. V. Ashvini, "Stability of boost converter connected to a photovoltaic panel," in *Electronics and Communication System (ICECS)*, 2015 2nd International Conference on, 2015, pp. 97-102.
- [14] L. H. S. C. Barreto, P. P. Praça, G. A. L. Henn, R. A. Câmara, N. A. L. S. Ranoyca and D. S. Oliveira, "High voltage gain boost converter battery charger applied to PV systems," 2011 Twenty-Sixth Annual IEEE Applied Power Electronics Conference and Exposition (APEC), Fort Worth, TX, 2011, pp. 1526-1531.
- [15] G. Seshagiri Rao, S. Raghu and N. Rajasekaran, "Design of feedback controller for boost converter using optimization technique," 2013, pp. 117-128.
- [16] H. Sira-Ramírez and R. Silva-Ortigoza, "Control Design Techniques in Power Electronics Devices," 2006, Ed. Springer.
- [17] S. Siouane, S. Jovanović and P. Poure, "Service continuity of PV synchronous Buck/Buck-Boost converter with energy storage," 2017 IEEE International Conference on Environment and Electrical Engineering and 2017 IEEE Industrial and Commercial Power Systems Europe (EEEIC / I&CPS Europe), Milan, 2017, pp. 1-6.
- [18] K. A. Reddy, K. Srinivas and G. S. Ayyappan, "Simulation of power management circuit in a standalone solar photovoltaic-fuel cell-battery hybrid power system," 2015 IEEE IAS Joint Industrial and Commercial Power Systems / Petroleum and Chemical Industry Conference (ICPSPCIC), Hyderabad, 2015, pp. 168-173.
- [19] <https://eosweb.larc.nasa.gov/> / 2018.
- [20] I. H. Altas and A. M. Sharaf, "A Photovoltaic Array Simulation Model for Matlab-Simulink GUI Environment," 2007 International Conference on Clean Electrical Power, Capri, 2007, pp. 341-345.
- [21] Rahmani, M. Fard, A. A. Shojaei, M. F. Othman and R. Yusof, "A complete model of stand-alone photovoltaic array in MATLAB-Simulink environment," 2011 IEEE Student Conference on Research and Development, Cyberjaya, 2011, pp. 46-51.
- [22] T. Khatib, I. A. Ibrahim, and A. Mohamed, "A review on sizing methodologies of photovoltaic array and storage battery in a standalone photovoltaic system," *Energy Conversion and Management*, vol. 120, pp. 430-448, 7/15/2016.
- [23] D. Rekioua and E. Matagne, *Optimization of Photovoltaic Power Systems: modelization, simulation and control*: Springer London, 2012.

Anexo 1

En esta apartado se muestran las simulaciones realizadas para cada escenario propuesto:

Configuración: dos paneles fotovoltaicos en paralelo.

Niveles de irradiancia: promedio mínimo (figura 37).

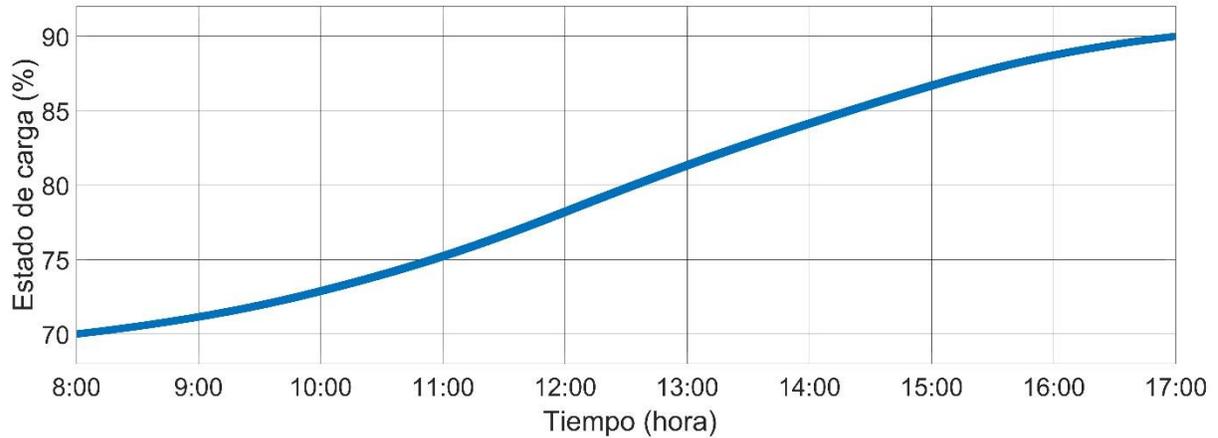


Figura A-1. Nivel de carga del banco de baterías.

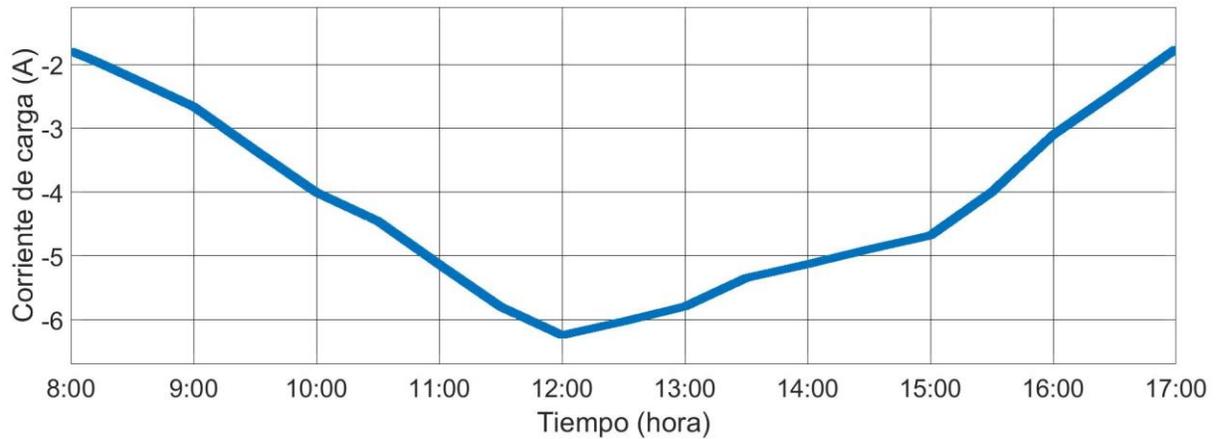


Figura A-2. Corriente de carga del banco de baterías.

Configuración: dos paneles fotovoltaicos en paralelo.

Niveles de irradiancia: promedio máximo (figura 40).

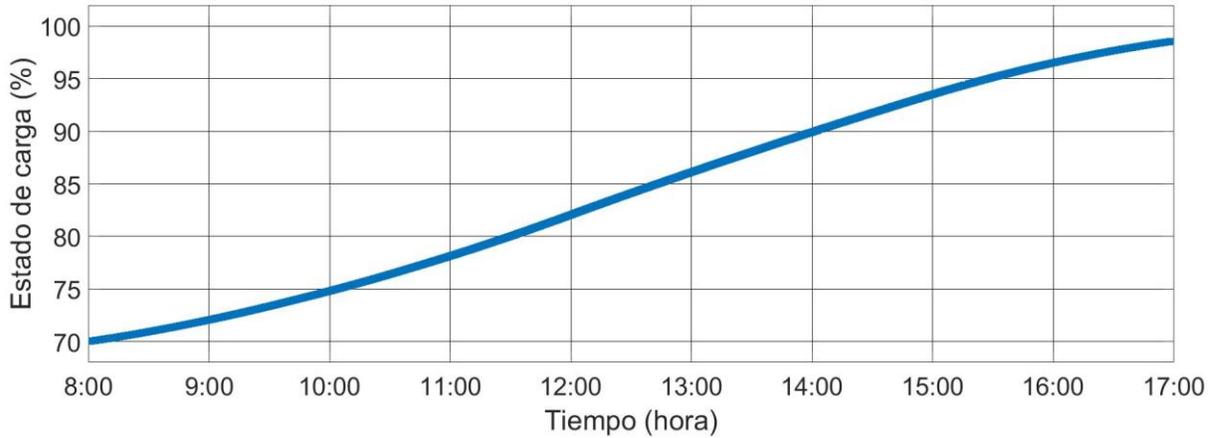


Figura A-3. Nivel de carga del banco de baterías.

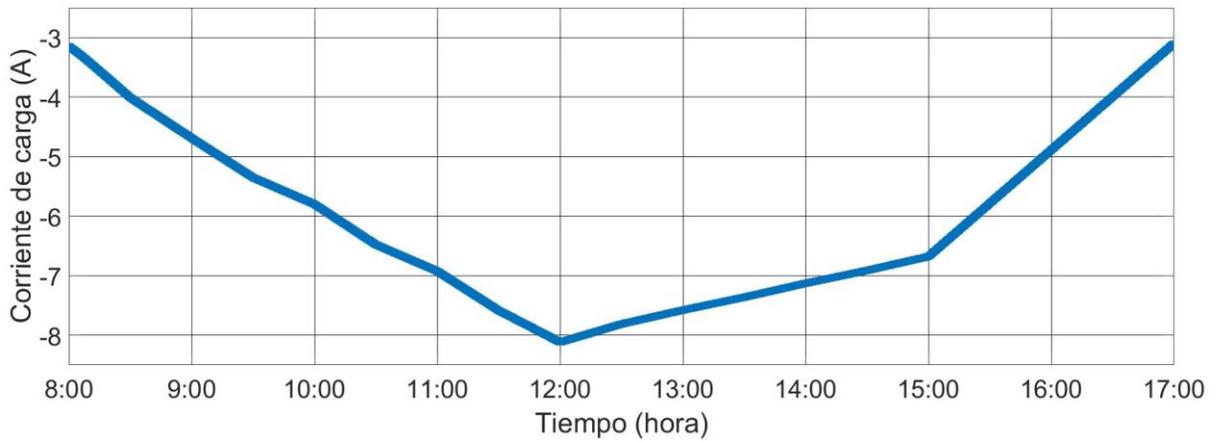


Figura A-4. Corriente de carga del banco de baterías.

Configuración: tres paneles fotovoltaicos en paralelo.

Niveles de irradiancia: promedio mínimo (figura 37).

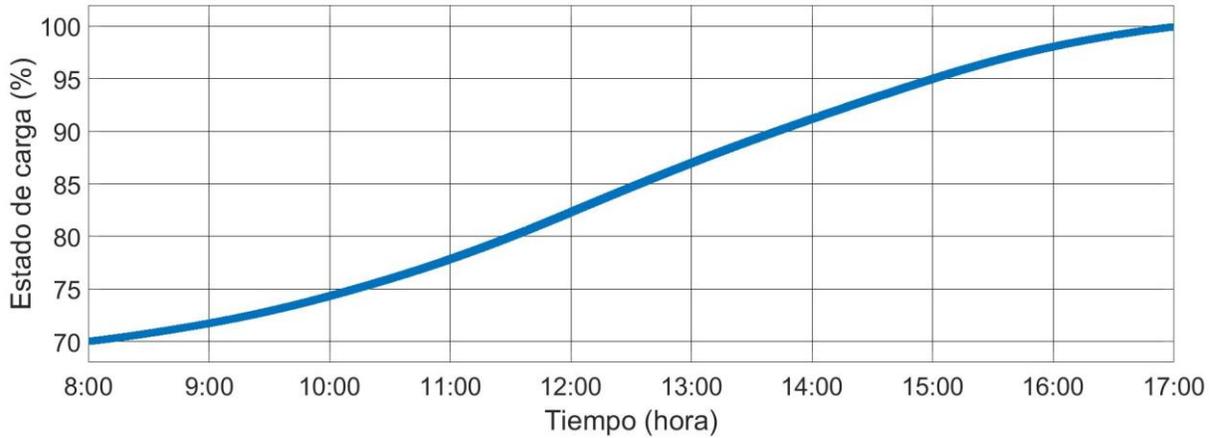


Figura A-5. Nivel de carga del banco de baterías.

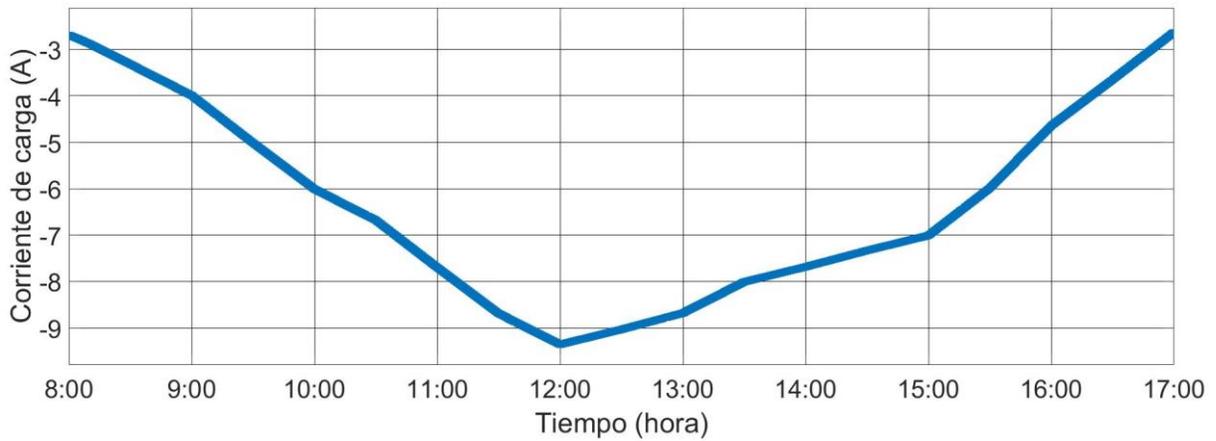


Figura A-6. Corriente de carga del banco de baterías.

Configuración: tres paneles fotovoltaicos en paralelo.

Niveles de irradiancia: promedio máximo (figura 40).

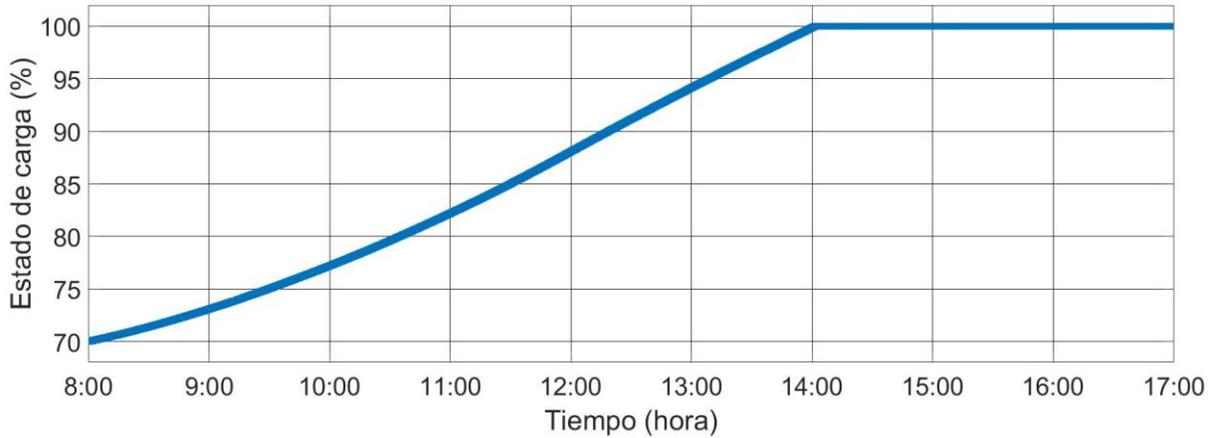


Figura A-7. Nivel de carga del banco de baterías.

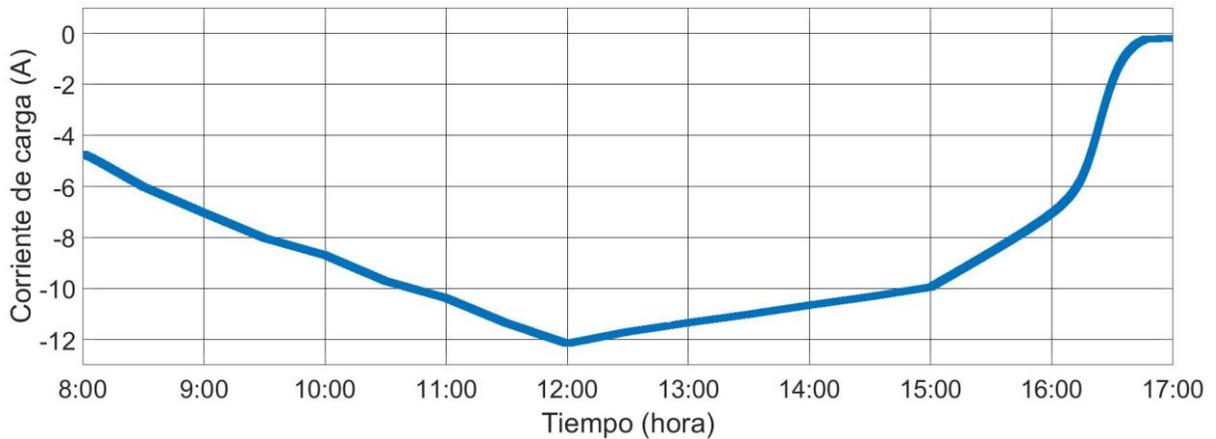


Figura A-8. Corriente de carga del banco de baterías.

Como se puede observar en las figuras A-1 y A-3 la configuración de dos paneles fotovoltaicos en paralelo resulta insuficiente para recargar el banco de baterías por completo. En ambos escenarios de irradiancia.

Posteriormente en las figuras A-5 y A-7 se puede observar que la configuración de tres paneles fotovoltaicos en paralelo consigue recargar por completo el banco de baterías. Sin embargo, para los niveles de irradiancia promedio mínimos, la recarga completa se concluye prácticamente al final del día. Con esto, no se puede garantizar que el banco de baterías quede completamente recargado siempre, ya que, puede existir el supuesto caso en el que la irradiancia del día sea ligeramente menor al promedio mostrado, o bien, que el uso del banco de baterías haya sido mayor la noche anterior y en consecuente éste presente un menor nivel de carga al iniciar la mañana.

Con base en los resultados anteriores, se establece que la recarga del banco de baterías se realice mediante cuatro paneles fotovoltaicos en paralelo. Las pruebas realizadas para esta configuración se muestran en el apartado 3.3.