



Tecnológico Nacional de México

**Centro Nacional de Investigación
y Desarrollo Tecnológico**

Tesis de Maestría

**Control de un convertidor bidireccional para la
óptima carga/descarga de baterías de un sistema
fotovoltaico**

presentada por

Ing. Ximena Olivares Pérez

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

Director de tesis

Dr. Jesús Darío Mina Antonio

Codirector de tesis

Dr. Alejandro Carlos Pérez Flores

Cuernavaca, Morelos, México. Agosto 2026



Centro Nacional de Investigación y Desarrollo Tecnológico
Departamento de Ingeniería Electrónica

Cuernavaca, Mor; **17/agosto/2026**

Oficio No. DIE/0169/2026

Asunto: Aceptación de documentos.

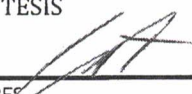
DR. CARLOS MANUEL ASTORGA ZARAGOZA
SUBDIRECTOR ACADÉMICO
PRESENTE

Por este conducto, los integrantes de Comité Tutorial de la **C. XIMENA OLIVARES PÉREZ**, con número de control **M23CE109** de la Maestría en Ciencias en Ingeniería Electrónica, le informamos que hemos revisado el trabajo de tesis profesional titulado **"CONTROL DE UN CONVERTIDOR BIDIRECCIONAL PARA LA ÓPTIMA CARGA/DESCARGA DE BATERÍAS DE UN SISTEMA FOTOVOLTAICO"**, 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 TESIS


Dr. JESÚS DARÍO MINA ANTONIO
Doctor en Ingeniería
Cédula profesional 6094069

CODIRECTOR DE TESIS


Dr. ALEJANDRO CARLOS PERÉZ FLORES
Doctor en Ciencias en Ingeniería Electrónica
Cédula profesional 12828238

REVISOR 1


M.C. ALFREDO GONZÁLEZ ORTEGA
Maestro en Ciencias en Ingeniería Electrónica
Cédula profesional 5695647

REVISOR 2


Dr. ABRAHAM CLAUDIO SÁNCHEZ
Doctor en Ciencias en Ingeniería Electrónica
Cédula profesional 7675050

C.c.p. Mtra. Verónica Sotelo Boyas. Jefa del Departamento de Servicios Escolares
Estudiante JGM/ibm



2026
año de
Margarita
Maza

Interior Internado Palmira S/N, Col. Palmira,
C.P. 62490, Cuernavaca, Morelos Tel. 01 (777) 3627770, ext. 2225,
e-mail: die@cenidet.tecnm.mx | cenidet.tecnm.mx

cenidet
Centro Nacional de Investigación
y Desarrollo Tecnológico





Centro Nacional de Investigación y Desarrollo Tecnológico
Subdirección Académica

Cuernavaca Mor, 21/agosto/2026

Oficio No. SAC/264/2026

Asunto: Autorización de impresión de tesis

XIMENA OLIVARES PÉREZ
CANDIDATA AL GRADO DE MAESTRA EN CIENCIAS
EN INGENIERÍA ELECTRÓNICA
P R E S E N T E

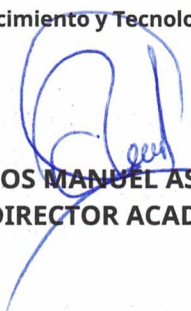
Por este conducto, tengo el agrado de comunicarle que el Comité Tutorial asignado a su trabajo de tesis titulado **"CONTROL DE UN CONVERTIDOR BIDIRECCIONAL PARA LA ÓPTIMA CARGA/DESCARGA DE BATERÍAS DE UN SISTEMA FOTOVOLTAICO"**, ha informado a esta Subdirección Académica, que están de acuerdo con el 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.

ATENTAMENTE

Excelencia en Educación Tecnológica®

"Conocimiento y Tecnología al servicio de México"


CARLOS MANUEL ASTORGA ZARAGOZA
SUBDIRECTOR ACADÉMICO



c.c.p. Departamento de Ingeniería Electrónica
Departamento de Servicios Escolares

CMAZ/lmz



2026
año de
Margarita
Maza

cenidet
Centro Nacional de Investigación
y Desarrollo Tecnológico



Resumen

En este trabajo de tesis se presenta el desarrollo de un sistema híbrido de energía, el cual integra un sistema fotovoltaico, un sistema de almacenamiento basado en baterías y la red eléctrica, considerando como caso de estudio una aplicación residencial. El trabajo se enfoca en los controles utilizados para realizar los procesos de carga y descarga del banco de baterías que integra el sistema y en la gestión del flujo de energía ante las condiciones cambiantes de generación fotovoltaica y de cargas.

El sistema utiliza un convertidor cd-cd de tipo Boost para la interfaz entre los paneles fotovoltaicos y el bus de CD, con un esquema de seguimiento del punto de máxima potencia (MPPT, por sus siglas en inglés). Para el sistema de almacenamiento basado en baterías, se emplea un convertidor cd-cd bidireccional Buck+Boost para realizar los procesos de carga y descarga.

Para los procesos de carga de baterías se implementa una estrategia de control de corriente constante-voltaje constante (CC-CV, por sus siglas en inglés), mediante un control tipo III; y un control de corriente mediante un controlador PI, para los procesos de descarga de baterías. Para el diseño de los controladores se considera el modelo de las baterías junto con el convertidor en modo de operación Buck.

Para probar el sub-sistema de carga/descarga de baterías ante condiciones muy variantes, en torno al sistema híbrido de energía se desarrolló una estrategia de gestión de energía (EMS, por sus siglas en inglés) basada en reglas, y que prioriza el aprovechamiento de la energía renovable de los paneles fotovoltaicos, pero que además decide los flujos de energía entre los diferentes sub-sistemas (paneles fotovoltaicos, baterías, red eléctrica, cargas). Este EMS, entre otros, es quien define las referencias de corriente de carga/descarga de las baterías.

Para la validación se realizaron pruebas en un entorno de simulación en el que se integran los diferentes subsistemas y controles que conforman a todo el sistema. Se realizan pruebas para evaluar el funcionamiento del sistema ante condiciones cambiantes de generación y demanda.

Abstract

This thesis presents the development of a hybrid energy system that integrates a photovoltaic system, a battery-based energy storage system, and the electrical grid, considering a residential application as a case study. The work focuses on the control strategies used for the charging and discharging processes of the battery bank integrated into the system, as well as on energy flow management under varying photovoltaic generation and load conditions.

The system employs a dc-dc Boost converter as the interface between the photovoltaic panels and the DC bus, incorporating a maximum power point tracking (MPPT) scheme. For the battery-based energy storage system, a bidirectional Buck-Boost dc-dc converter is used to perform the charging and discharging processes.

For the battery charging process, a constant-current/constant-voltage (CC-CV) control strategy is implemented using a Type III controller, while a PI current controller is employed for the battery discharging process. The design of the controllers considers the battery model together with the converter operating in Buck mode.

To evaluate the battery charging/discharging subsystem under highly variable operating conditions, an energy management system (EMS) based on rule-based control was developed for the hybrid energy system. The EMS prioritizes the utilization of renewable energy generated by the photovoltaic panels while also determining the energy flows among the different subsystems, namely, the photovoltaic panels, batteries, electrical grid, and loads. Among other functions, the EMS determines the battery charging and discharging current references.

For validation purposes, tests were conducted in a simulation environment integrating the different subsystems and control strategies that comprise the overall system. The tests evaluate the system performance under varying power generation and demand conditions.

A mis padres y hermanas, por ser un gran soporte en mi vida.
A mi compañero de vida, por siempre estar ahí para mí.

Agradecimientos

Agradezco a Dios por llenar mi vida de bendiciones y acercar a mi vida a personas que no solo me ayudaron a crecer académicamente, sino que también me ayudaron a crecer como persona. Gracias por todas las cosas buenas y las nuevas oportunidades que pones en mi camino.

A mis padres, Baltazar Olivares Hernández y María Esther Pérez Ponce por todo su amor, cariño y apoyo incondicional. Por no dejarme sola en cada paso que doy, por estar siempre presentes y por ser un gran ejemplo a seguir para mí. Aun no soy la persona que ustedes me enseñaron a ser, pero cada día me esfuerzo más por serlo.

A mis hermanas Ana Esther Olivares Pérez y Lizeth Olivares Pérez mis compañeras y confidentes, gracias por estar ahí para mí siempre que lo necesito, por sus consejos, por escucharme y sobre todo por su amor.

A mi compañero de vida, Diego Felipe Rosales García, que nunca me dejaste sola en ningún momento, por estar a mi lado y por buscar siempre la manera de reconfortarme e impulsarme para seguir adelante.

A mi familia y a mis amigos por todos los buenos momentos que pasamos juntos, gracias por su apoyo en cada uno de los proyectos que he iniciado y por alentarme a seguir con ellos.

A mis mascotas, Tammy y Puerquin, que me acompañaron en cada desvelo y cada paso de mi camino hasta que sus cuerpos ya no pudieron más. Aunque no estén físicamente conmigo sé que me acompañan desde el cielo. Y a Luna y Mora, gracias por sus travesuras, compañía y por alegrar mis días.

A mi director de tesis, el Dr. Jesús Darío Mina Antonio, por todo el apoyo, paciencia y orientación que me brindo a lo largo del desarrollo de este trabajo de tesis. Gracias por su esfuerzo y dedicación para que pudiera concluir con esta etapa.

A mi codirector de tesis, el Dr. Alejandro Carlos Pérez Flores por sus buenos consejos y palabras de apoyo que fueron de gran utilidad para el desarrollo de este trabajo de tesis, gracias por el tiempo dedicado al desarrollo de esta tesis.

A mis revisores, el Dr. Abraham Claudio Sánchez y el M. en C. Alfredo González Ortega por sus comentarios, observaciones y orientación en este trabajo de tesis.

Al Dr. Carlos Aguilar Castillo no solo por los conocimientos académicos que me compartió en esta etapa, sino también por todo el apoyo y consejos que me brindo en mi vida personal. Gracias por escucharme y por confiar en mí.

Al Centro Nacional de Investigación y Desarrollo Tecnológico (CENIDET) por brindarme las instalaciones y la posibilidad para poder realizar mis estudios de posgrado.

A la Secretaría de Ciencia, Humanidades, Tecnología e Innovación (SECIHTI) por el apoyo económico brindado durante este proceso, el cual me permitió continuar con mis estudios posgrado.

Contenido

Capítulo 1. Introducción	- 1 -
1.1 Antecedentes	- 1 -
1.2 Problemática	- 2 -
1.3 Estado del arte	- 3 -
1.4 Propuesta de solución.....	- 7 -
1.5 Objetivos	- 8 -
1.5.1 General	- 8 -
1.5.2 Específicos.....	- 9 -
1.6 Alcances y limitaciones	- 9 -
Capítulo 2. Definición de caso de estudio y diseño de subsistemas.....	- 10 -
2.1 Caso de estudio	- 10 -
2.2 Dimensionamiento de paneles fotovoltaicos	- 12 -
2.3 Dimensionamiento de baterías.....	- 13 -
2.4 Dimensionamiento del convertidor Boost para paneles	- 14 -
2.5 Dimensionamiento del convertidor bidireccional Buck+Boost para baterías.....	- 16 -
Capítulo 3. Diseño de controladores	- 21 -
3.1 Diseño de esquema MPPT para convertidor Boost.....	- 21 -
3.2 Diseño de control del convertidor Buck+Boost (modo Buck-carga) ..	23 -
3.2.1 Modelo de batería.....	- 25 -
3.2.2 Modelado del convertidor Buck+Boost (modo Buck) con batería..	- 28 -
3.2.3 Función de transferencia corriente-ciclo de trabajo.....	- 30 -
3.2.4 Diseño del controlador tipo III para control de corriente (carga)	- 31 -
3.2.5 Función de transferencia voltaje-ciclo de trabajo.....	- 33 -
3.2.6 Diseño del controlador tipo III para control de voltaje (carga)	- 34 -
3.3 Diseño de control de corriente del convertidor Buck+Boost (modo Boost-descarga)	- 35 -
3.3.1 Modelado del convertidor Buck+Boost (modo Boost)	- 35 -
3.3.2 Función de transferencia corriente-ciclo de trabajo.....	- 37 -
3.3.3 Diseño del controlador PI para control de corriente (descarga).....	- 38 -
Capítulo 4. Diseño del sistema de administración de energía	- 40 -
Capítulo 5. Pruebas de simulación y resultados	- 46 -
Capítulo 6. Conclusiones y trabajos futuros	- 56 -
Referencias	- 59 -

Anexo A	- 62 -
Anexo B	- 63 -

LISTA DE FIGURAS

FIGURA 1. ESQUEMA GENERAL DE UN SISTEMA FOTOVOLTAICO CONECTADO A LA RED.	- 2 -
FIGURA 2. PERFIL DE POTENCIA FOTOVOLTAICA Y POTENCIA DE CARGA [5]... -	3
FIGURA 3. SISTEMA FOTOVOLTAICO CONECTADO A LA RED CON BESS [6]. ..	- 4 -
FIGURA 4. CONVERTIDOR BUCK+BOOST [6].....	- 4 -
FIGURA 5. ESQUEMA DEL SISTEMA PROPUESTO.	- 8 -
FIGURA 6. PERFILES DE DEMANDA ENERGÉTICA.	- 10 -
FIGURA 7. PERFIL DE DEMANDA DEL DÍA SELECCIONADO.....	- 11 -
FIGURA 8. PERFILES DE IRRADIANCIA.	- 12 -
FIGURA 9. CONSUMO DE CARGAS Y POTENCIA ENTREGADA POR EL ARREGLO DE PANELES.	- 13 -
FIGURA 10. CONVERTIDOR BOOST.....	- 14 -
FIGURA 11. SIMULACIÓN DEL CONVERTIDOR BOOST CONECTADO A LA SALIDA DE PANELES.	- 15 -
FIGURA 12. SEÑALES DEL VOLTAJE Y CORRIENTE DEL PANEL.	- 16 -
FIGURA 13. SEÑALES DE VOLTAJE Y CORRIENTE DE SALIDA DEL CONVERTIDOR BOOST.	- 16 -
FIGURA 14. CIRCUITO CONVERTIDOR BUCK+BOOST.....	- 17 -
FIGURA 15. A) CONVERTIDOR OPERANDO EN MODO BOOST, B) CONVERTIDOR OPERANDO EN MODO BUCK.....	- 17 -
FIGURA 16. ESQUEMA PARA SIMULACIÓN DEL CONVERTIDOR EN MODO BOOST.....	- 18 -
FIGURA 17. SEÑALES OBTENIDAS DEL CONVERTIDOR MODO BOOST.	- 19 -
FIGURA 18. ESQUEMA PARA SIMULACIÓN DEL CONVERTIDOR EN MODO BUCK.....	- 19 -
FIGURA 19. SEÑALES OBTENIDAS A LA SALIDA DEL CONVERTIDOR EN MODO BUCK.....	- 20 -
FIGURA 20. CURVA DE POTENCIA-VOLTAJE.	- 22 -
FIGURA 21. ESQUEMA DE LA SIMULACIÓN	- 22 -
FIGURA 22. SEÑAL DE LOS VALORES DE IRRADIANCIA.	- 23 -
FIGURA 23. SEÑALES OBTENIDAS A LA SALIDA DEL CONVERTIDOR BOOST CONECTADO A LA SALIDA DE PANELES.	- 23 -
FIGURA 24. MÉTODO DE CARGA DE BATERÍAS CC-CV.....	- 24 -
FIGURA 25. A) CIRCUITO EQUIVALENTE THEVENIN, B) CIRCUITO ELÉCTRICO DE BATERÍA [27].	- 26 -
FIGURA 26. MODELO DE SHEPHERD.....	- 27 -
FIGURA 27. ESQUEMA DE SIMULACIÓN DEL MODELO DE BATERÍA.	- 27 -
FIGURA 28. DESCRIPCIÓN DEL PROCESO DE IDENTIFICACIÓN DE COEFICIENTES DEL MODELO DE BATERÍA DE SHEPHERD, A PARTIR DEL BLOQUE DE BATERÍA DE SIMULINK.....	- 28 -
FIGURA 29. CIRCUITO CONVERTIDOR BUCK MÁS MODELO SIMPLIFICADO DE BATERÍA.....	- 29 -
FIGURA 30. SEÑAL DE RESPUESTA DEL CONTROL DE CORRIENTE EN MODO BUCK.....	- 33 -
FIGURA 31. SEÑALES DE VOLTAJE OBTENIDAS DEL CONTROL VOLTAJE EN MODO BUCK.	- 35 -

FIGURA 32. ESQUEMA DE SIMULACIÓN CONTROL-PLANTA DEL CONVERTIDOR EN MODO BOOST.....	- 38 -
FIGURA 33. RESPUESTA DEL CONTROL PI PARA EL CONTROL DE CORRIENTE DE DESCARGA EN EL CONVERTIDOR EN MODO BOOST.....	- 39 -
FIGURA 34. SEÑAL DE RESPUESTA DEL CONTROL DE CORRIENTE DE DESCARGA EN MODO BOOST.....	- 39 -
FIGURA 35. DIAGRAMA DE FLUJO DE EMS PROPUESTO.....	- 42 -
FIGURA 36. PRUEBA DE LA ESTRATEGIA DE EMS PARA UN DÍA. POTENCIAS DEL SFV, DE LAS CARGAS, DE LA RED; Y SOC DE BATERÍAS.....	- 43 -
FIGURA 37. PRUEBA DE LA ESTRATEGIA DE EMS. POTENCIA DE BATERÍAS Y SOC.....	- 44 -
FIGURA 38. PRUEBA DE LA ESTRATEGIA DE EMS DE CUATRO DÍAS. POTENCIAS DEL SFV, DE LAS CARGAS, DE LA RED; Y SOC DE BATERÍAS.....	- 45 -
FIGURA 39. PRUEBA DE LA ESTRATEGIA DE EMS PARA CUATRO DÍAS. SOC Y POTENCIA DE BATERÍAS.	- 45 -
FIGURA 40. ESQUEMA DEL DIAGRAMA DE SIMULACIÓN DEL SISTEMA PROPUESTO.	- 46 -
FIGURA 41. SECCIÓN DEL EMS Y LA CORRIENTE DE REFERENCIA EN EL SISTEMA.....	- 47 -
FIGURA 42. MODELO DEL CONVERTIDOR BUCK+BOOST.....	- 48 -
FIGURA 43. BLOQUE PARA EL CONTROL DEL PROCESO DE DESCARGA DE BATERÍAS (MODO BOOST).....	- 48 -
FIGURA 44. BLOQUE PARA EL CONTROL DEL PROCESO DE CARGA DE BATERÍAS (MODO BUCK).....	- 49 -
FIGURA 45. MODELO DE BATERÍAS.....	- 49 -
FIGURA 46. PRUEBA DE UN DÍA. POTENCIA DEL SFV, DE LAS CARGAS, DE LA RED Y DE BATERÍAS.....	- 50 -
FIGURA 47. SEÑALES DE LAS BATERÍAS. VOLTAJE, CORRIENTE, POTENCIA Y SOC.....	- 51 -
FIGURA 48. SEÑALES OBTENIDAS DE LA CORRIENTE DE REFERENCIA Y CORRIENTE DE BATERÍA.....	- 52 -
FIGURA 49. SEÑALES DE CORRIENTE DE REFERENCIA Y CORRIENTE DE BATERÍA. CONTROL DE CORRIENTE EN MODO BOOST.....	- 53 -
FIGURA 50. SEÑALES DE CORRIENTE DE REFERENCIA Y CORRIENTE DE BATERÍA. CONTROL DE CORRIENTE EN MODO BUCK.....	- 53 -
FIGURA 51. PRUEBA DE CUATRO DÍAS. POTENCIA DEL SFV, DE LAS CARGAS, DE LA RED Y DE BATERÍAS.	- 54 -
FIGURA 52. SEÑALES DE LAS BATERÍAS. VOLTAJE, CORRIENTE, POTENCIA Y SOC.....	- 55 -

LISTA DE TABLAS

TABLA 1. RESUMEN DE COMPONENTES CLAVES DE SFV CON BESS INTERCONECTADO A RED.	- 5 -
TABLA 2. PERFIL DE CARGAS.	- 11 -
TABLA 3. CARACTERÍSTICAS ELÉCTRICAS DEL MODELO DE PANEL JAM54S30- 420/MR.	- 13 -
TABLA 4. PARÁMETROS DE LA BATERÍA.	- 14 -
TABLA 5. PARÁMETROS DE DISEÑO DEL CONVERTIDOR BOOST.	- 14 -
TABLA 6. PARÁMETROS DE DISEÑO DEL CONVERTIDOR BUCK+BOOST.	- 17 -

Capítulo 1. Introducción

En este capítulo se presenta el contexto general del presente trabajo de tesis y se plantea la problemática relacionada a la generación de energía mediante fuentes renovables, más específicamente sobre la generación de energía fotovoltaica. De igual manera se presenta el estado del arte de sistemas fotovoltaicos conectados a la red con sistema de almacenamiento.

La revisión del estado del arte muestra los distintos convertidores implementados para la interfaz con los paneles solares y para los procesos de carga y descarga de baterías, así como los esquemas de control utilizados y las estrategias de sistema de gestión de energía

Finalmente se concluye con los objetivos planteados para esta tesis al igual que los alcances y limitaciones de la misma.

1.1 Antecedentes

La generación de energía eléctrica ha ido en aumento con el paso de los años debido al creciente uso que se le da día con día, sin embargo, el generar energía de manera convencional provoca daños en el ambiente dado que se hace uso de hidrocarburos para poder generarla.

Es a causa de esta razón que se han buscado diversas alternativas para la generación de energía que sean más amigables con el ambiente, dando así paso al uso de las energías renovables (RE, por sus siglas en inglés, renewable energy). Existen diferentes tipos de RE, siendo la energía solar y la energía eólicas las más usadas en el mundo, siendo la energía solar la más amplia que se dispone actualmente [1] [2]. En [3] se presenta un registro de la capacidad de RE existente en el mundo, las cuales presentan un aumento desde el 2015, teniendo un incremento del 140.27% de su capacidad en 2024, con una capacidad mundial de RE de 4,442,755 MW. Por su parte, México reporta una capacidad de 34,036 MW de RE, lo cual significó un crecimiento de 95.47% con respecto a 2015. Entre esta generación RE, la generación fotovoltaica (FV) ha representado un incremento por arriba del 3000% con respecto al 2015, cuando se tenía una capacidad de 295 MW, mientras que para el 2024 se logró una capacidad FV de 11,992 MW. De hecho, la generación FV representa al 99.33% de la generación RE en todo México [4].

Sin embargo, este tipo de fuentes naturales presentan una generación de energía variable debido a algunas variables climáticas como lo son la irradiancia y la temperatura; lo cual incluso puede implicar un mayor conflicto, cuando la demanda pico de energía es durante las noches, y es en esos periodos cuando los SFV no son capaces de generar. La implementación de sistemas de almacenamiento de energía en baterías (BESS, por sus siglas en inglés, Battery Energy Storage System) en los SFV como el que se observa en la Figura 1, no solo ayudan a los paneles a suministrar la energía requerida de manera estable, sino que también permiten tener una mayor independencia de la red eléctrica.

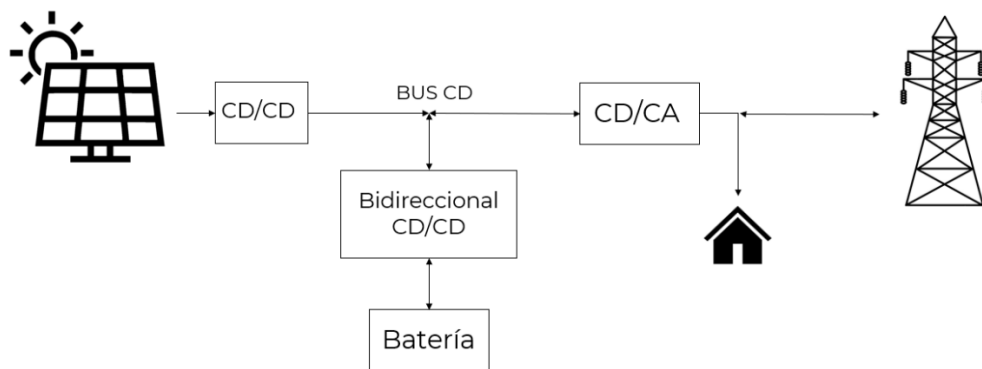


Figura 1. Esquema general de un sistema fotovoltaico conectado a la red.

1.2 Problemática

Como se ha mencionado, la generación FV presenta una naturaleza estocástica, debido a que depende de las condiciones ambientales; esto hace que se constituya como una fuente no despachable. Aunado a esto, también se encuentra el hecho de que en general, la demanda de energía de los usuarios no es constante, sino que también presenta una naturaleza estocástica. Estas circunstancias, plantean un desafío para la operación segura de un SFV y/o de las cargas que se alimentan con este tipo de sistemas.

En este sentido, existen configuraciones de SFV interconectados a la red, en donde se busca que el SFV provea el mayor porcentaje de la demanda, y la red puede servir como un sistema de respaldo. La red absorbe los excedentes de energía FV o suministra el faltante de energía cuando el SFV no tenga suficiencia de generación. Sin embargo, incluso estas configuraciones son perniciosas, ya que en el caso de los SFV especialmente, si bien durante las horas de sol alivian a la red eléctrica, no obstante, no son capaces de generar en periodos de falta de irradiancia (como en la noche), dejan de proveer a las cargas y de manera abrupta estas tienen que ser suplidas por la red eléctrica, lo cual puede derivar en transitorios severos que ponen en riesgo la operación de la red.

De aquí la conveniencia de integrar, junto con los SFV, los sistemas de almacenamiento de energía como los basados en baterías (BESS, por sus siglas en inglés). Con estos sistemas, es posible compensar dichas fluctuaciones de energía y asegurar la continuidad del mismo. Sin embargo, la distribución controlada de la energía entre los distintos sub-sistemas: SFV, BESS, Red, Cargas, implica otro reto que se debe resolver. Este tipo de tareas se pueden llevar a cabo mediante sistemas de gestión de energía (EMS, por sus siglas en inglés, Energy Management System). La función de un EMS es definir de manera óptima, y cuidando algunas restricciones técnicas, los valores o niveles de potencia que deben manejar cada uno de los subsistemas energéticos, entre otros, cuidando el balance entre generación y demanda, en cada instante de tiempo. En la Figura 2 se muestra la idea.

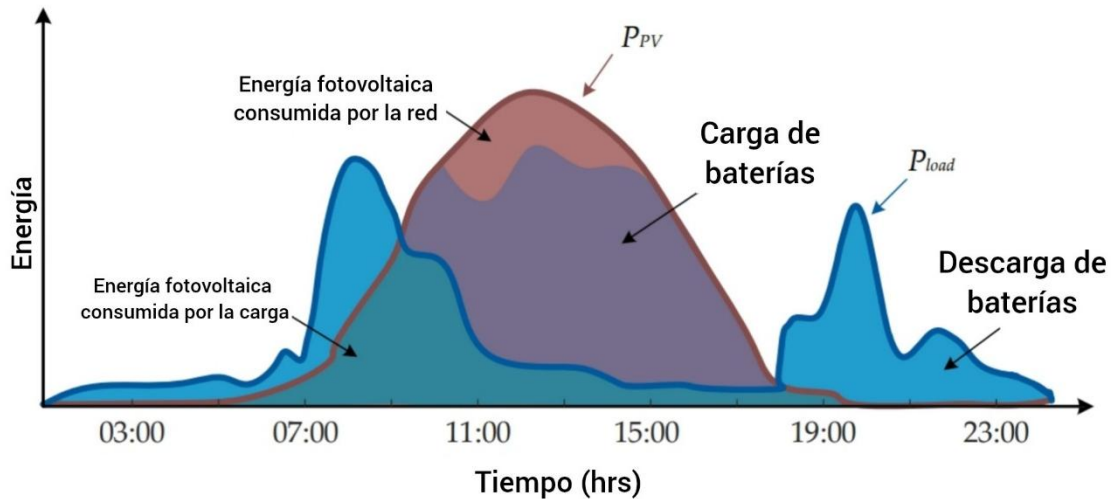


Figura 2. Perfil de potencia fotovoltaica y potencia de carga [5].

Por otro lado, es importante también distinguir el reto que significa para el BESS, a nivel local, el poder manejar una dinámica bastante cambiante, en un rango amplio de valores, de potencia o corriente de carga o descarga. Esta dinámica muy variable, como ya se ha dicho, se debe a la naturaleza cambiante de algunas de las fuentes y las cargas del sistema energético; y también, se debe a las decisiones que toma el EMS para mantener el equilibrio y la eficiencia operacional. En este sentido, este proceso de alta exigencia de carga/descarga en el BESS se puede llevar a cabo mediante el diseño apropiado de una correspondiente interface de potencia y los controles para estos dos procesos (carga/descarga).

1.3 Estado del arte

En relación con la problemática descrita, el estado del arte para esta tesis se basó en buscar información centrada en sistemas fotovoltaicos conectados a la red con sistema de almacenamiento que sirviesen para definir el caso de estudio y el desarrollo de los subsistemas que conforman al sistema propuesto.

Al mismo tiempo, la búsqueda realizada fue de utilidad para desarrollar los diferentes controles utilizados en el sistema, tales como el algoritmo de punto de máxima potencia y los controles de carga y descarga para las baterías.

En [6] se presenta un SFV conectado a la red como el que se muestra en la Figura 3, el cual emplea un BESS para reducir los problemas de fluctuación de energía presentes en los RE. El BESS es de 10 kWh y la demanda de energía de la carga (edificio) es de 11kWh/día. Para el proceso de carga/descarga de baterías se usa un convertidor bidireccional Buck+Boost (ver Figura 4), por medio de controladores tipo PI. En el sistema, se hace uso de un sistema de gestión de energía (EMS, por sus siglas en inglés, Energy Management System) basado en reglas, a partir de información de la potencia FV, el SOC de la batería, la potencia de carga y la potencia absorbida por la red.

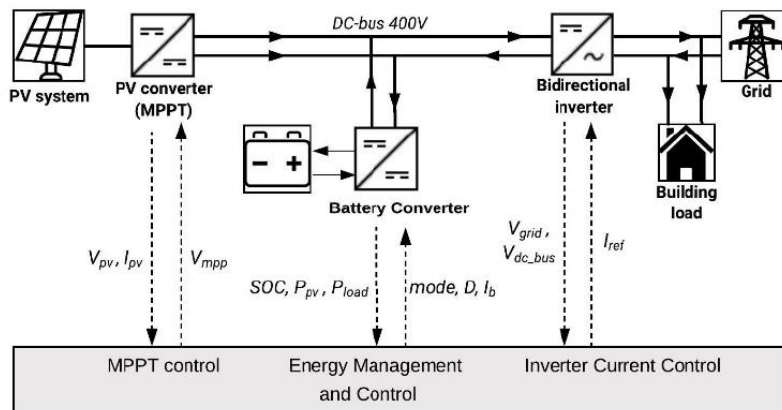


Figura 3. Sistema fotovoltaico conectado a la red con BESS [6].

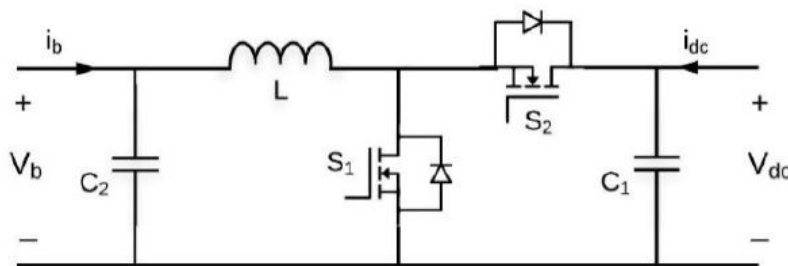


Figura 4. Convertidor Buck+Boost [6].

En [7] se describe un SFV conectado a red en conjunto con un BESS; el trabajo se centra en mitigar algunos problemas asociados a las fuentes de energía renovables, como es el caso de los armónicos, en relación a los requerimientos de los estándares IEC Standard 61727 e IEEE Standard 1547-2003. Se utiliza un convertidor Buck+Boost con controlador PI para controlar el voltaje y corriente de la batería. Para la conexión a la red se usa un inversor AFE (Active Front-End, por sus siglas en inglés) con filtro LCL, el cual usa los controles PI y PR para controlar el voltaje del DC-link y la corriente de red, respectivamente. Este último controlador es el que se encarga de reducir el contenido armónico en la corriente.

En [8] el SFV conectado a la red utiliza un convertidor elevador de inductor único (SLBC, por sus siglas en inglés, single-inductor Boost Converter) junto con el algoritmo de conductancia incremental (INC, por sus siglas en inglés, Incremental conductance) para obtener el MPPT. Un convertidor Buck+Boost se encarga de realizar los procesos de carga y descarga de las baterías; este convertidor bidireccional posee dos controles PI en cascada, uno para regular el voltaje del DC-link y otro para controlar la corriente de carga/descarga. El inversor es trifásico con filtro LC.

En [9] de igual manera se aborda un SFV con BESS, pero el trabajo se enfoca en el modelado y control del convertidor bidireccional (Buck+Boost) que alimenta al BESS. Se realiza un análisis en pequeña señal para obtener las funciones de transferencia para desarrollar los controles, que en este caso también son duales o en cascada, un PI para la regulación del DC-link y otro para la corriente. La carga se hace mediante el método CC-CV (constant current-constant voltage). El EMS es un esquema sencillo en donde se cuida el SoC del BESS y la potencia de batería resulta de comparar la potencia FV y la de carga.

En [10] se presenta un trabajo más enfocado en el diseño y control del inversor conectado a la red del SFV con BESS. Se utiliza un inversor trifásico con filtro L y el controlador es de tipo modos deslizantes adaptable (A-SMC, por sus siglas en inglés), ya que aborda problemas de

variaciones de parámetros. En relación a sus demás componentes, a la salida del arreglo de paneles se utilizó un convertidor Boost junto con el algoritmo de INC para obtener el MPPT; mientras que para el BESS se utilizó un convertidor Buck+Boost. De manera análoga, el EMS es un esquema de decisión sencillo basado en la comparación de la potencia FV, de la carga y la red, para determinar la potencia de batería; sin embargo, no toma en cuenta explícitamente el SoC.

En el SFV con BESS abordado en [11], se utiliza un convertidor elevador entrelazado (IBC, por sus siglas en inglés, Interleaved Boost Converter) de cuatro fases para aumentar los límites de corriente y potencia del panel. El algoritmo de MPPT es el de perturbar y observar (P&O). Para el BESS se usa un puente activo doble (DAB, por sus siglas en inglés, Dual Active Bridge). El inversor es de tipo trifásico, a través del cual se controla el DC-link. La estrategia de EMS está basada, solo en el valor del SoC.

En [12] el SFV que se aborda, utiliza un convertidor Boost con el algoritmo P&O para obtener el MPPT; no obstante, se utiliza un convertidor bidireccional Buck+Boost, en donde se emplean controles PI para realizar los procesos de carga y descarga del BESS. El inversor es trifásico y usa un control PI para mantener el DC-link constante. El trabajo está enfocado en la resiliencia del SFV en donde se distinguen cargas críticas y no críticas; por lo que el EMS evalúa la disponibilidad o no de la red y/o del SFV, para decidir la carga/descarga del BESS y asegurar energía para las cargas críticas.

En el trabajo [13], se trata un SFV conectado a red con BESS, en donde el análisis se centra en el control basado en modos deslizantes de segundo orden (SO-SMC, por sus siglas en inglés) para el MPPT a través de un convertidor Boost. No obstante, además, se analizan el subsistema de carga/descarga del BESS conformado por un Buck+Boost con controladores duales tipo PI, uno para la regulación del DC-link y otro para la corriente de batería. Se resalta de este trabajo, el uso del modelo de batería en lugar de una simple resistencia de carga. El inversor es de tipo trifásico, a través del cual se lleva a cabo una especie de refuerzo del control del DC-link, a través, de un control por histéresis. El EMS es un esquema lógico, basado en la comparación de la corriente de referencia provista por el Boost (corriente del SFV) y el SoC, por medio del cual se decide la corriente de batería.

En [14] se estudia un SFV conectado a red con BESS, para aplicaciones domésticas. Para el MPPT se utiliza un convertidor Boost controlado por un PID. Para el subsistema de carga/descarga del BESS se prueban dos convertidores, un tipo Buck+Boost y un tipo DAB, ambos con controladores tipo PID.

En la Tabla 1 se muestra un resumen de los artículos que presentan un SFV como el que se busca junto con los diversos componentes que lo integran. De igual manera se puede observar la aplicación para la que fueron utilizados, siendo las referencias [6], [7], [14] de más interés debido a que son sistemas enfocados en aplicaciones domésticas.

Tabla 1. Resumen de componentes claves de SFV con BESS interconectado a red.

Referencia	Año	Conver tidor CD-CD	MPPT	Convertidor bidireccional CD-CD	Control	Aplicación	Condiciones de operación
[6]	2019	Boost		Buck+Boost	PI	Sistema fotovoltaico conectado a la red, para	Consumo: 11kWh/día Voltaje de Bus DC: 400V

						aplicaciones a edificios	Capacidad batería: 200Ah
[7]	2024	Boost		Buck+Boost	PI	Sistema fotovoltaico conectado a la red, para aplicaciones a edificios	Consumo: 10kW Voltaje de Bus DC: 400V Capacidad batería: 50 Ah
[8]	2021	SLBC	INC	Buck+Boost	PI	Sistema fotovoltaico conectado a la red	Consumo: NA Voltaje de Bus DC: 700V Capacidad batería: NA
[9]	2022	----		Buck+Boost	Back-stepping adaptativo	Modelado de convertidor conectado a red	
[10]	2018	Boost	INC	Buck+Boost		Sistema fotovoltaico conectado a la red	Consumo: NA Voltaje de Bus DC: 500V Capacidad batería: NA
[11]	2023	IBC	P&O	DAB		Sistema fotovoltaico conectado a la red	Consumo: NA Voltaje de Bus DC: 800V Capacidad batería: 106 Ah
[12]	2020	Boost	P&O	Buck+Boost	PI	Sistema fotovoltaico conectado a la red	Consumo: 10kW Voltaje de Bus DC: 750 V Capacidad batería: 10 Ah
[13]	2020	Boost	SO-SMC	Buck+Boost	PI	Sistema fotovoltaico conectado a la red	Consumo: NA Voltaje de Bus DC: 500V Capacidad batería: NA
[14]	2019	Boost	PID	DAB Buck+Boost	PID	Sistema fotovoltaico conectado a la red, para aplicaciones domesticas	Consumo: 12 kWh Voltaje de Bus DC: 370V Capacidad batería: 40Ah

En general, se aprecia que para la parte del SFV, el convertidor más utilizado es el convertidor Boost junto con esquemas convencionales como P&O o INC, para el MPPT. En cuanto al subsistema de BESS, se suele utilizar un convertidor bidireccional Buck+Boost, controlado mediante controladores tipo PI para la carga/descarga. Es importante resaltar aquí, que la mayoría diseña y prueba sus controles de carga/descarga tratando a la batería

como una carga resistiva; y son escasos los trabajos que contemplan el modelo dinámico de la batería dentro del control. Por limitaciones en el alcance de este trabajo, la parte inversora, filtro e interconexión a red, no serán tomadas en cuenta de manera explícita, razón por la cual no se resume lo encontrado sobre inversores en esta revisión.

Por otro lado, en cuanto a los esquemas o enfoques de EMS para SFV con BESS e interconectados a la red, que es el tipo de sistemas que interesa en este trabajo, de acuerdo con la revisión de algunos trabajos, se encontró lo siguiente.

La mayoría de los trabajos plantean un esquema de EMS basado en reglas o en un algoritmo de decisión lógica, en donde, en la generalidad, se evalúa la información de la potencia actual de carga, contra la potencia fotovoltaica, para decidir cuánta potencia se le demanda o envía al BESS, y/o cuanta potencia se le demanda o envía a la red [6], [9], [10], [11], [12], [13], [15], [16]. No obstante, algunas diferencias son, por ejemplo, como en [6], [15], [17] que además de lo previo, sí toma en cuenta el valor del SOC del BESS; o como en [11] donde, por el contrario, el EMS sólo se basa en el valor del SoC; o como [10] que no toma en cuenta explícitamente el SoC. Otra variante de EMS es en la que además del SoC, se toma en cuenta el valor del voltaje en el DC-link, para decidir en qué medida se carga/descarga el BESS [16], [17].

En general, estos esquemas de EMS no están basados explícitamente en algún criterio de optimización, más bien, como están basados en reglas, una de las reglas principales es, que se aproveche al máximo la potencia del SFV. Sin embargo, hay algunos enfoques particulares, como es, cuidar la salud del BESS, esto mediante la definición de cotas o límites en la profundidad de descarga y/o definiendo valores mínimos y máximos en el SoC, a modo de restricciones operativas. Otros enfoques pueden ser, definir las reglas de decisión, basado en la idea de reducir la demanda de los consumidores durante las horas pico de consumo de energía [15]; o ante condiciones de contingencia, por ejemplo, monitorear la disponibilidad o no de la red y/o del SFV, para decidir la carga/descarga del BESS, además de distinguir entre cargas no críticas y críticas [12].

Derivado de esta revisión, se identificaron principalmente: algunos sistemas energéticos de tipo SFV-BESS interconectados a red, así como aplicaciones de tipo doméstico; esquemas de EMS para este tipo de sistemas; tipos de convertidores cd-cd para las interfaces paneles fotovoltaicos-bus de CD y bus de CD-BESS; tipos de controladores para MPPT y para el proceso de carga/descarga del BESS; así como métodos de carga de baterías. A partir de esto se plantea la propuesta de solución que se indica en las siguientes secciones.

1.4 Propuesta de solución

Como caso de estudio, se aborda el sistema que se muestra en la Figura 5, que trata de un SFV con BESS interconectado a red, para aplicaciones de tipo residencial. Dado que el trabajo está centrado en el subsistema de carga/descarga del BESS, en el contexto de un EMS dinámico para el SFV, aquí no se aborda de manera explícita el subsistema del inversor-filtro-controlador de inversor y la red eléctrica; en general, se asume que las potencias de red y de carga convergen en el bus de CD, así como también ahí lo hacen las potencias del SFV y del BESS.

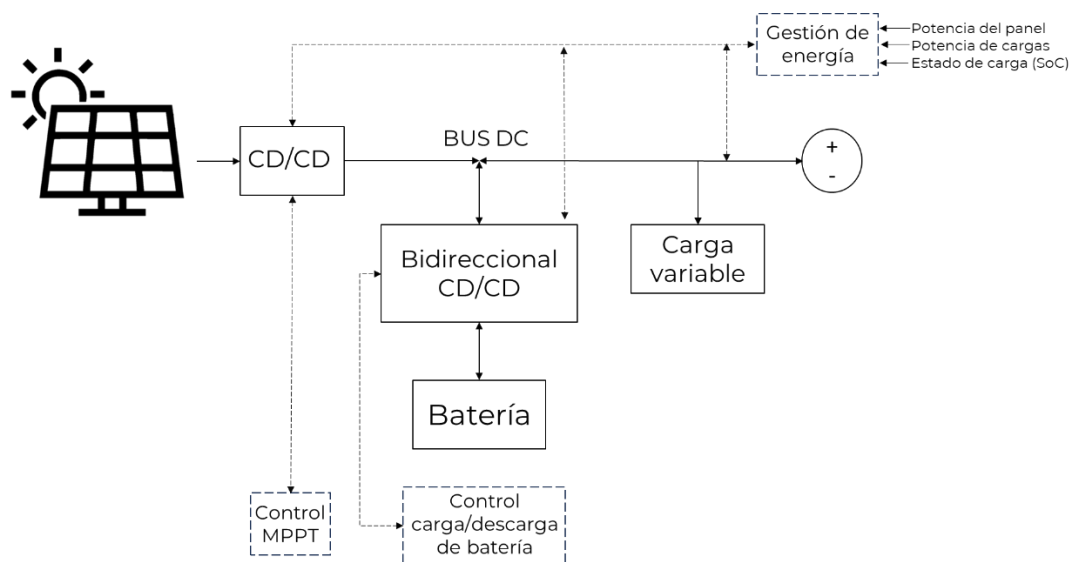


Figura 5. Esquema del sistema propuesto.

Para el convertidor cd-cd de interface entre paneles y bus de CD se utiliza un convertidor tipo Boost, a través del cual se implementará un esquema de MPPT basado en conductancia incremental. Por su parte, para el control del flujo de energía entre el Bus de CD y el banco de baterías, se propone el uso de un convertidor bidireccional Buck+Boost. Este convertidor opera en dos modos de operación y será el encargado de realizar los procesos de carga y descarga de las baterías, de acuerdo con los requerimientos energéticos en el sistema.

En el modo de operación Buck, correspondiente a la carga de baterías, se plantea una estrategia de control de corriente constante-voltaje constante (CC-CV), considerando el modelado de la batería. En este modo se diseña un control Tipo III. Por otro lado, para el modo de operación Boost, encargado de la descarga de baterías, se adopta una estrategia de control corriente-constante (CC), en este modo se diseña un control PI. Esto con el propósito de asegurar procesos adecuados y seguros de carga y descarga, preservando la vida útil de las baterías y evitando profundidades de descarga no deseadas.

Para probar el proceso de carga/descarga en un contexto más realista o más dinámico, se implementa un sistema de gestión de energía (EMS, por sus siglas en inglés, Energy Management System), quien se encargará de distribuir de manera automática y eficiente, el flujo de energía entre los diferentes subsistemas (paneles, baterías, carga, red). Debe distinguirse que esta gestión de energía se debe hacer ante las condiciones variantes de la generación fotovoltaica y de la demanda de energía por parte de la carga, lo cual significa que existirá también, variabilidad en la cantidad de energía que se le demande/inyecte a la red, así como variabilidad en la cantidad de energía que se pueda cargar/descargar hacia/desde las baterías.

1.5 Objetivos

1.5.1 General

Implementar un controlador para el proceso de carga y descarga del banco de baterías de un sistema fotovoltaico interconectado a red, ante las condiciones cambiantes de la irradiancia y demanda de energía.

1.5.2 Específicos

- Revisión del estado del arte para definir el caso de estudio y las condiciones de operación.
- Diseñar los diferentes subsistemas del caso de estudio.
- Diseñar un sistema de gestión de energía.
- Diseñar el control de carga/descarga de baterías.
- Evaluar el desempeño del sistema.

1.6 Alcances y limitaciones

En este trabajo se lleva a cabo el dimensionamiento y/o desarrollo de los diferentes subsistemas que integran al sistema propuesto (Figura 5). Esto es:

- La caracterización de la demanda de potencia por parte de las cargas (edificio de tres departamentos)
- La caracterización de la irradiancia disponible en la zona de interés (en este caso, el municipio de Jojutla, Morelos)
- La selección y dimensionamiento del conjunto de paneles fotovoltaicos
- La selección y dimensionamiento del banco de baterías
- El dimensionamiento y modelado del convertidor Boost
- El dimensionamiento y modelado del convertidor Buck+Boost
- El diseño del esquema de MPPT
- El modelado de las baterías
- El diseño de cada uno de los dos controladores tipo III, para la carga de baterías, según la etapa del método cc-cv (controlador modo corriente y controlador modo voltaje)
- El diseño del controlador tipo PI, para la descarga de baterías (controlador modo corriente)
- El diseño del esquema de EMS basado en reglas

Como nota adicional, se resalta que en el dimensionamiento del SFV-BESS se procurará que el sistema sea auto-suficiente energéticamente y dependa, en la medida de lo posible, muy poco de la red eléctrica; además, de que el EMS, entre otras restricciones, debe cuidar los niveles de carga/descarga del BESS, a través, del adecuado monitoreo de su estado de carga (SoC por sus siglas en inglés, de State of Charge).

Los datos para la definición del perfil de carga y de potencia fotovoltaica se toman de datos reales del mes de septiembre del año 2024.

El funcionamiento del sistema se prueba mediante simulaciones, a través de un simulador del sistema completo implementado en el entorno de *Simulink de Matlab®*.

Capítulo 2. Definición de caso de estudio y diseño de subsistemas

En este capítulo se definen las condiciones de operación del sistema propuesto y se realiza el dimensionamiento de los principales subsistemas que lo conforman. El caso de estudio corresponde a un sistema fotovoltaico conectado a la red con sistema de almacenamiento.

El dimensionamiento de los diferentes subsistemas como lo son el sistema de almacenamiento, el conjunto de paneles solares y los convertidores CD-CD utilizados se realiza de acuerdo a perfiles de potencia fotovoltaica y potencia de cargas conseguidos de la localidad de Jojutla, Mor.

2.1 Caso de estudio

La búsqueda del estado del arte fue de utilidad para llevar a cabo la selección de valores para las condiciones de operación del sistema propuesto, yendo de los perfiles de demanda energética, así como los perfiles de irradiancia. Esta investigación permitió centrar el sistema propuesto en un sistema fotovoltaico conectado a la red para aplicaciones domésticas.

Los valores para los perfiles de demanda energética para el sistema de esta tesis se basaron en datos obtenidos de [18], en donde se presenta datos de demanda energética de una casa en la localidad de Jojutla, Morelos durante el mes de septiembre del año 2024. Dichos datos presentan la cantidad de energía que era consumida durante las 24 horas del día de los 30 días del mes registrado. En la Figura 6, para propósitos ilustrativos, se muestra el perfil de cuatro días del muestreo de consumo de energía.

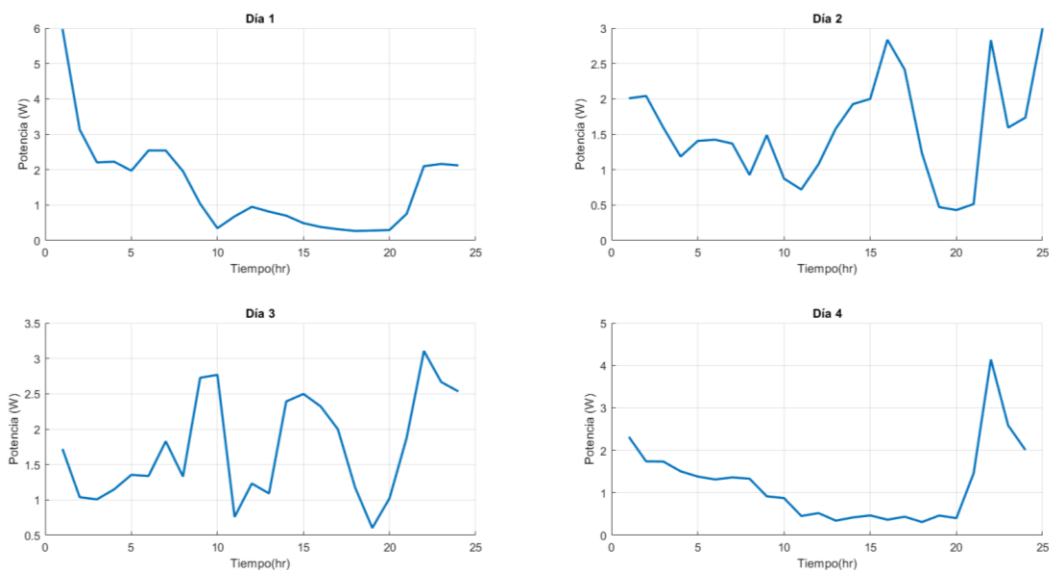


Figura 6. Perfiles de demanda energética.

Teniendo el registro de los perfiles de potencia de cargas se seleccionó un día representativo de consumo, cuyo perfil presentó una demanda de 3.94 kWh/día. En la Figura 7 se muestra el comportamiento del perfil de cargas a lo largo de las 24 horas correspondientes al día seleccionado.

Para el planeamiento del perfil de cargas se asumió un edificio con un conjunto de tres casas con el mismo perfil de consumo del día seleccionado. De esta manera, la demanda

total considerada para el sistema corresponde a la suma de los tres perfiles, resultando en 11.89 kWh/día. Este perfil fue utilizado para determinar el arreglo de paneles. En la Tabla 2 se muestra el perfil individual, así como el perfil del conjunto de las tres casas.

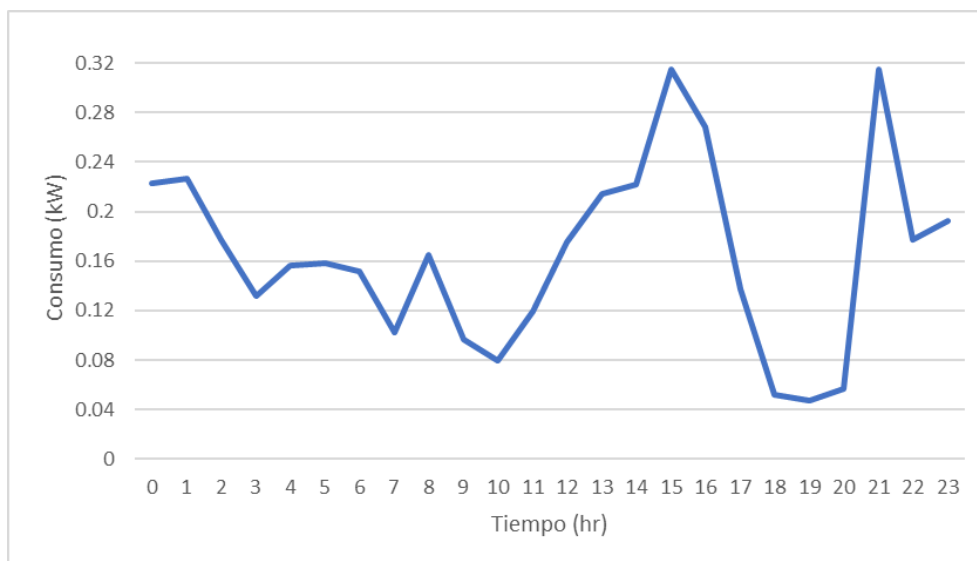


Figura 7. Perfil de demanda del día seleccionado.

Tabla 2. Perfil de cargas.

Hora	Consumo (W)	Consumo conjunto de casas (W)	Hora	Consumo (W)	Consumo conjunto de casas (W)
0	223.2	669.6	13	214.1	642.3
1	226.9	680.7	14	222.3	666.9
2	177.1	531.3	15	315.1	945.3
3	131.7	395.1	16	268.2	804.6
4	156.3	468.9	17	137	411
5	158.2	474.6	18	52.3	156.9
6	152.1	456.3	19	47.7	143.1
7	102.8	308.4	20	57.1	171.3
8	165.4	496.2	21	314.5	943.5
9	97.1	291.3	22	177.2	531.6
10	79.9	239.7	23	192.9	578.7
11	119.5	358.5	Total	3964.1	11892.3
12	175.5	526.5			

Los datos del perfil de irradiancia, que serían utilizados para obtener los valores de potencia del arreglo de paneles, fueron obtenidos de [19], en donde se proporcionan los datos de irradiancia del día y de la zona de interés para este trabajo. En la Figura 8 se muestra, de manera representativa, el perfil de irradiancia de cuatro días de la zona de interés.

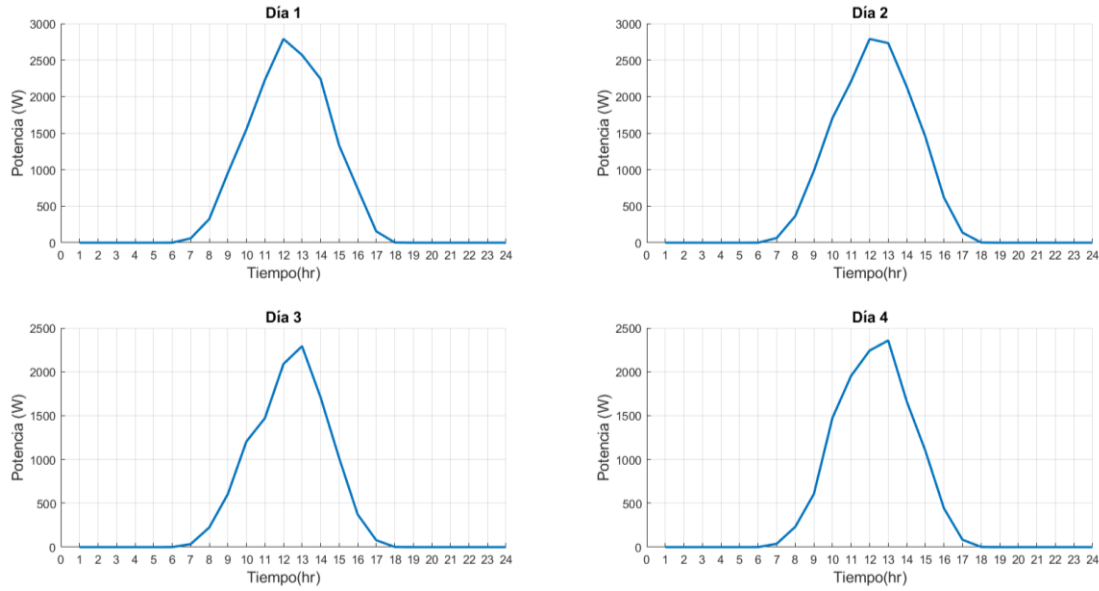


Figura 8. Perfiles de irradiancia.

2.2 Dimensionamiento de paneles fotovoltaicos

Una vez conociendo los perfiles de demanda que serían utilizados se continuó con el dimensionamiento de las diferentes partes que integran al sistema. Comenzando con el número de paneles necesarios para satisfacer la demanda de energía, para determinar este número se utilizó la ecuación (1) [20].

$$N_p = \frac{E_t}{HSP(0.9P_{max})} \quad (1)$$

N_p : Número de paneles

E_t : Energía total de las cargas (1día), con rendimiento del 75%

HSP : Horas solares pico

P_{max} : Potencia máxima del panel seleccionado

Las horas solares pico (HSP) se refiere a la cantidad de horas equivalente en las que la radiación solar alcanza una intensidad de 1000 W/m^2 , de acuerdo a [19] en la zona de interés se tiene una cantidad de horas solares pico de 5.21 h.

La energía total de las cargas (E_t), se obtiene de (2)(2)(2)(2)(2)(2)(2); en dónde el consumo seleccionado se estima con un rendimiento del 75%.

$$E_t = \frac{11.89 \text{ kWh/día}}{0.75} = 15.85 \text{ kWh/día} \quad (2)$$

Para determinar la cantidad de potencia que el panel puede suministrar (P_{max}), existen diferentes paneles comerciales los cuales especifican la cantidad de potencia que estos pueden entregar como por ejemplo el SOLARTEC, SunPower, Trina Solar, JA Solar, etc. Para este caso se seleccionó un panel que puede entregar una potencia máxima de 420 W, en

la Tabla 3 se muestran los parámetros eléctricos que este puede proporcionar en condiciones donde se presenta una irradiancia de 1000 W/m^2 y una temperatura de 25°C .

Tabla 3. Características eléctricas del modelo de panel JAM54S30-420/MR.

Módulo JAM54S30-420/MR	
Potencia máxima	420 W
Voltaje de circuito abierto (Voc)	37.58 V
Corriente de corto circuito (Isc)	14.10 A
Eficiencia del módulo	21.5%

Por lo que sustituyendo la ecuación (1) con los datos obtenidos de la potencia del panel seleccionado y de las ecuaciones (2) y (3), obtenemos que se requiere un total de 8 paneles para satisfacer a la demanda, los cuales, para este trabajo se conectaron en serie.

$$N_p = \frac{15.85 \text{ kWh/día}}{5.21 ((0.9)(420\text{W}))} = 8.04 \rightarrow 8 \text{ paneles}$$

2.3 Dimensionamiento de baterías

Para el análisis del dimensionamiento del BESS se tomó en cuenta la diferencia existente entre la demanda de potencia y la potencia que puede entregar el arreglo de paneles cuando este es capaz de suministrar la energía requerida de manera independiente, dicha diferencia se puede observar en el área sombreada de la Figura 9.

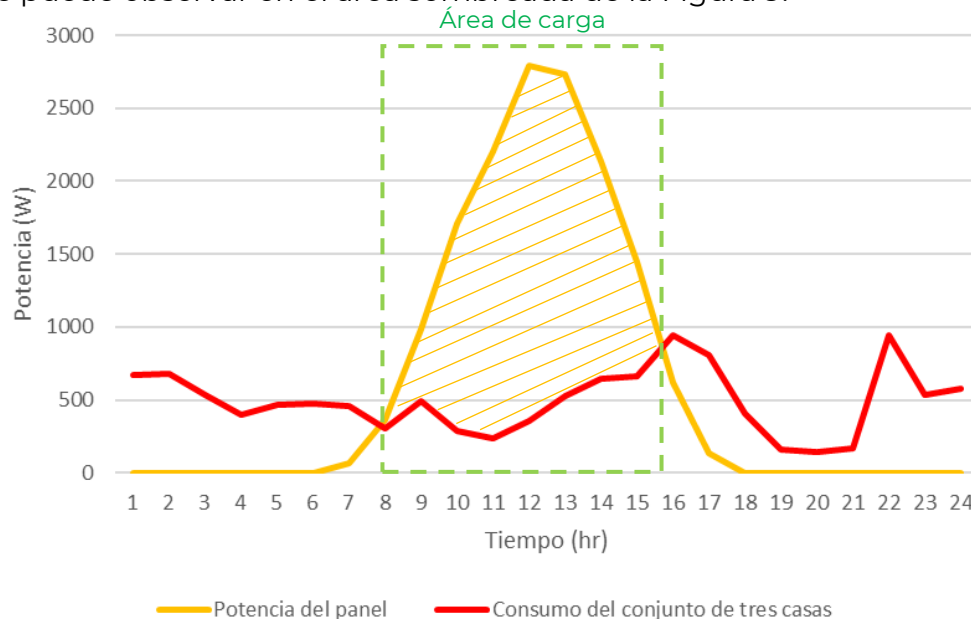


Figura 9. Consumo de cargas y potencia entregada por el arreglo de paneles.

La capacidad requerida de la batería se obtiene de la ecuación (3), en donde la energía excedente es el área bajo la curva del área sombreada en la Figura 9. Nótese que, además, se debe indicar un valor de profundidad de descarga (DoD, por sus siglas en inglés), que debe ser un valor seguro para las baterías, según su tipo de tecnología.

$$C = \frac{E_e}{V_{Bat}(DoD)} \quad (3)$$

E_e : Energía excedente
 V_{Bat} : Voltaje de la batería

De acuerdo a [21] para determinar la tensión para el almacenamiento de energía se recomienda que para cargas mayores a los 5 kW se utilice una batería igual o mayor a 48V. En este sentido, para este sistema se propone el uso de 4 baterías en serie para obtener un voltaje total de 192V. Con este valor se asegura una buena proporción entre el voltaje del bus de CD, en terminales del convertidor encargado de la carga/descarga de la batería, y el ciclo de trabajo (D).

Sustituyendo los valores de la ecuación (4), se obtienen los valores de la Tabla 4 para los parámetros de la batería seleccionada para este sistema.

$$C = \frac{7.73kW}{192V(0.7)} = 57.51 Ah$$

Tabla 4. Parámetros de la batería.

Parámetro	Valor
Voltaje nominal	48 V
Capacidad	60 Ah

2.4 Dimensionamiento del convertidor Boost para paneles

Debido a que es necesario elevar los niveles de tensión y potencia del arreglo de paneles se hace uso de un convertidor elevador Boost (Figura 10) para obtener los valores de tensión del bus de CD el cual está a la salida de este. Para realizar los cálculos de los elementos pasivos se asumieron las características de los paneles en las cuales se obtiene el punto de máxima potencia, es decir, cuando se tiene una irradiancia y temperatura de $1000 W/m^2$ y $25^\circ C$, respectivamente. En la Tabla 5 se muestran los parámetros de diseño.

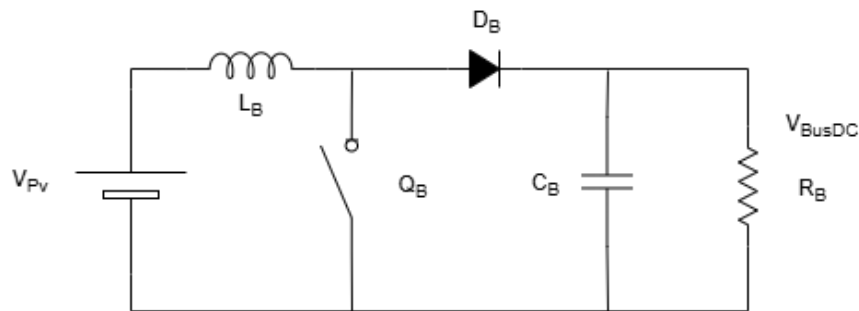


Figura 10. Convertidor Boost.

Tabla 5. Parámetros de diseño del convertidor Boost.

Parámetro	Valor
Potencia del convertidor	3.5 KW
Frecuencia de conmutación (f_s)	10 kHz
Ciclo de trabajo (D)	0.435
Voltaje de paneles (V_{PV})	254 V
Corriente de paneles (I_{PV})	13.77 A

Voltaje del bus de CD (V_{BusDC})	450 V
Corriente del bus de CD (I_{BusDC})	7.77 A
Rizo de corriente ($\Delta i_{L_B} = 0.05 I_{PV}$)	0.7 A
Rizo de voltaje ($\Delta v_{C_B} = 0.05 V_{BusDC}$)	22.5 V

Los valores del inductor y el capacitor se obtienen a partir de sustituir las ecuaciones (4) y (5), respectivamente, con los valores de la Tabla 5.

$$L_B = \frac{V_{PV} D}{\Delta i_{L_B} f_s} = \frac{254V(0.435)}{0.7A(10kHz)} = 16.059mH \quad (4)$$

$$C_B = \frac{I_{BusDC} D}{\Delta v_{C_B} f_s} = \frac{7.77A(0.435)}{22.5V(10kHz)} = 15\mu F \quad (5)$$

A continuación, se lleva a cabo una simulación de este convertidor considerando los parámetros de diseño resultantes. Como se puede ver en la Figura 11, la prueba se lleva cabo con el conjunto de paneles, bajo una condición de irradiancia de 1000 W/m^2 y 25°C , que son condiciones de máxima potencia (3.5 kW). En la Figura 12 y en la Figura 13 se muestra la respuesta del convertidor; de manera específica, en la Figura 12 se muestran las variables de voltaje y corriente de salida del conjunto de paneles, que son el voltaje y corriente de entrada al convertidor Boost. Por su parte, en la Figura 13 se muestran las variables de voltaje y corriente de salida del convertidor Boost. Como se puede observar, los resultados coinciden con los criterios de diseño.

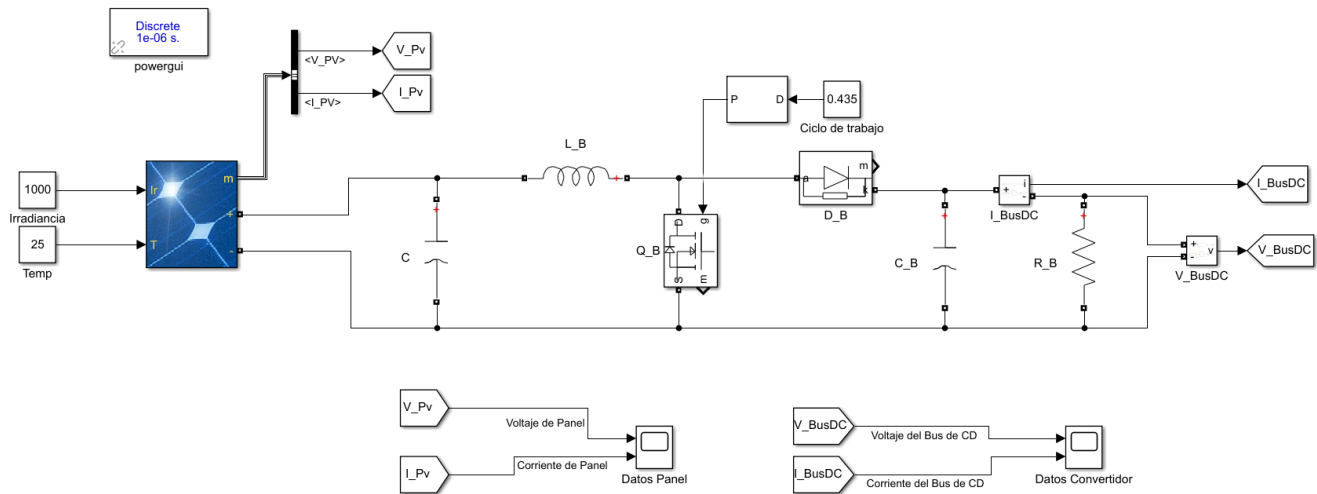


Figura 11. Simulación del convertidor Boost conectado a la salida de paneles.

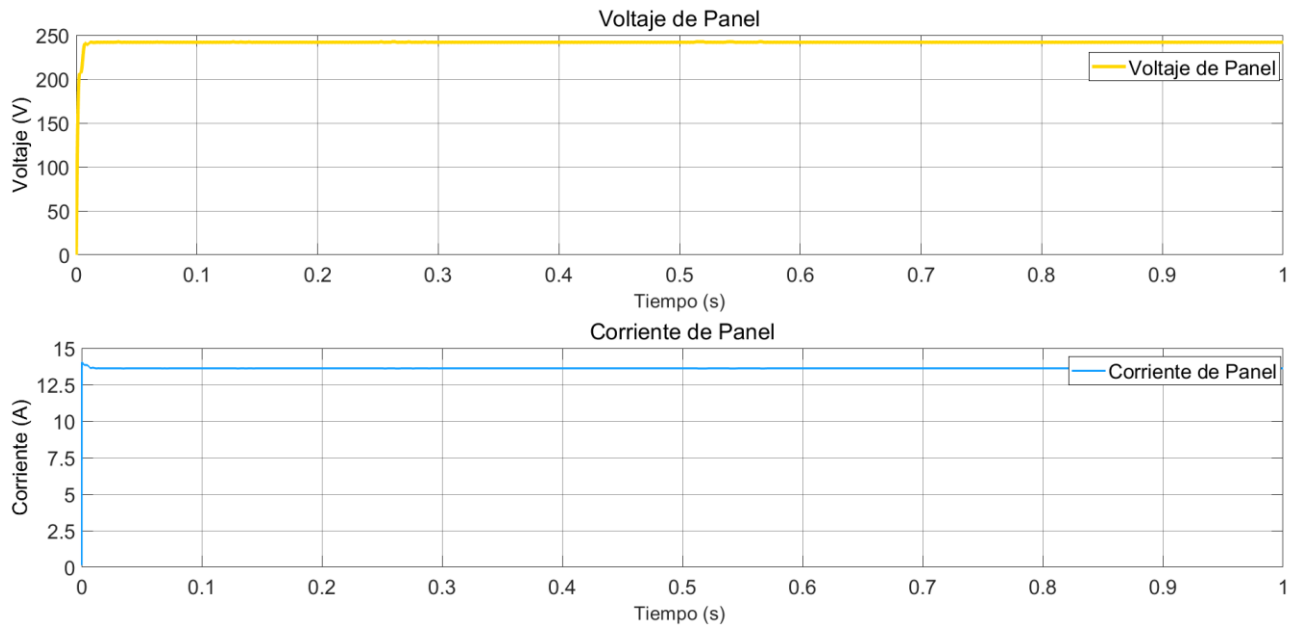


Figura 12. Señales del voltaje y corriente del panel.

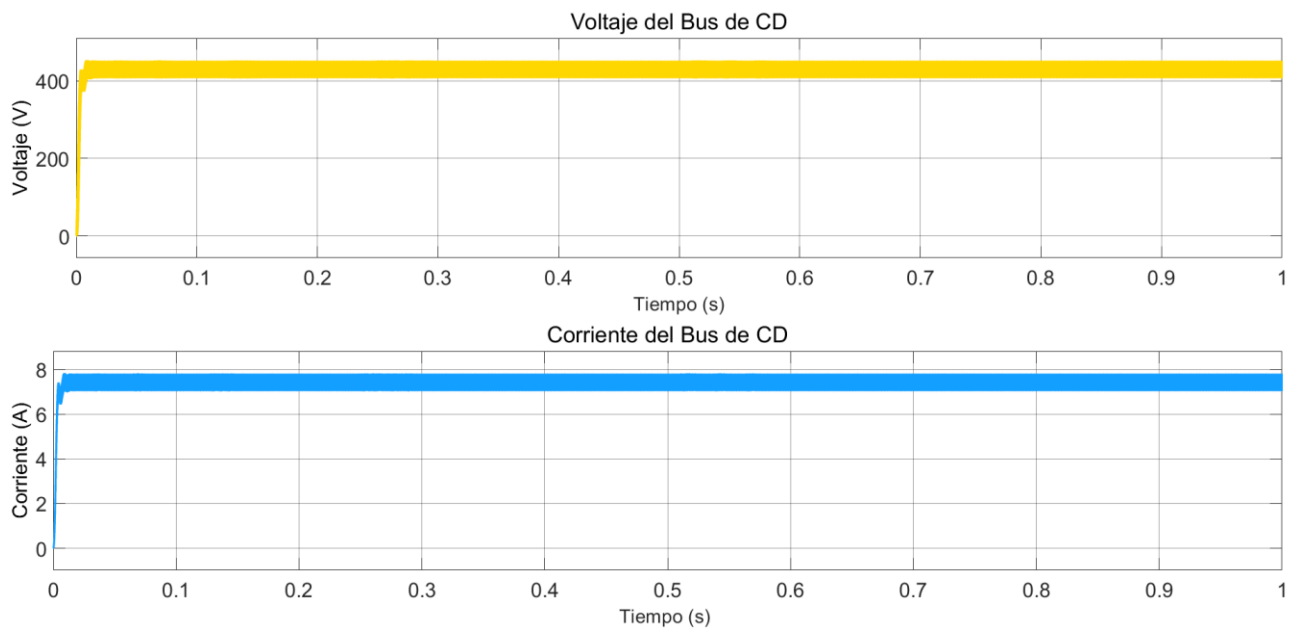


Figura 13. Señales de voltaje y corriente de salida del convertidor Boost.

2.5 Dimensionamiento del convertidor bidireccional Buck+Boost para baterías

Para el caso del BESS se utilizó un convertidor bidireccional Buck+Boost (Figura 14), el cual posee dos modos de operación, este convertidor se encarga de realizar los procesos de carga y descarga de las baterías cuando sea requerido en el sistema.

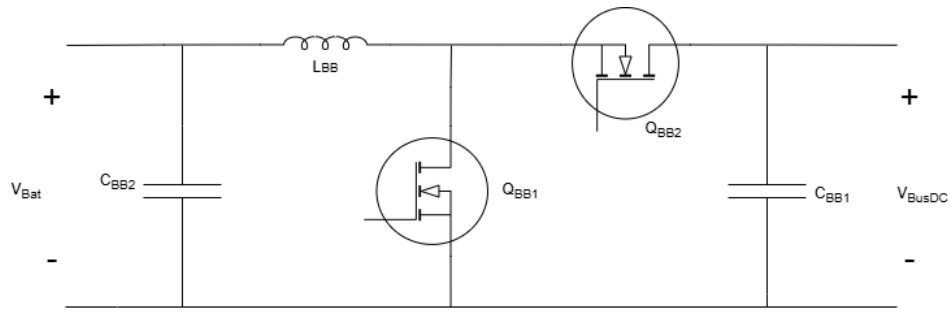


Figura 14. Circuito convertidor Buck+Boost.

Como se mencionó este convertidor cuenta con dos modos de operación, el Buck y el Boost, esto según el interruptor que esté activo. Para operar el convertidor en modo Boost (figura 15, a)) se activa Q_{BB1} , el cual funciona como switch y Q_{BB2} funciona como diodo, en este modo se realiza la descarga de la batería. Por otro lado, cuando Q_{BB2} es activado se opera en modo Buck (figura 15, b)) y se realiza la carga de la batería.

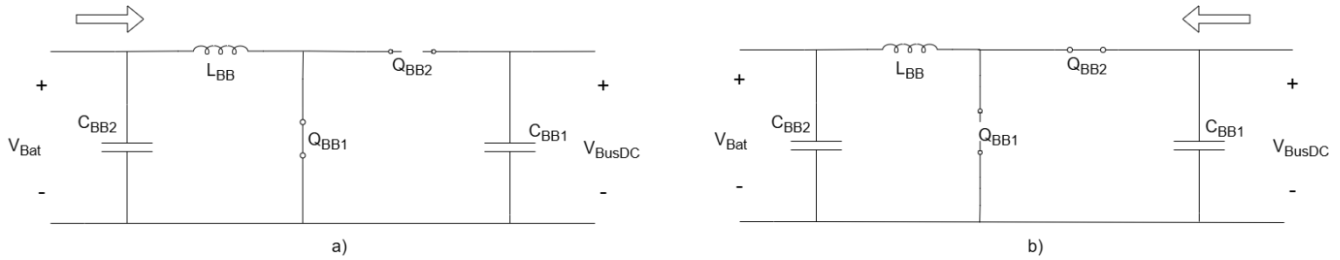


Figura 15. a) Convertidor operando en modo Boost, b) Convertidor operando en modo Buck.

Tabla 6. Parámetros de diseño del convertidor Buck+Boost.

Parámetros	Valores
Potencia del convertidor	3.5 kW
Frecuencia de conmutación (f_s)	100 kHz
Ciclo de trabajo Modo Boost (D_{Bt})	0.573
Ciclo de trabajo Modo Buck (D_{Bk})	0.426
Voltaje de batería (V_{Bat})	192 V
Corriente de batería (I_{Bat})	18.22 A
Rizo de corriente ($\Delta i_{L_{BB}} = 0.05 I_{Bat}$)	0.91 A
Rizo de voltaje ($\Delta v_{C_{BB1}} = 0.05 V_{BusDC}$)	22.5 V
Voltaje del bus de CD (V_{BusDC})	450 V
Corriente del bus de CD (I_{BusDC})	7.77 A
Rizo de voltaje ($\Delta v_{C_{BB2}} = 0.05 V_{Bat}$)	9.6 V

En la Tabla 6 se muestran los parámetros de diseño del convertidor Buck+Boost, para ambos modos. De manera específica, se pueden obtener los valores del inductor y el capacitor en modo Boost sustituyendo los valores de la ecuación (6) y la ecuación (7) con los parámetros correspondientes de la Tabla 6.

$$L_{BB} = \frac{V_{Bat} D_{Bt}}{\Delta i_{L_{BB}} f_s} = \frac{192V(0.57)}{0.91A(100kHz)} = 1.207 \text{ mH} \quad (6)$$

$$C_{BB1} = \frac{I_{BusDC} D_{Bt}}{\Delta v_{C_{BB1}} f_s} = \frac{7.77A(0.57)}{22.5V(100kHz)} = 1.981 \text{ } \mu F \quad (7)$$

De manera análoga, para el modo de operación Buck, se utilizaron los parámetros correspondientes de la Tabla 6; que se sustituyen en la ecuación (8) para obtener el valor del capacitor en modo Buck. En cuanto al inductor en modo Buck, éste es el mismo para el modo Boost, por lo tanto, es del mismo valor.

$$C_{BB2} = \frac{\Delta i_{L_{BB}}}{8 \Delta v_{C_{BB2}} f_s} = \frac{0.91A}{8(9.6V)(100kHz)} = 118.679 \text{ nF} \quad (8)$$

Para validar el diseño y el comportamiento del convertidor, se realizó una prueba en cada modo de operación del convertidor Buck+Boost. En la Figura 16 se muestra el esquema del circuito para la simulación del convertidor en modo Boost, en donde dada la potencia de operación del convertidor (3.5 kW) se usó una resistencia de carga de 57.85 Ω ; las señales obtenidas se observan en la Figura 17.

Para el convertidor en modo Buck se asumió una resistencia de carga de 10.53 Ω . En la Figura 18 se muestra el esquema del circuito para la simulación del convertidor en modo Buck y en la Figura 19 las señales obtenidas.

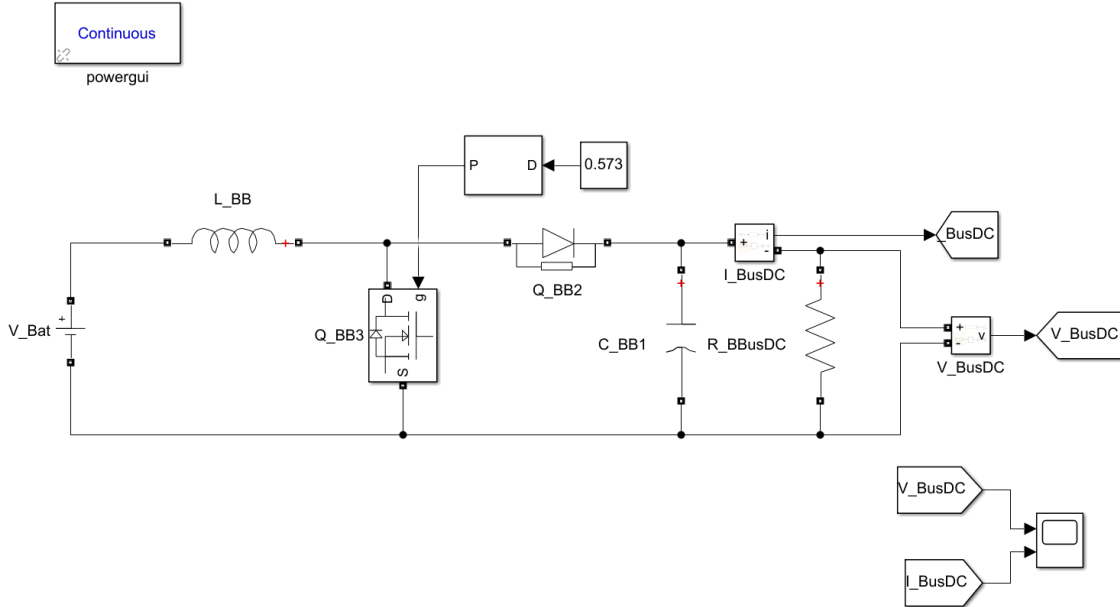


Figura 16. Esquema para simulación del convertidor en modo Boost.

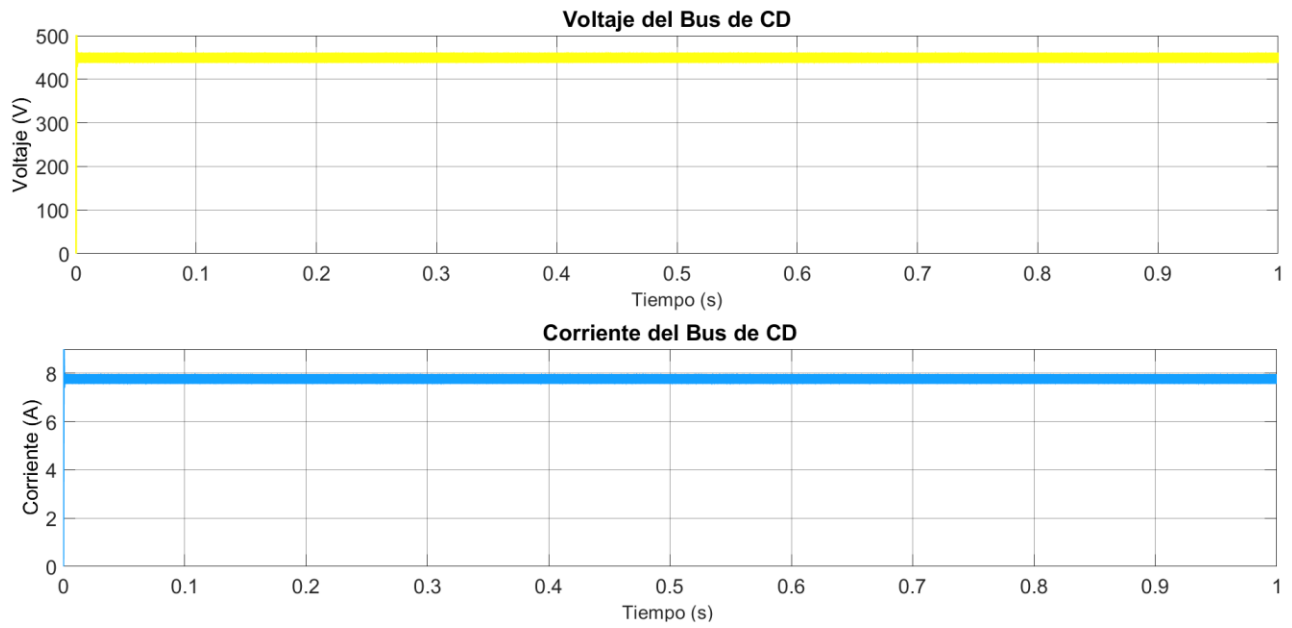


Figura 17. Señales obtenidas del convertidor modo Boost.

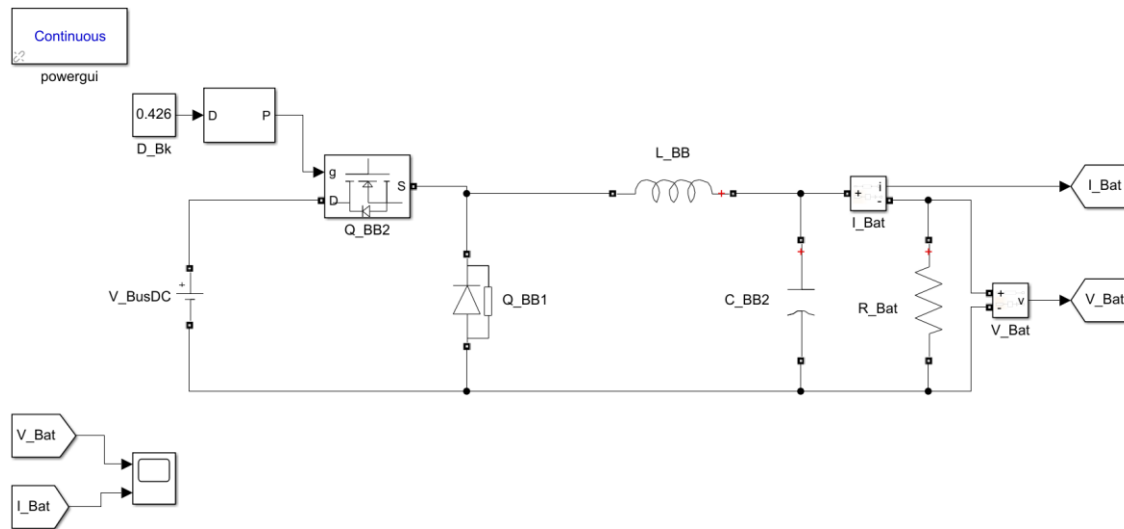


Figura 18. Esquema para simulación del convertidor en modo Buck.

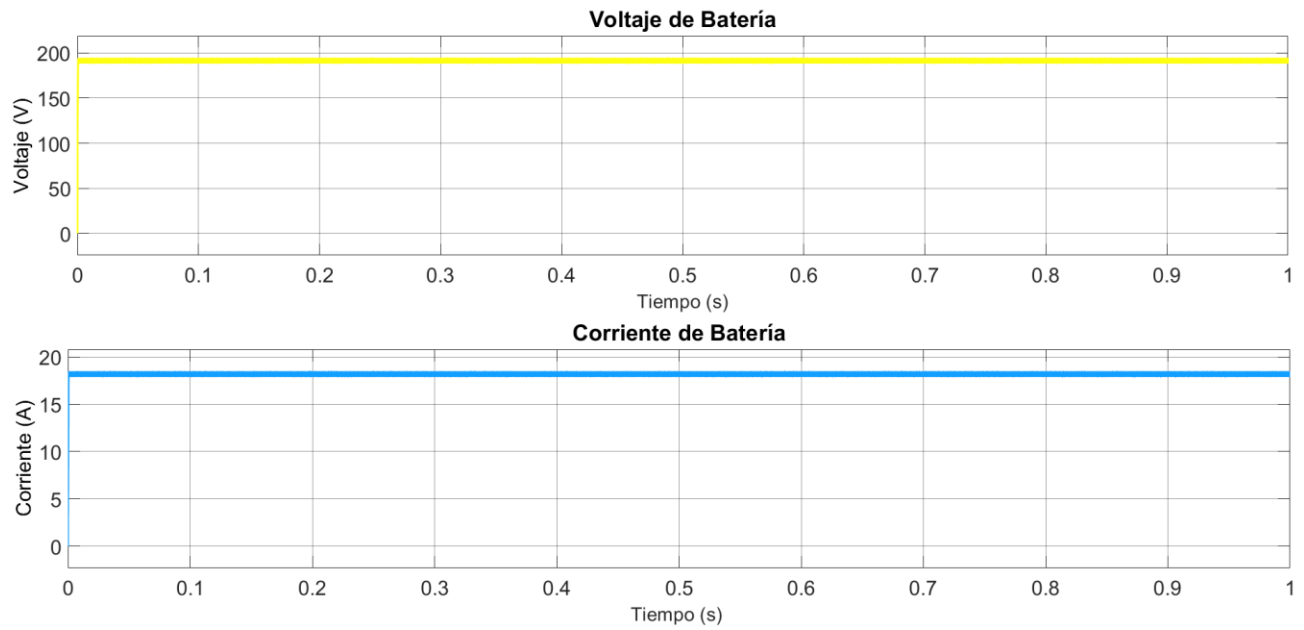


Figura 19. Señales obtenidas a la salida del convertidor en modo Buck

Como se puede observar, de los resultados mostrados en la Figura 17 y en la Figura 19, estos coinciden con los criterios de diseño para ambos modos de operación de este convertidor Buck+Boost.

Capítulo 3. Diseño de controladores

En este capítulo se desarrolla el dimensionamiento de los controles utilizados en los diferentes subsistemas del sistema propuesto. Se inicia con el diseño del control correspondiente a la conexión entre el panel fotovoltaico y el bus de CD.

Para los procesos de carga y descarga de baterías se presentan los controles correspondientes para cada modo de operación del convertidor bidireccional conectado a las baterías, utilizando un control tipo III con el método CC-CV para el proceso de carga y un control PI para el proceso de descarga.

Un aspecto importante de este capítulo es la incorporación del modelo de batería en el diseño del control. A partir del modelo del conjunto del convertidor Buck con la batería se obtienen las ecuaciones correspondientes para la obtención de las funciones de transferencia que fueron utilizadas para diseñar los controles tipo III.

3.1 Diseño de esquema MPPT para convertidor Boost

Como se mencionó con anterioridad, la generación de energía mediante sistemas fotovoltaicos presenta un comportamiento variable, esto debido principalmente a condiciones ambientales. Estas variaciones influyen directamente en la cantidad de energía que estos pueden proporcionar en instantes determinados. En este sentido es importante el seguimiento del punto de máxima potencia (MPPT, por sus siglas en inglés, Maximum Power Point Tracking), una técnica que se encarga de monitorear los valores de tensión y corriente en los paneles para mantenerlos en los puntos donde se entrega la máxima potencia [22].

Existen diversos algoritmos de MPPT, entre los más usados se encuentran el método de Perturbar y observar (P&O) y el método de conductancia incremental (INC, por sus siglas en inglés, Incremental Conductance). Para esta tesis se empleó el algoritmo INC. La técnica INC para hacer MPPT consiste en lo siguiente, cuando se encuentra en el punto MPP se dice que la derivada de la potencia con respecto al voltaje es cero ($\frac{dP}{dV} = 0$), la relación de esta técnica se expresa como

$$\frac{dP}{dV} = \frac{d(IV)}{dV} = I + V \frac{dI}{dV} = I + V \frac{\Delta I}{\Delta V}$$

Siendo así que el método realiza comparaciones entre la conductancia incremental y la conductancia instantánea del panel solar para determinar si el voltaje del panel aumenta o disminuye de acuerdo a en qué punto se encuentre operando.

Es decir, se llevan a cabo mediciones del voltaje y corriente de paneles, a partir de los cuales se calcula la potencia fotovoltaica; y adicionalmente, se calcula la derivada de la potencia con respecto al voltaje. Tal como se muestra en la Figura 20, si la derivada es mayor a 0, se infiere que la potencia del sistema fotovoltaico está a la izquierda del MPP, por lo que el voltaje debe de aumentar (es decir, se debe incrementar el ciclo de trabajo que actúa sobre el convertidor Boost). Si la derivada es menor a 0, se infiere que la potencia del sistema fotovoltaico está a la derecha del MPP, por lo que el voltaje debe de disminuir (es decir, se debe decrementar el ciclo de trabajo que actúa sobre el convertidor Boost) [23].

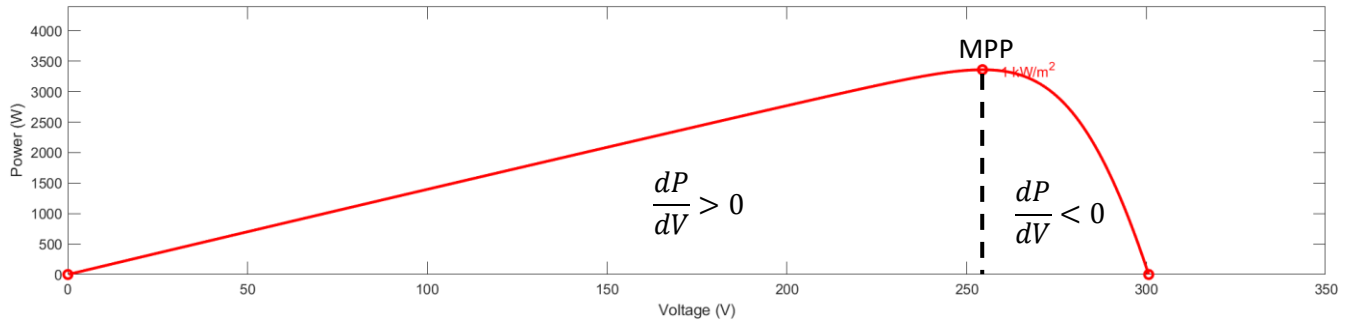


Figura 20. Curva de potencia-voltaje.

El algoritmo INC se implementó en código de MatLab a través del bloque MatLab Function (ver Anexo A). De manera particular, se resalta que las mediciones de voltaje y corrientes del conjunto de paneles se lleva a cabo cada n segundos. Para evaluar el desempeño del algoritmo para localizar el MPP ante cambios en las condiciones de operación, se realizaron pruebas de simulación en *Simulink*. En la Figura 21 se muestra el esquema eléctrico para la simulación, en donde se integra el conjunto de paneles, el convertidor Boost y el algoritmo de MPPT a través del bloque de Función de MatLab.

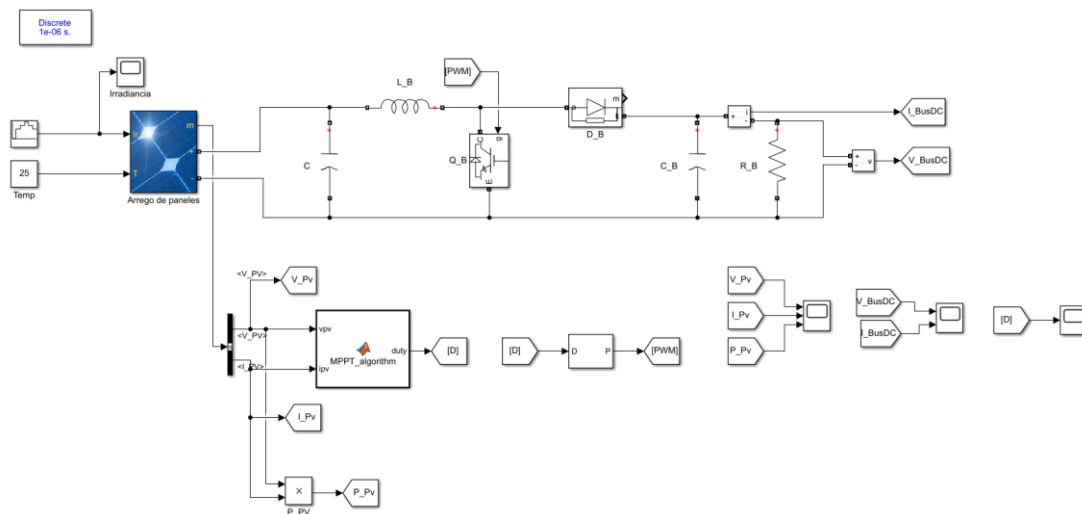


Figura 21. Esquema de la simulación

Para la prueba se consideró una temperatura ambiente constante de 25°C ; mientras que la irradiancia inicial fue de 0 W/m^2 , la cual se aumenta gradualmente en valores de 300 W/m^2 en $t=0.142 \text{ s}$, 400 W/m^2 en $t=0.284 \text{ s}$ y 500 W/m^2 en $t=0.426 \text{ s}$; para posteriormente reducirla nuevamente, de manera gradual en valores de 400 W/m^2 en $t=568 \text{ s}$, 300 W/m^2 en $t=0.71 \text{ s}$, y finalmente en 0 W/m^2 en $t = 0.852 \text{ s}$. En la Figura 22 se muestra los valores de irradiancia utilizados; mientras que en la Figura 23 se muestran las señales obtenidas a la entrada del convertidor Boost o a la salida de los paneles fotovoltaicos.

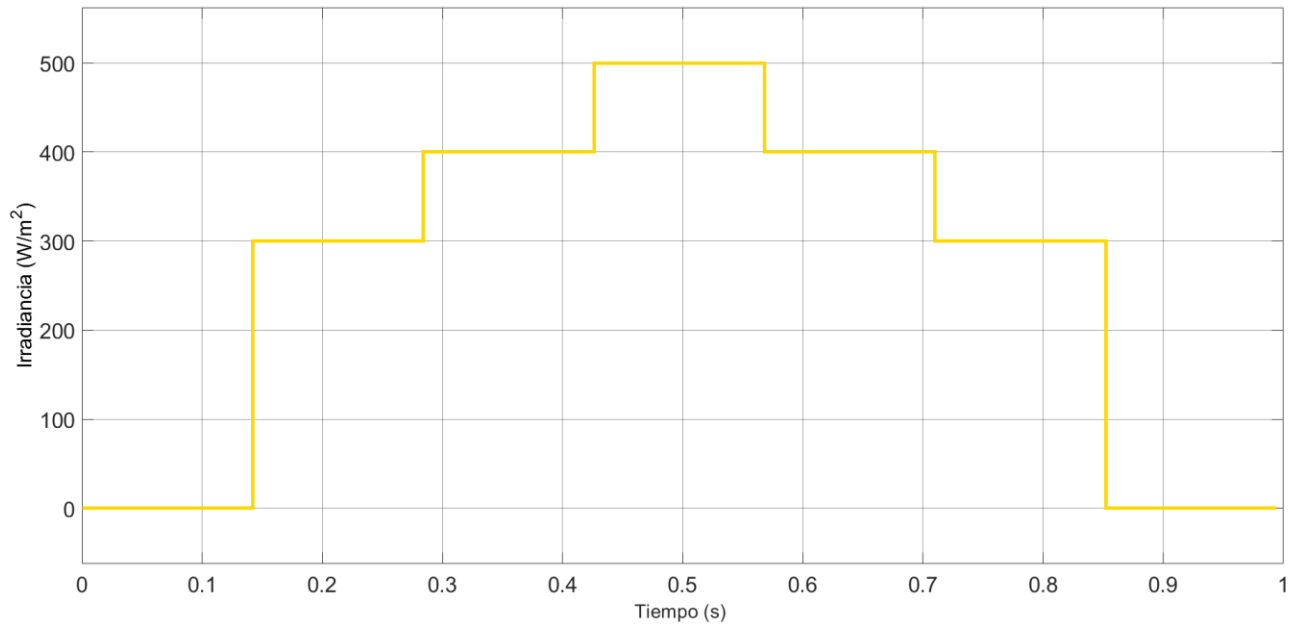


Figura 22. Señal de los valores de irradiancia.

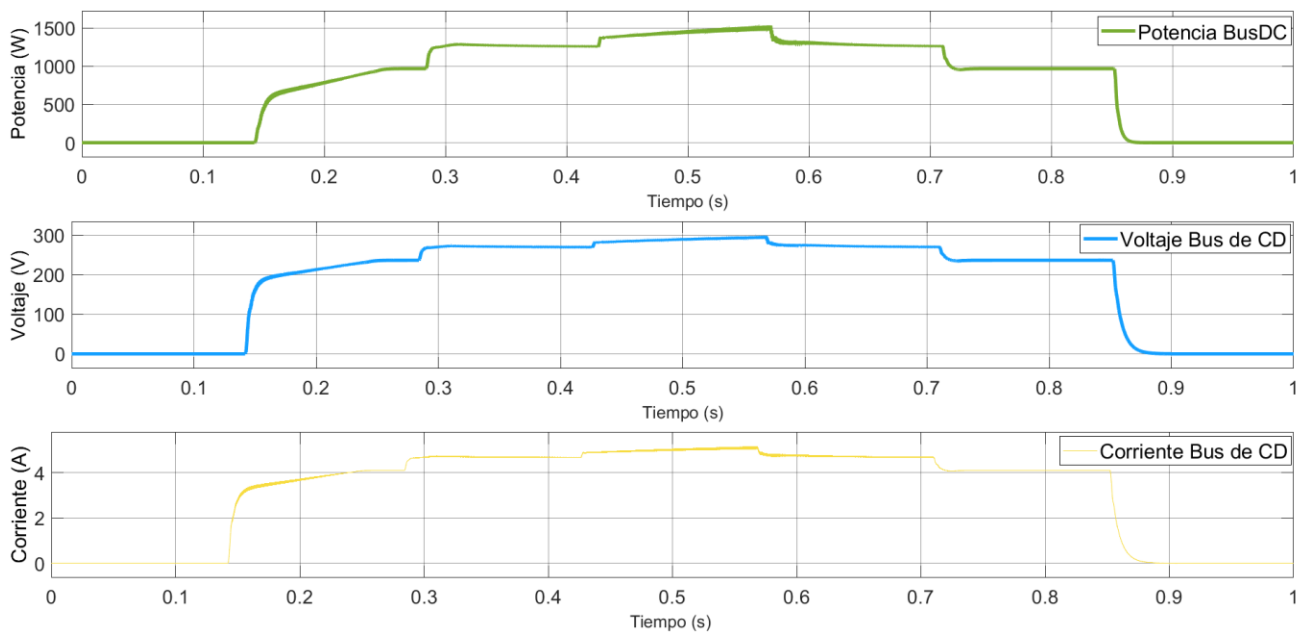


Figura 23. Señales obtenidas a la salida del convertidor Boost conectado a la salida de paneles.

3.2 Diseño de control del convertidor Buck+Boost (modo Buck-carga)

Como se ha mencionado, el convertidor bidireccional Buck+Boost se encarga de controlar el flujo de energía entre el Bus de CD y el banco de baterías. De manera particular, en el modo de operación Buck, correspondiente a la carga de baterías, se plantea una estrategia de control de corriente constante-voltaje constante (CC-CV). Esta estrategia de carga se muestra en la Figura 24.

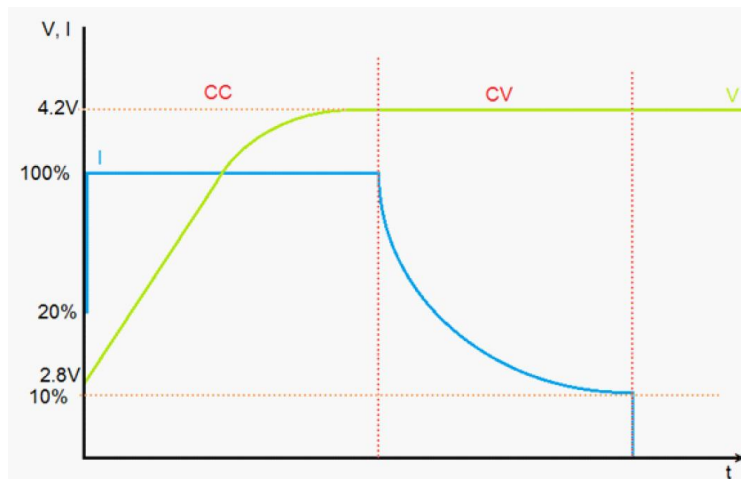


Figura 24. Método de carga de baterías CC-CV.

Como se puede ver de la Figura 24, en el método CC-CV, en un primer periodo de tiempo (etapa de carga rápida), se lleva a cabo la inyección de corriente, la cual se debe mantener constante, razón por la cual se requiere un **controlador de corriente** para este modo (Buck) del convertidor Buck+Boost. Este control de inyección de corriente, se mantiene hasta que se alcanza el valor de voltaje máximo de batería. Sin embargo, en un segundo periodo de tiempo (etapa de absorción-flotación), se deja de lado el control de corriente y se conmuta a un control de voltaje para mantener el voltaje constante regulado en su valor máximo o en un valor un poco menor, razón por la cual se requiere, de manera complementaria, un **controlador de voltaje** para este modo (Buck) del convertidor Buck+Boost. Este control de voltaje se mantiene, hasta que la corriente de carga decrece naturalmente hasta un valor mínimo o se carga completamente la batería y se asegura el estado de flotación; o hasta que se presenta una condición de descarga (modo Boost) o una nueva condición de carga[24], [25].

Es por esta razón (método de carga CC-CV), que en el modo Buck se tienen que diseñar controladores independientes: un controlador de corriente y un controlador de voltaje. En esta tesis, para estos dos controladores se propone el diseño de correspondientes controles Tipo III.

Además, es importante resaltar, que para cualquiera de estos dos modos de control (control de corriente o control de voltaje), la batería como tal, tiene un impacto negativo en el desempeño del control. Este fenómeno se debe a que generalmente, para el diseño de controladores, se parte del modelo del convertidor en modo Buck, asumiendo que la carga es una resistencia, lo cual no es cierto, ya que la batería se comporta como algo más que una simple resistencia. En este sentido, una de las propuestas es, que en el modelado se contemple de manera conjunta el modelo del convertidor (en su modo Buck) con al menos, un modelo simplificado de la batería; y a partir de este modelo extendido, se diseñen los controladores correspondientes.

En este contexto, es de vital importancia, antes de iniciar con el proceso de diseño de los controladores para el modo Buck, el definir un modelo de batería para el banco de baterías del sistema fotovoltaico. Este modelo será útil no solo para identificar algunos parámetros claves del modelo equivalente del banco de baterías, como es el caso de la resistencia interna de batería (R_{Bat}), sino, además, para llevar a cabo algunas pruebas de simulación del proceso de carga y descarga del banco de baterías.

3.2.1 Modelo de batería

En un principio se pretendía utilizar el modelo de batería de *Simulink*, en conjunto con el convertidor Buck+Boost, para probar el proceso de carga/descarga, que se asume sucede de manera repetida, a diferentes niveles de corriente y a diferentes periodos, durante la operación continua del SFV; sin embargo, se presentaron algunas dificultades para llevar a cabo estas pruebas. Por un lado, si se hace uso del circuito eléctrico (sistema conmutado) del Buck+Boost, la conexión directa del modelo de batería de Simulink es viable, sin embargo, los tiempos de simulación se extienden demasiado, debido a la frecuencia de conmutación del convertidor y los tiempos de simulación del SFV que requiere pruebas en el orden de varias horas o días. Además, la reconfiguración del modelo de batería para emular la descarga, era complicada. En este sentido, se optó por hacer uso del modelo matemático de variables promediadas del convertidor Buck+Boost para agilizar la simulación, sin embargo, las variables del modelo ya no eran compatibles con el tipo de entrada que admite el modelo de batería de Simulink. Así, se tuvo que explorar sobre opciones de modelos de baterías, que fueran suficientemente descriptivos de las variables claves como: voltaje de batería, corriente de batería, SoC; además de permitir ambos procesos de carga y descarga.

De acuerdo con la revisión de la literatura, los modelos de batería pueden clasificarse en modelos electroquímicos o modelos de circuitos eléctricos [26]. En los modelos eléctricos, se utilizan circuitos equivalentes para representar a la batería. Existen los modelos simples, que solo poseen una fuente de voltaje, que es la tensión de circuito abierto de la batería, y la resistencia interna de la batería. Existe también el modelo equivalente de Thevenin, en el cual al modelo simple se le agrega una rama RC (una resistencia y un capacitor en paralelo). Otro de los modelos que existe es, el modelo basado en tiempo de ejecución, el cual simula la vida útil de la batería y las características de voltaje y corriente. En la Figura 25 se muestran los circuitos mencionados.

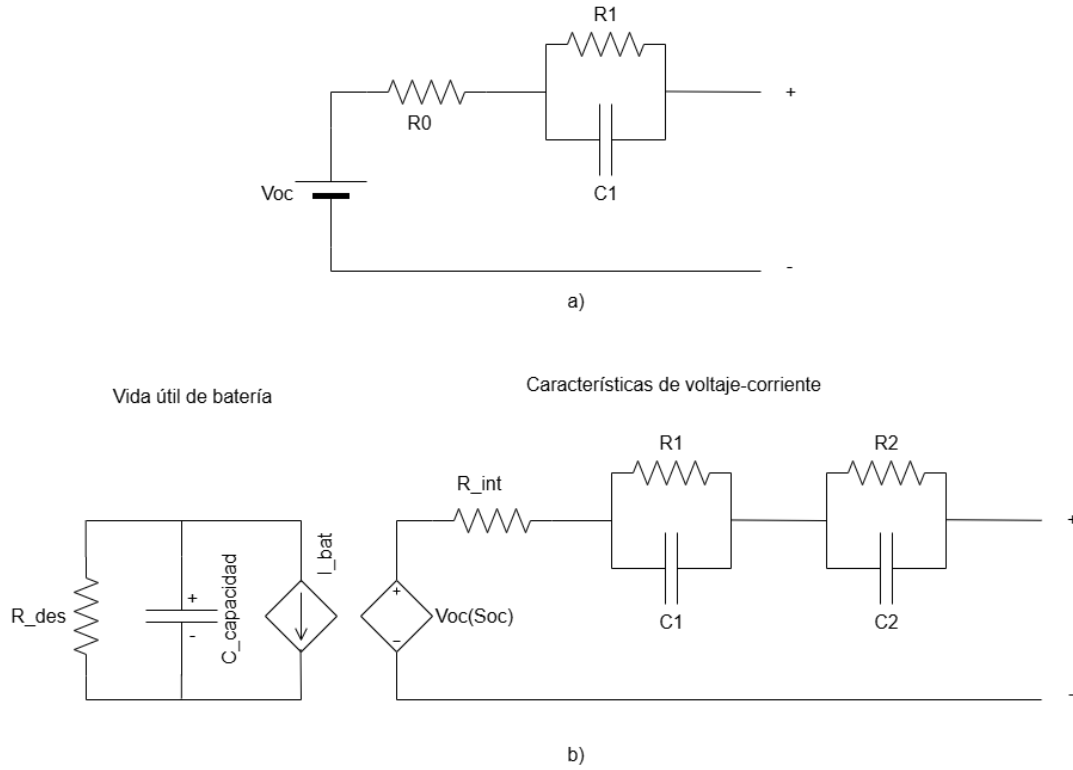


Figura 25. a) Circuito equivalente Thevenin, b) Circuito eléctrico de batería [27].

Existe un modelo de batería en donde se modifica el modelo de batería de Thevenin, en el cual la fuente de la batería es calculada por una ecuación para lograr la corriente de la salida de la batería, este modelo es conocido como el modelo de Shepherd [26], [28], la Figura 26 muestra el circuito de dicho modelo. Las ecuaciones utilizadas en este modelo de batería corresponden a la ecuación (9) para el proceso de carga y la ecuación (10) para el proceso de descarga [29], [30].

$$E_m = E_o - K \frac{Q}{Q - it} i^* - K \frac{Q}{Q - it} + A \exp(B - it) \quad (9)$$

$$E_m = E_o - K \frac{Q}{it + 0.1Q} i^* - K \frac{Q}{Q - it} + A \exp(B - it) \quad (10)$$

En donde E_o es una constante de voltaje, Q es la capacidad de la batería, K es la constante de polarización, it es la corriente extraída de la batería, A es el coeficiente de tensión exponencial, B el coeficiente de capacidad exponencial e i es la corriente de la batería [31].

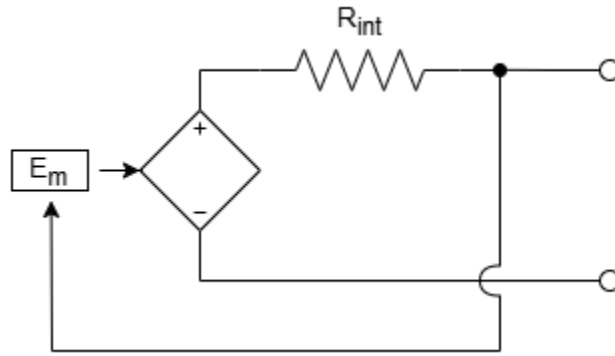


Figura 26. Modelo de batería de Shepherd.

Para esta tesis se utilizó el modelo de Shepherd ya que este modelo se acoplaba al esquema de simulación en el cual se planteó realizar al sistema propuesto, es decir, que al igual que el convertidor bidireccional solo se utilizarían ecuaciones para emular el comportamiento de dichos elementos. Se realizó el modelo de la batería con un bloque de Función de Matlab, en dónde se introdujeron las ecuaciones para realizar los procesos de carga (ecuación (9)) y descarga (ecuación (10)) de las baterías. En la Figura 27 se muestra el esquema de simulación utilizado para el modelo de batería.

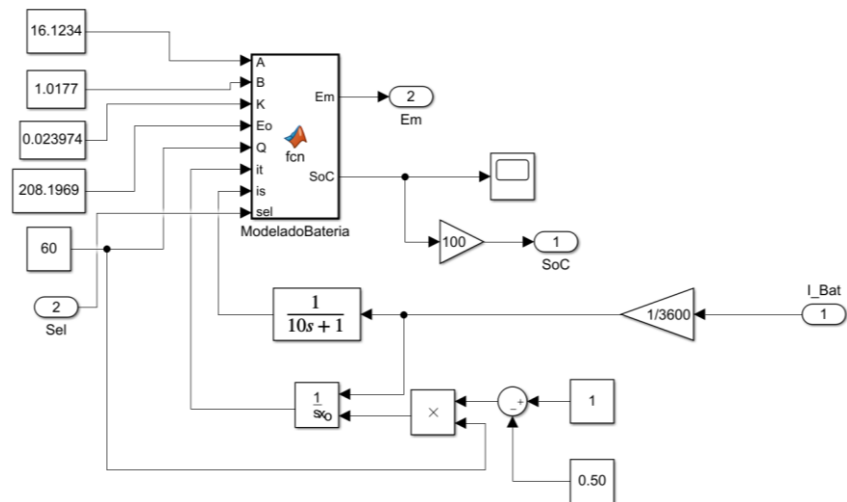


Figura 27. Esquema de simulación del modelo de batería.

Para obtener los valores de los coeficientes A , B , K y E_0 necesarios en el modelo de Shepherd, para el banco de baterías calculado, sí se usó el bloque de batería de Simulink, pero solo para ese propósito. En el bloque de batería de Simulink, entre otros, basta con indicar los valores del voltaje nominal y capacidad del banco de baterías calculados en la sección 2.3; ya que este bloque cuenta con una herramienta que permite graficar las características de descarga de la batería y obtener los coeficientes correspondientes, ver Figura 28.

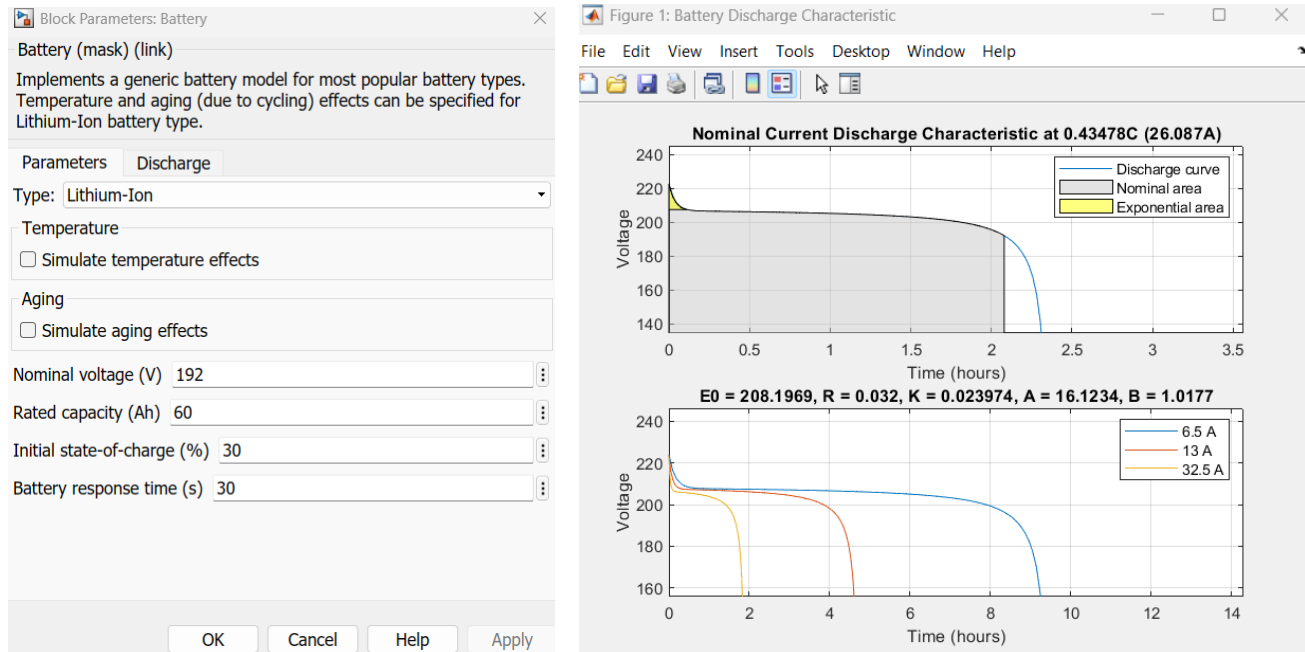


Figura 28. Descripción del proceso de identificación de coeficientes del modelo de batería de Shepherd, a partir del bloque de batería de Simulink.

3.2.2 Modelado del convertidor Buck+Boost (modo Buck) con batería

El propósito de llevar a cabo el modelado del convertidor es para obtener las dos funciones de transferencia del control para el proceso de carga de baterías, esto es: la función de transferencia corriente-ciclo de trabajo (control modo corriente) y la función de transferencia voltaje-ciclo de trabajo (control modo voltaje). Para el modelado, no se debe perder de vista, que la carga de tipo resistiva que se suele poner en el circuito del convertidor, no describe de manera adecuada el comportamiento de una batería. Esto es clave, ya que, si se obtiene una función de transferencia con esta suposición, independientemente del controlador diseñado a partir de ésta; cuando el controlador se pone en operación con el conjunto convertidor-batería, su desempeño es muy malo, llegando incluso a condiciones de inestabilidad. En este sentido, el modelado se lleva a cabo a partir del análisis del circuito que integra el convertidor con el modelo simplificado de batería, tal como se muestra en la Figura 29.

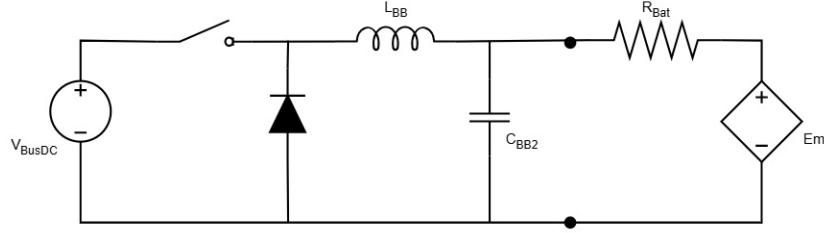


Figura 29. Circuito convertidor Buck más modelo simplificado de batería.

A partir del análisis del circuito Buck+Batería (Figura 29), para las condiciones de encendido y apagado; se obtienen las correspondientes ecuaciones de estado:

Encendido:

$$\dot{x} = A_1 x + B_1 u$$

Apagado:

$$\dot{x} = A_2 x + B_2 u$$

En ambos casos:

$$x = [i_L \quad v_C]' \quad y \quad u = [V_{BusDC} \quad E_m]'$$

Donde:

$$A_1 = \begin{bmatrix} 0 & -\frac{1}{L_{BB}} \\ \frac{1}{C_{BB2}} & -\frac{1}{R_{Bat} C_{BB2}} \end{bmatrix} \quad (11)$$

$$B_1 = \begin{bmatrix} \frac{1}{L_{BB}} & 0 \\ 0 & \frac{1}{R_{Bat} C_{BB2}} \end{bmatrix} \quad (12)$$

$$A_2 = \begin{bmatrix} 0 & -\frac{1}{L_{BB}} \\ \frac{1}{C_{BB2}} & -\frac{1}{R_{Bat} C_{BB2}} \end{bmatrix} \quad (13)$$

$$B_2 = \begin{bmatrix} 0 & 0 \\ 0 & \frac{1}{R_{Bat} C_{BB2}} \end{bmatrix} \quad (14)$$

A_1 y A_2 representan las matrices de parámetros en los tiempos de encendido y apagado, B_1 y B_2 las matrices de entradas en el tiempo de encendido y apagado, x es el vector de estados y u el vector de fuentes de entradas. A partir de estos dos modelos, se obtiene un único modelo de variables promediadas, de acuerdo con (15).

$$\dot{x} = [A_1d + A_2(1-d)]x + [B_1d + B_2(1-d)]u \quad (15)$$

Sustituyendo la ecuación (15) se obtiene el correspondiente modelo de variables promediadas para el modo Buck:

$$\begin{bmatrix} \dot{x}_1 \\ \dot{x}_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & -\frac{1}{L_{BB}} \\ \frac{1}{C_{BB2}} & -\frac{1}{R_{Bat}C_{BB2}} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_1 \\ x_2 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \frac{d}{L_{BB}} & 0 \\ 0 & \frac{1}{R_{Bat}C_{BB2}} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} V_{BusDC} \\ E_m \end{bmatrix} \quad (16)$$

Como se puede ver, el modelo dado en la ecuación (16) es no lineal, por lo tanto, es necesario proceder a su linealización en torno a un punto de operación, mediante el análisis de pequeña señal. Se consideró como punto de operación los valores: V_{Bus0} para el voltaje de bus de CD y D para el ciclo de trabajo del convertidor en modo de operación Buck, el modelo linealizado de pequeña señal se muestra en la ecuación (17).

$$\begin{bmatrix} \hat{x}_1 \\ \hat{x}_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & -\frac{1}{L_{BB}} \\ \frac{1}{C_{BB2}} & -\frac{1}{R_{Bat}C_{BB2}} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \hat{x}_1 \\ \hat{x}_2 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \frac{V_{Bus0}}{L_{BB}} & \frac{D}{L_{BB}} & 0 \\ 0 & 0 & \frac{1}{R_{Bat}} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \hat{d} \\ \hat{V}_{BusDC} \\ \hat{E}_m \end{bmatrix} \quad (17)$$

3.2.3 Función de transferencia corriente-ciclo de trabajo

Definiendo como variable de salida el estado relacionado con la corriente de inductor, la función de transferencia que relaciona a la corriente del inductor con el ciclo de trabajo, se obtiene a partir de la expresión dada en (18).

$$\hat{y}(s) = C^T(sI - A)^{-1}B \quad (18)$$

Sustituyendo la ecuación (18) con las matrices de la ecuación (17), se obtiene la ecuación (19).

$$\hat{y}(s) = [1 \ 0] \left(\begin{bmatrix} s & 0 \\ 0 & s \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} 0 & -\frac{1}{L_{BB}} \\ \frac{1}{C_{BB2}} & -\frac{1}{R_{Bat}C_{BB2}} \end{bmatrix} \right)^{-1} \begin{bmatrix} \frac{V_{Bus0}}{L_{BB}} & \frac{D}{L_{BB}} & 0 \\ 0 & 0 & \frac{1}{R_{Bat}} \end{bmatrix} \quad (19)$$

Resolviendo la ecuación (19) y simplificando, se obtiene la función de transferencia de la ecuación (20) que relaciona la corriente del inductor con el ciclo de trabajo.

$$G_{Buck-i_L}(s) = \frac{\hat{i}_L(s)}{\hat{d}(s)} = V_{Bus0}C_{BB2} \left(\frac{\frac{1}{L_{BB}C_{BB2}} \left(s + \frac{1}{R_{Bat}C_{BB2}} \right)}{s^2 + \frac{1}{R_{Bat}C_{BB2}}s + \frac{1}{L_{BB}C_{BB2}}} \right) \quad (20)$$

3.2.4 Diseño del controlador tipo III para control de corriente (carga)

Para el diseño del control para la carga de las baterías se utilizó el control tipo III, ecuación (21). Debido a que el sistema trabaja con convertidores electrónicos de potencia, se considera importante que la respuesta del control sea rápida y que alcance el estado estacionario en un periodo corto de tiempo. Este controlador posee dos ceros y tres polos, uno de ellos en el origen, por lo que permite ajustar parámetros como el margen de ganancia, el margen de fase y la pendiente alrededor de la frecuencia de cruce de ganancia [32].

$$G_{Control}(s) = \frac{K_c \left(1 + \frac{s}{\omega_{z1}}\right) \left(1 + \frac{s}{\omega_{z2}}\right)}{s \left(1 + \frac{s}{\omega_{p1}}\right) \left(1 + \frac{s}{\omega_{p2}}\right)} \quad (21)$$

Para obtener la ubicación de los polos y ceros de la función de transferencia para el control tipo III se siguieron los siguientes pasos.

- Colocar los dos ceros a la frecuencia natural (ω_n) del modelo del convertidor (planta a controlar), para obtener un mayor margen de fase.

$$\omega_{z1} = \omega_{z2} = \omega_n \quad (22)$$

- Colocar el polo 1 (ω_{p1}) a la misma frecuencia del cero del modelo del convertidor (ω_z), para cancelar el cero contribuido por la ESR del condensador.

$$\omega_{p1} = \omega_z \quad (23)$$

- Colocar el polo 2 (ω_{p2}) a alta frecuencia, entre $\frac{1}{5}$ a $\frac{1}{2}$ de la frecuencia de conmutación (ω_s)

$$\omega_{p2} = 0.2\omega_s \quad \text{ó} \quad \omega_{p2} = 0.5\omega_s \quad (24)$$

- La ganancia del controlador (K_c) se obtiene al despejarla de la función de transferencia de lazo directo control-planta evaluada en $s = j\omega_n$, ya que en esa frecuencia la ganancia debe ser unitaria.

$$G_{Planta}(s)G_{Control}(s) = 1 \quad (25)$$

Sustituyendo la ecuación (20)21 con los parámetros de diseño de la Tabla 6, la ecuación (6) y (8), la función de transferencia corriente del inductor- ciclo de trabajo resulta de la siguiente manera

$$G_{Buck-i_L}(s) = \frac{\hat{i}_L(s)}{\hat{d}(s)} = 53.405 \times 10^{-6} \left(\frac{6.981 \times 10^9 (s + 263.315 \times 10^6)}{s^2 + 263.315 \times 10^6 s + 6.981 \times 10^9} \right)$$

Sustituyendo la ecuación (22) para obtener la colocación de los ceros del control

$$\omega_n = \sqrt{\frac{1}{L_{BB} C_{BB2}}}$$

$$\omega_{z1} = \omega_{z2} = \omega_n = 83.5 \times 10^3 \text{ rad/s}$$

Para la colocación del primer polo se sustituyen los valores de la ecuación (23).

$$\omega_z = \frac{1}{R_{Bat} C_{BB2}}$$

$$\omega_{p1} = \omega_z = 263.32 \times 10^6 \text{ rad/s}$$

Para la obtención del segundo polo se sustituye la ecuación (24).(25)

$$\omega_{p2} = 0.5 \omega_s = 0.5 \left(628.319 \times 10^3 \frac{\text{rad}}{\text{s}} \right) = 314.16 \times 10^3 \text{ rad/s}$$

Para conocer la ganancia del control tipo III se sustituye la ecuación (25) con la función de transferencia del convertidor y la función de transferencia del control, en donde, para obtener el valor de la ganancia se despeja K_c . En la ecuación (26) se sustituye la ecuación (25) con los valores correspondientes, en la ecuación (27)(28) se encuentra despejada la ganancia correspondiente para el control tipo III para el control de corriente.

$$V_{Bus0} C_{BB2} \left(\frac{\frac{1}{L_{BB} C_{BB2}} \left(s + \frac{1}{R_{Bat} C_{BB2}} \right)}{s^2 + \frac{1}{R_{Bat} C_{BB2}} s + \frac{1}{L_{BB} C_{BB2}}} \right) K_c \frac{\left(1 + \frac{s}{\omega_{z1}} \right) \left(1 + \frac{s}{\omega_{z2}} \right)}{\left(1 + \frac{s}{\omega_{p1}} \right) \left(1 + \frac{s}{\omega_{p2}} \right)} = 1 \quad (26)$$

$$K_c = \frac{\left((j\omega_n)^2 + \frac{1}{R_{Bat} C_{BB2}} j\omega_n + \frac{1}{L_{BB} C_{BB2}} \right) j\omega_n \left(\left(1 + \frac{j\omega_n}{\omega_{p1}} \right) \left(1 + \frac{j\omega_n}{\omega_{p1}} \right) \right)}{V_{Bus0} C_{BB2} \left(\frac{1}{L_{BB} C_{BB2}} \left(j\omega_n + \frac{1}{R_{Bat} C_{BB2}} \right) \right) \left(1 + \frac{\omega_n}{\omega_{p1}} \right) \left(1 + \frac{\omega_n}{\omega_{p2}} \right)} = 9.371 \times 10^3 \quad (27)$$

Sustituyendo la ecuación (21) con los valores obtenidos de las ecuaciones (22), (23), (24) y (27) para el control de corriente del convertidor en modo Buck, se obtiene la función de transferencia de la ecuación (28).

$$G_{ControlBk-i_L}(s) = \frac{9.371 \times 10^3}{s} \frac{\left(1 + \frac{s}{83.5 \times 10^3}\right) \left(1 + \frac{s}{83.5 \times 10^3}\right)}{\left(1 + \frac{s}{263.32 \times 10^6}\right) \left(1 + \frac{s}{314.16 \times 10^3}\right)} \quad (28)$$

Se realizó una prueba del control corriente en el entorno de simulación Simulink, en donde se colocaron dos diferentes referencias de corriente para observar la respuesta del control tipo III, el tiempo de simulación fue de 2 ms. En la Figura 30 se muestran las señales de corriente obtenidas de la simulación realizada, se comienza con una referencia de 8 A en $t=0$ s, posteriormente en el tiempo $t=1$ ms se cambia a una señal de referencia de 18 A. Como se puede observar, la corriente experimenta un transitorio que dura alrededor de 0.25 ms antes de llegar a su valor de estado estacionario.

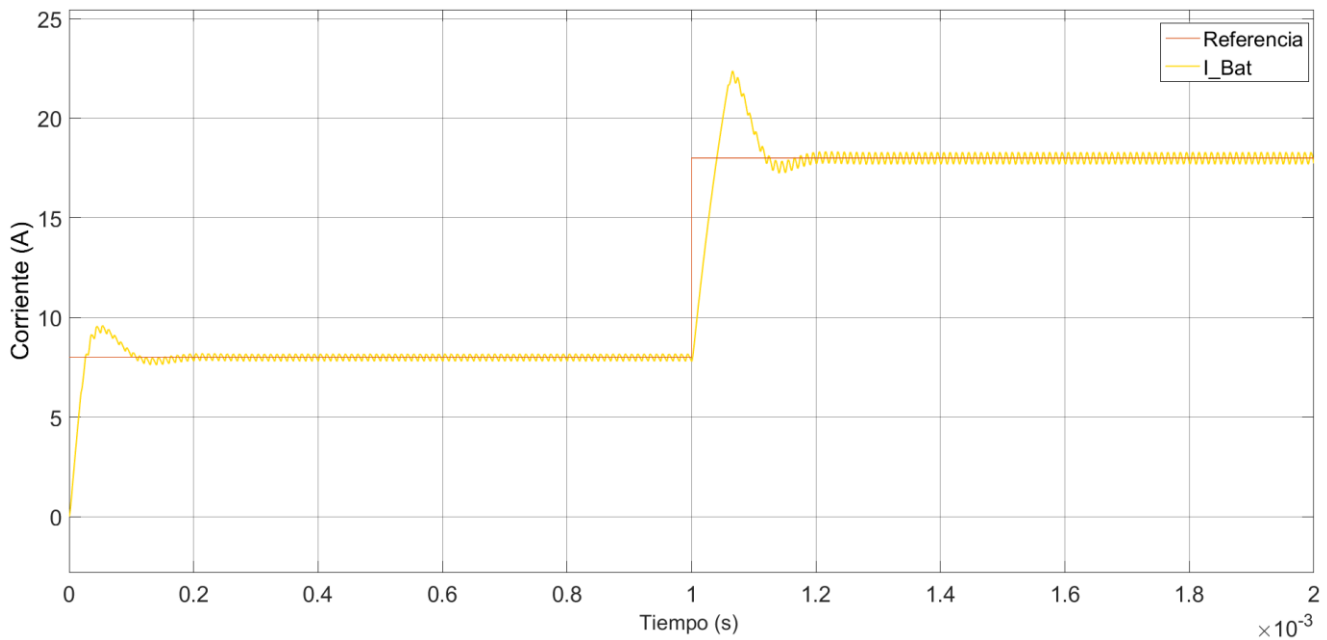


Figura 30. Señal de respuesta del control de corriente en modo Buck.

3.2.5 Función de transferencia voltaje-ciclo de trabajo

Para la obtención de esta función de transferencia, se define como variable de salida el estado relacionado con el voltaje del capacitor que en este caso es el voltaje de salida. La función de transferencia que relaciona al voltaje del capacitor con el ciclo de trabajo, se obtiene al sustituir la ecuación (18) con las matrices de la ecuación (17), de donde se obtiene la ecuación (29), la cual se despeja y se simplifica para obtener la ecuación (30), que es la función de transferencia deseada.

$$\hat{y}(s) = [0 \quad 1] \left(\begin{bmatrix} s & 0 \\ 0 & s \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} 0 & -\frac{1}{L_{BB}} \\ \frac{1}{C_{BB2}} & -\frac{1}{R_{Bat}C_{BB2}} \end{bmatrix} \right)^{-1} \begin{bmatrix} \frac{V_{Bus0}}{L_{BB}} & \frac{D}{L_{BB}} & 0 \\ 0 & 0 & \frac{1}{R_{Bat}} \end{bmatrix} \quad (29)$$

$$G_{Buck-V_c}(s) = \frac{\hat{V}_c(s)}{\hat{d}(s)} = V_{Bus0} \left(\frac{\frac{1}{L_{BB}C_{BB2}}}{s^2 + \frac{1}{R_{Bat}C_{BB2}}s + \frac{1}{L_{BB}C_{BB2}}} \right) \quad (30)$$

3.2.6 Diseño del controlador tipo III para control de voltaje (carga)

Del mismo modo que el control corriente se diseñó un control tipo III para el control voltaje para el proceso de carga de baterías. Sustituyendo la ecuación (30) con los parámetros de diseño de la Tabla 6 y las ecuaciones (6) y (8), la función de transferencia voltaje de salida-ciclo de trabajo resulta en lo siguiente.

$$G_{Buck-V_c}(s) = 450 \left(\frac{6.985 \times 10^9}{s^2 + 263.315 \times 10^6 s + 6.981 \times 10^9} \right)$$

Se utilizó la ecuación (22) para la colocación de ceros del control de voltaje, sustituyendo con los valores correspondientes se obtiene lo siguiente.

$$\omega_{z1} = \omega_{z2} = \omega_n = 83.5 \times 10^3 \text{ rad/s}$$

Según la ecuación (23)(24) se coloca el primer polo a la frecuencia del cero del modelo del convertidor (ω_z); dado que en la función de transferencia voltaje de salida-ciclo de trabajo se tiene ausencia de un cero, el primer cero del control tipo III se coloca a la mitad de la frecuencia de conmutación, ecuación (31).

$$\omega_{p1} = 0.5 * \omega_s = 314.16 \times 10^3 \text{ rad/s} \quad (31)$$

Dado que el primer polo se colocó a la frecuencia de conmutación, el segundo polo puede colocarse a esa misma frecuencia o colocarlo a una frecuencia al doble o al triple del primer polo, ecuación (32).

$$\omega_{p2} = 2 * \omega_{p1} = 628.32 \times 10^3 \text{ rad/s} \quad (32)$$

La ganancia del control tipo III para el control voltaje se obtiene de despejar la ganancia K_c de la ecuación (25), en la ecuación (33) se sustituye con los valores correspondientes, en la ecuación (34) se obtiene el valor de K_c .

$$V_{Bus0} \left(\frac{\frac{1}{L_{BB}C_{BB2}}}{s^2 + \frac{1}{R_{Bat} * C_{BB2}}s + \frac{1}{L_{BB}C_{BB2}}} \right) \frac{K_c \left(1 + \frac{s}{\omega_{z1}}\right) \left(1 + \frac{s}{\omega_{z2}}\right)}{s \left(1 + \frac{s}{\omega_{p1}}\right) \left(1 + \frac{s}{\omega_{p2}}\right)} = 1 \quad (33)$$

$$K_c = \frac{((j\omega_n)^2 + \frac{1}{R_{Bat}C_{BB2}}j\omega_n + \frac{1}{L_{BB}C_{BB2}})j\omega_n \left(\left(1 + \frac{j\omega_n}{\omega_{p1}}\right) \left(1 + \frac{j\omega_n}{\omega_{p1}}\right) \right)}{\left(V_{Bus0} \frac{1}{L_{BB}C_{BB2}}\right) \left(1 + \frac{j\omega_n}{\omega_{z1}}\right) \left(1 + \frac{j\omega_n}{\omega_{z2}}\right)} = 146.4 \times 10^3 \quad (34)$$

Sustituyendo la ecuación (21) con los valores obtenidos se obtiene la ecuación (35) la cual representa la función de transferencia para el control modo voltaje del convertidor en modo Buck.

$$G_{ControlBk-V_c}(s) = \frac{3.056 \times 10^5}{s} \frac{\left(1 + \frac{s}{83.5 \times 10^3}\right) \left(1 + \frac{s}{83.5 \times 10^3}\right)}{\left(1 + \frac{s}{314.16 \times 10^3}\right) \left(1 + \frac{s}{628.32 \times 10^3}\right)} \quad (35)$$

De igual modo se realizó una prueba del control voltaje en el entorno de simulación Simulink, en donde se colocaron dos diferentes referencias de voltaje para observar la respuesta del control tipo III, el tiempo de simulación fue de 2 ms. En la Figura 31 se muestran las señales de corriente obtenidas de la simulación realizada, se comienza con una referencia de 180 V en $t = 0$ s posteriormente en el tiempo $t = 1$ ms se cambia a una señal de referencia de 205 V. Como se puede observar, el voltaje experimenta un transitorio que dura alrededor de 0.25 ms antes de llegar a su valor de estado estacionario.

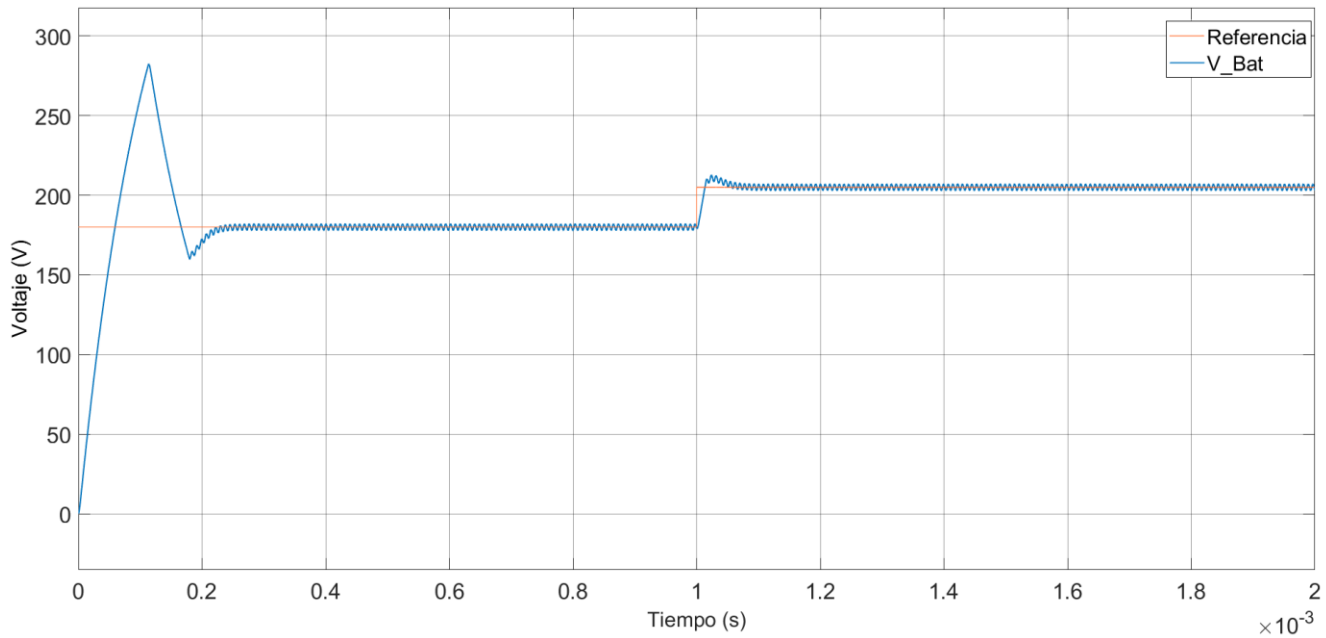


Figura 31. Señales de voltaje obtenidas del control voltaje en modo Buck.

3.3 Diseño de control de corriente del convertidor Buck+Boost (modo Boost-descarga)

3.3.1 Modelado del convertidor Buck+Boost (modo Boost)

Por otro lado, para el modo de operación Boost, encargado de la descarga de baterías, se adopta una estrategia de control corriente-constante (CC), en este modo se diseña un

control PI. Esto con el propósito de asegurar procesos adecuados y seguros de carga y descarga, preservando la vida útil de las baterías y evitando profundidades de descarga no deseadas.

Para obtener las funciones de transferencia del control para el proceso de descarga de baterías se utilizaron las ecuaciones de las variables de estado del convertidor en modo de operación Boost del convertidor bidireccional, estas se obtuvieron a partir de un análisis del circuito del convertidor Boost.

Encendido:

$$\dot{x} = A_1 x + B_1 u$$

Apagado:

$$\dot{x} = A_2 x + B_2 u$$

En ambos casos:

$$x = [i_L \quad v_C]' \quad y \quad u = V_{Bat}$$

$$A_1 = \begin{bmatrix} 0 & 0 \\ 0 & -\frac{1}{R_{BusDC} C_{BB1}} \end{bmatrix} \quad (36)$$

$$B_1 = \begin{bmatrix} \frac{1}{L_{BB}} \\ 0 \end{bmatrix} \quad (37)$$

$$A_2 = \begin{bmatrix} 0 & -\frac{1}{L_{BB}} \\ \frac{1}{C_{BB1}} & -\frac{1}{R_{BusDC} C_{BB1}} \end{bmatrix} \quad (38)$$

$$B_2 = \begin{bmatrix} \frac{1}{L_{BB}} \\ 0 \end{bmatrix} \quad (39)$$

Para obtener el modelo de variables promediada se sustituye la ecuación (15) con las matrices de encendido y apagado de las ecuaciones (35), (36), (37) y (38), obteniendo así la ecuación (40).

$$\begin{bmatrix} \dot{x}_1 \\ \dot{x}_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & -\frac{(1-d)}{L_{BB}} \\ \frac{(1-d)}{C_{BB1}} & -\frac{1}{R_{BusDC} C_{BB1}} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_1 \\ x_2 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \frac{1}{L_{BB}} \\ 0 \end{bmatrix} V_{Bat} \quad (40)$$

3.3.2 Función de transferencia corriente-ciclo de trabajo

De igual manera para obtener las funciones de transferencia del convertidor a partir de las ecuaciones de estado se utilizó el método generalizado, ecuación (18). Para este trabajo de tesis se hizo uso del método de carga de corriente constante (CC) para el proceso de descarga de baterías, en este sentido fue necesario obtener la función de transferencia que relaciona a la corriente del inductor con el ciclo de trabajo.

Al igual que los modelos realizados para el convertidor en modo Buck, este modelo dado en la ecuación (40) para el convertidor en modo Boost no es lineal, por lo que para este caso también se realizó su linealización entorno a un punto de operación, mediante el análisis de pequeña señal. Se consideró como punto de operación los valores: x_{10} , x_{20} y D , de manera correspondiente, para la corriente de inductor, para el voltaje de bus de CD y para el ciclo de trabajo; en donde se obtiene el modelo linealizado de pequeña señal que se muestra en la ecuación (41).

$$\begin{bmatrix} \hat{x}_1 \\ \hat{x}_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & -\frac{(1-D)}{L_{BB}} \\ \frac{(1-D)}{C_{BB1}} & -\frac{1}{R_{BusDC}C_{BB1}} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \hat{x}_1 \\ \hat{x}_2 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \frac{x_{20}}{L_{BB}} & \frac{1}{L_{BB}} \\ -\frac{x_{10}}{C_{BB1}} & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \hat{d} \\ \hat{V}_{Bat} \end{bmatrix} \quad (41)$$

Para obtener la función de transferencia que relaciona la corriente del inductor con el ciclo de trabajo para el convertidor en modo Boost, se sustituye la ecuación (18) con los valores de la ecuación (41), obteniendo así la ecuación (42).

$$\hat{y}(s) = [1 \quad 0] \left(\begin{bmatrix} s & 0 \\ 0 & s \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} 0 & -\frac{(1-D)}{L_{BB}} \\ \frac{(1-D)}{C_{BB1}} & -\frac{1}{R_{BusDC}C_{BB1}} \end{bmatrix} \right)^{-1} \begin{bmatrix} \frac{x_{20}}{L_{BB}} & \frac{1}{L_{BB}} \\ -\frac{x_{10}}{C_{BB1}} & 0 \end{bmatrix} \quad (42)$$

Resolviendo la ecuación y simplificando la ecuación (42) se obtiene la función de transferencia de la ecuación (43).

$$G_{Boost-I_L}(s) = \frac{\hat{i}_L}{\hat{d}} = \frac{V_{BusDC}C_{BB1}}{(1-D)^2} \frac{\frac{(1-D)^2}{L_{BB}C_{BB1}} \left(s + \frac{V_{BusDC} + (1-D)I_{Bat}R_{BusDC}}{R_{BusDC}C_{BB1}V_{BusDC}} \right)}{s^2 + \frac{1}{R_{BusDC}C_{BB1}}s + \frac{(1-D)^2}{L_{BB}C_{BB1}}} \quad (43)$$

Sustituyendo la ecuación (43) con sus valores correspondientes se obtiene la ecuación (44).

$$G_{Boost-I_L}(s) = \frac{\hat{i}_L}{\hat{d}} = 4.815 \times 10^{-3} \frac{76.254 \times 10^6 (s + 17.460 \times 10^3)}{s^2 + 8.733 \times 10^3 s + 76.254 \times 10^6} \quad (44)$$

3.3.3 Diseño del controlador PI para control de corriente (descarga)

Para el proceso de descarga (modo Boost) del convertidor bidireccional Buck+Boost se utilizó un control Proporcional-Integral (PI). En la ecuación (45) se presenta la función de transferencia de un control PI, donde K_p corresponde a la ganancia de la parte proporcional y K_i a la ganancia de la parte integral.

$$G(s) = K_p + \frac{K_i}{s} \quad (45)$$

Para calcular los valores de ganancia del control PI se hizo uso de la herramienta de sintonización (PID Tuner) que viene dentro del bloque PID de Simulink. Para este proceso se requiere construir en Simulink, el esquema en lazo cerrado del controlador PI con la función de transferencia de la planta que se desea controlar, en este caso la función de transferencia corriente de inductor – ciclo de trabajo dada en (44). En la Figura 32 se muestra el esquema de simulación utilizado. En este caso, los valores resultantes fueron: $K_p = 0.4052$ y $K_i = 1080$. En la Figura 33 se compara la respuesta, solo del sistema retroalimentado sin control y la respuesta del sistema con el control seleccionado. Como se puede ver, con este PI se obtiene un tiempo de respuesta de alrededor de 0.1 ms.

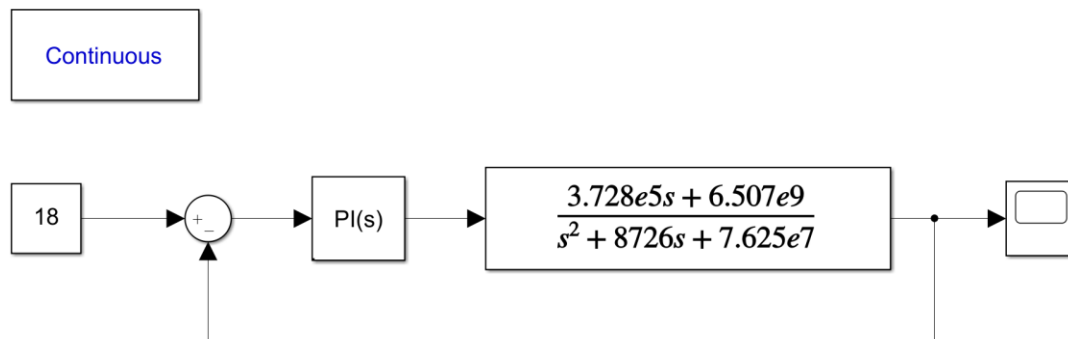


Figura 32. Esquema de simulación control-planta del convertidor en modo Boost.

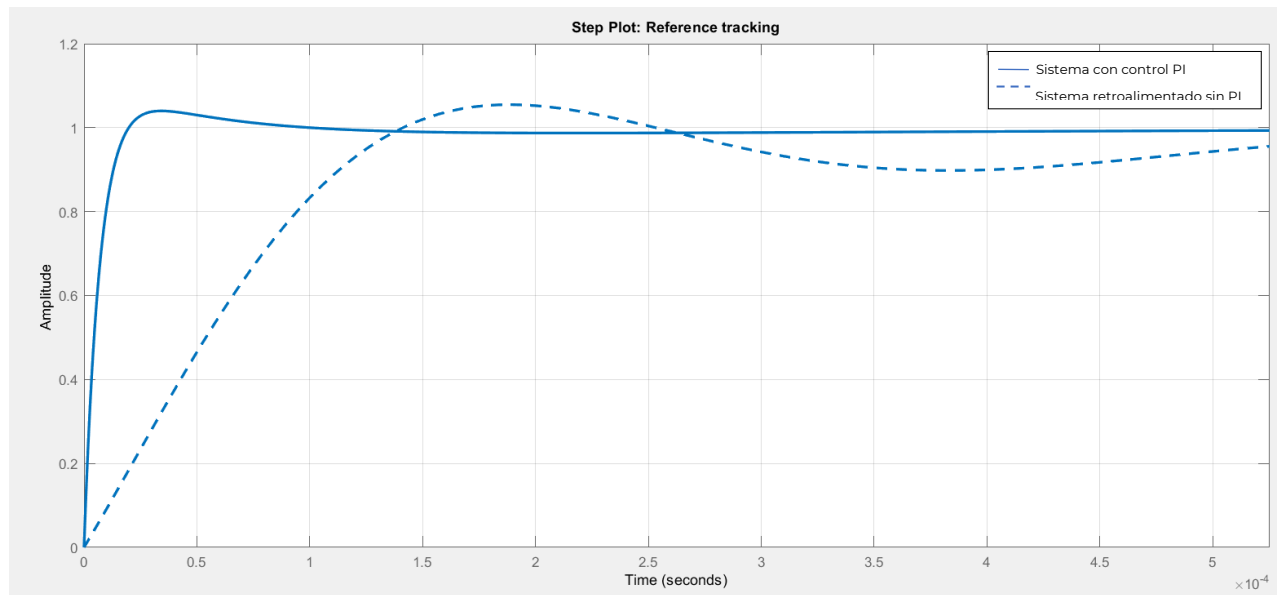


Figura 33. Respuesta del control PI para el control de corriente de descarga en el convertidor en modo Boost.

De igual manera se realizó una prueba del control corriente para el modo de operación Boost en el entorno de simulación Simulink, en donde se colocaron dos diferentes referencias de corriente para observar la respuesta del control PI. En la Figura 34 se muestran las señales de corriente obtenidas de la simulación realizada, la cual comienza con una referencia de 14 A en $t = 0$ s que tarda aproximadamente 0.2 ms en llegar a la referencia; en el tiempo $t = 1$ ms se cambia a una señal de referencia de 18 A que de igual manera tarda 0.2 ms en llegar a la referencia.

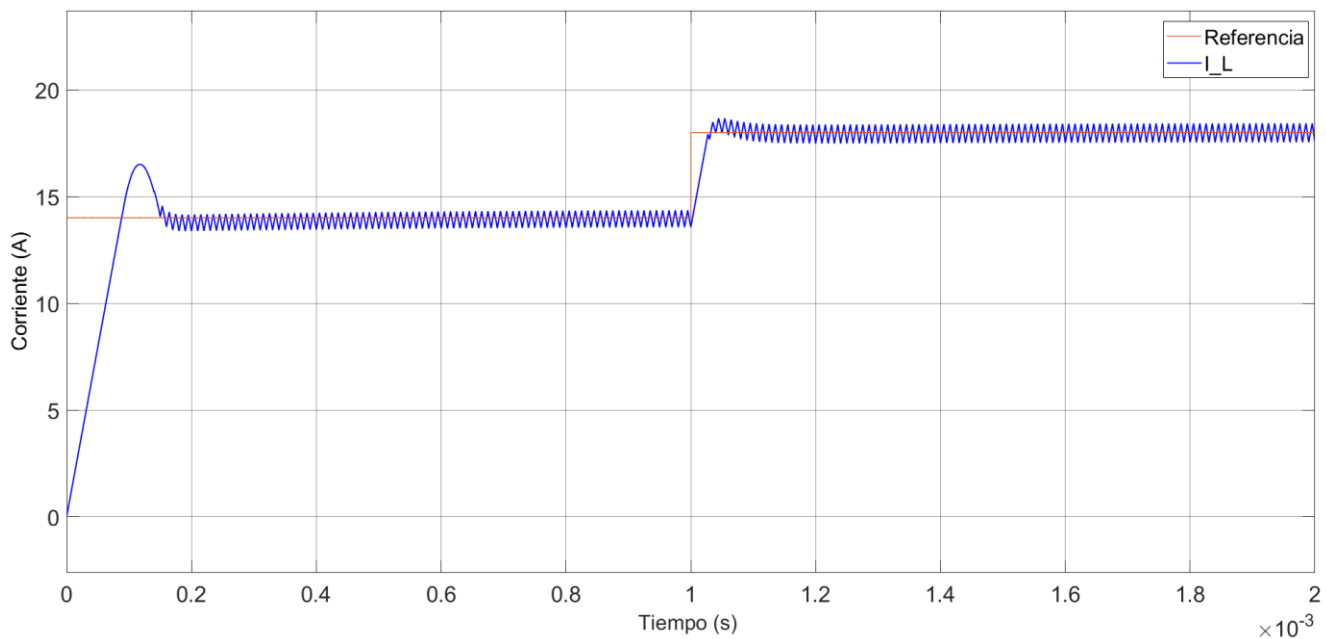


Figura 34. Señal de respuesta del control de corriente de descarga en modo Boost.

Capítulo 4. Diseño del sistema de administración de energía

En este capítulo se presenta el sistema de gestión de energía (EMS) el cual fue desarrollado mediante una estrategia basada en reglas. El EMS opera en función a los valores de potencia fotovoltaica, la potencia de las cargas y el estado de carga de las baterías. La estrategia busca priorizar el aprovechamiento de la energía fotovoltaica.

Para esta tesis se desarrolló un sistema de gestión de energía (EMS) basado en reglas o en una lógica de decisión. El EMS opera on-line, con información del sistema que se muestrea hora a hora. Desde luego la escala de tiempo o de muestreo se puede reducir. La selección del intervalo horario obedece al hecho de que la fuente de información consultada para la irradiancia en la zona de interés, se reporta cada hora [19]; y en consecuencia el análisis se hizo hora a hora.

En términos generales, en este EMS se prioriza el uso de la potencia fotovoltaica durante el periodo diurno, y la energía de las baterías durante el periodo nocturno, es decir, se busca minimizar el uso de la energía de la red eléctrica. En este contexto, el EMS se encarga de distribuir de manera automática y eficiente, el flujo de energía entre los diferentes subsistemas (paneles, baterías, carga, red). Debe distinguirse que esta gestión de energía se debe hacer ante las condiciones variantes de la generación fotovoltaica y de la demanda de energía por parte de la carga, lo cual significa que existirá también, variabilidad en la cantidad de energía que se le demande/inyecte a la red, así como variabilidad en la cantidad de energía que se pueda cargar/descargar hacia/desde las baterías.

Entre las restricciones claves para la operación del EMS se tienen las del estado de carga (SoC) y la del balance generación-demanda; mismos que se describen a continuación.

Estado de Carga (SoC).

$SoC_{Min} \leq SoC(t) \leq SoC_{Max}$. Es decir, en todo instante de tiempo, el SoC debe permanecer entre las cotas mínima y máxima, a fin de evitar problemas de sobrecarga o descarga profunda de las baterías. En este trabajo se define: $SoC_{Min} = 0.3$ y $SoC_{Max} = 1$, que, de manera correspondiente, equivalen a 30% y 100%.

Por otro lado, dado que las condiciones de carga/descarga de las baterías son cambiantes en cada decisión del EMS, es necesario en cada intervalo, llevar a cabo el cálculo del estado de carga, tal como se muestra en la siguiente expresión:

$$SoC(t) = SoC(t-1) - \frac{P_{Bat}(t)\Delta t}{E_{BatMax}} \quad (46)$$

Donde:

$SoC(t)$, es el estado de carga en el instante t .

$P_{Bat}(t)$, es la potencia de batería en el instante t .

E_{BatMax} , es la cantidad máxima de energía que puede almacenar el banco de baterías.

Δt , es el intervalo de tiempo (aquí es de una hora).

De igual manera, ante cada decisión del EMS y las condiciones actuales del $SoC(t)$, la potencia de baterías se debe ir calculando en cada intervalo de tiempo, tanto para la carga (P_{Bat_C}) como para la descarga (P_{Bat_D}); esto de acuerdo con las expresiones siguientes:

$$P_{Bat_D}(t) = [SoC(t) - SoC_{Min}]E_{BatMax} \quad (47)$$

$$P_{Bat_c}(t) = [SoC(t) - SoC_{Max}]E_{BatMax} \quad (48)$$

Balance generación-demanda.

La potencia de generación (P_{Gen}) es la suma de las potencias de todas las fuentes de energía y del sistema de almacenamiento de energía, que en este caso se define como sigue:

$$P_{Gen}(t) = P_{PV}(t) + P_{Red}(t) + P_{Bat}(t) \quad (49)$$

Donde:

$P_{PV}(t)$, es la potencia fotovoltaica en el instante t.

$P_{Red}(t)$, es la potencia de red en el instante t.

Debe notarse que tanto P_{Red} como P_{Bat} , pueden tomar valores positivos o negativos. En el caso de la red, cuando se trata de valores positivos, significa que la red está entregando energía a la carga, mientras que los valores negativos significan que está absorbiendo energía del sistema fotovoltaico. Y en el caso de las baterías, los valores positivos significan que las baterías entregan energía (proceso de descarga), mientras que los valores negativos significan que las baterías absorben energía (proceso de carga).

Así, el balance entre la generación y la demanda (P_L), debe satisfacer la relación siguiente:

$$P_L(t) = P_{Gen}(t) \quad (50)$$

Esta restricción es importante, porque de esta manera se evitan problemas de desequilibrios e inestabilidades en el sistema.

Tomando en cuenta estas restricciones, y el principio de funcionamiento del EMS basado en reglas, en este trabajo se proponen ocho modos de operación, los cuales se describen a continuación:

Modo 1: $P_{PV} = P_L$

La potencia fotovoltaica es igual al de las cargas, entonces se suministra energía a la carga directamente del conjunto de paneles.

Modo 2: $P_{PV} > P_L$ y $30\% \leq SoC \leq 100\%$

La potencia fotovoltaica es mayor al de las cargas y las baterías se encuentran descargadas, entonces los paneles suministran energía a las cargas y cargan a las baterías.

Modo 3: $P_{PV} > P_L$ y $SoC = 100\%$

La potencia fotovoltaica es mayor al de las cargas y las baterías se encuentran cargadas, entonces el excedente de energía de los paneles, se inyecta a la red.

Modo 4: $P_{PV} = 0$, $30\% \leq SoC \leq 100\%$ y $P_{Bat} > P_L$

La potencia fotovoltaica es igual a cero, las baterías están cargadas y su potencia es mayor al de las cargas, entonces se suministra energía a las cargas con las baterías.

Modo 5: $P_{PV} = 0$, $30\% \leq SoC \leq 100\%$ y $P_{Bat} < P_L$

La potencia fotovoltaica es igual a cero, las baterías están cargadas, pero la potencia de las cargas es mayor al de las baterías, entonces las baterías se apoyan de la red para satisfacer a las cargas.

Modo 6: $P_{PV} = 0$ y $SoC \leq 30\%$

La potencia fotovoltaica es igual a cero y las baterías no están cargadas, entonces se suministra energía con la red.

Modo 7: $P_{PV} \neq 0$ y $30\% \leq SoC \leq 100\%$

La potencia fotovoltaica no es igual a cero y las baterías se encuentran cargadas, entonces se suministra energía a las cargas con las baterías y los paneles.

Modo 8: $P_{PV} \neq 0$ y $SoC \leq 30\%$

La potencia fotovoltaica no es igual a cero y las baterías se encuentran descargadas, entonces se suministra energía con la red y los paneles.

La Figura 35 presenta el diagrama correspondiente al EMS desarrollado, en el cual se hace una medición continua de las potencias del panel fotovoltaico, la red eléctrica y del sistema de almacenamiento, así como del SoC de las baterías. A partir de estos valores medidos, el algoritmo EMS identifica en qué modo de operación debe entrar el sistema, incluyendo en qué proceso deben estar las baterías (carga, descarga o mantenerse en reposo).

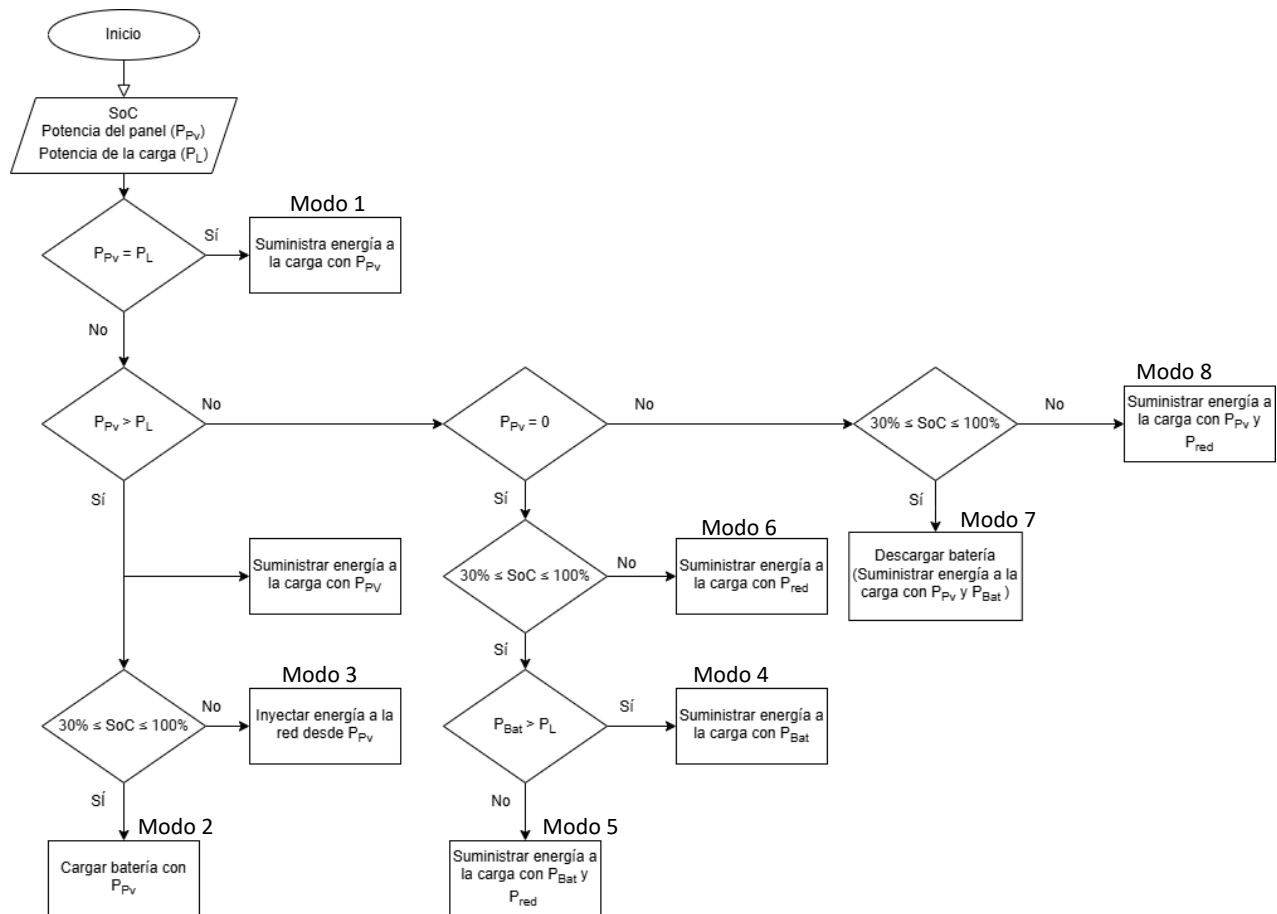


Figura 35. Diagrama de flujo de EMS propuesto

El algoritmo EMS elaborado para esta tesis se desarrolló mediante un código en el entorno de simulación *Matlab*. En el Anexo B se muestra dicho código, en donde se introdujeron los

valores de los perfiles de potencia del panel y la potencia de cargas. Además, como se mencionó, se definieron límites de operación del SoC para preservar la vida útil de las baterías, en este caso: $SoC_{Min} = 0.3$ y $SoC_{Max} = 1$.

Se efectuaron pruebas preliminares para comprobar que el código realizado del EMS cumpliera con los diferentes modos de operación planteados. La primera prueba del código EMS fue realizada con el perfil de potencia de carga, obtenido del conjunto de tres casas del día seleccionado (04 de septiembre 2024), junto con el perfil de potencia fotovoltaica calculada con los datos de irradiancia de ese mismo día; es decir, es una prueba de un día (24 hrs). En esta prueba se asignó un SoC inicial de 0.4 (40%).

En la Figura 36 se puede observar la respuesta del EMS. Las primeras dos señales de la Figura 36 representan los perfiles de potencia del panel y la potencia de carga. La tercera señal muestra la potencia de la red, en donde se puede notar que en las primeras horas de la mañana (hasta las 8am), para suplir la carga, la red provee una cantidad importante de energía; mientras que del periodo de 8-12hrs y de las 16hrs en adelante, la red no entrega ni recibe energía; y, por el contrario, en el intervalo de 12-16hrs, la red recibe energía del SFV. En la última señal se muestra el SoC de las baterías, que empieza en un 40%, y en la primera hora de operación (2am) llega a su límite inferior, manteniéndose así hasta las 8am; y, conforme la potencia fotovoltaica aumenta y es superior a la potencia de carga, existe energía suficiente para cargar las baterías, lo cual sucede en el intervalo de 8-13hrs. Nótese que la descarga de las baterías tiene lugar a partir de las 16hrs, es decir, las baterías proveen principalmente la demanda en el periodo de la tarde-noche.

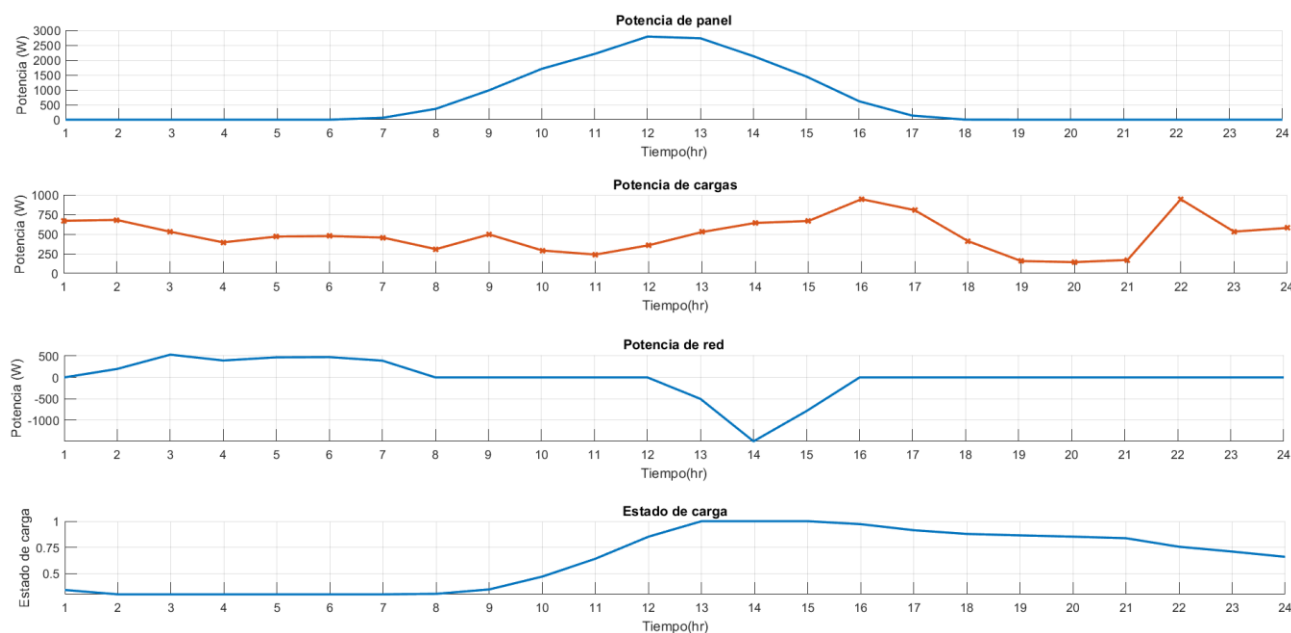


Figura 36. Prueba de la estrategia de EMS para un día. Potencias del SFV, de las cargas, de la red; y SoC de baterías.

En la Figura 37 se puede observar de manera más detallada cómo va evolucionando el SoC de las baterías, así como la potencia de la misma. En la imagen se puede apreciar que conforme la batería se está cargando la potencia es negativa, y conforme esta se descarga la potencia es positiva.

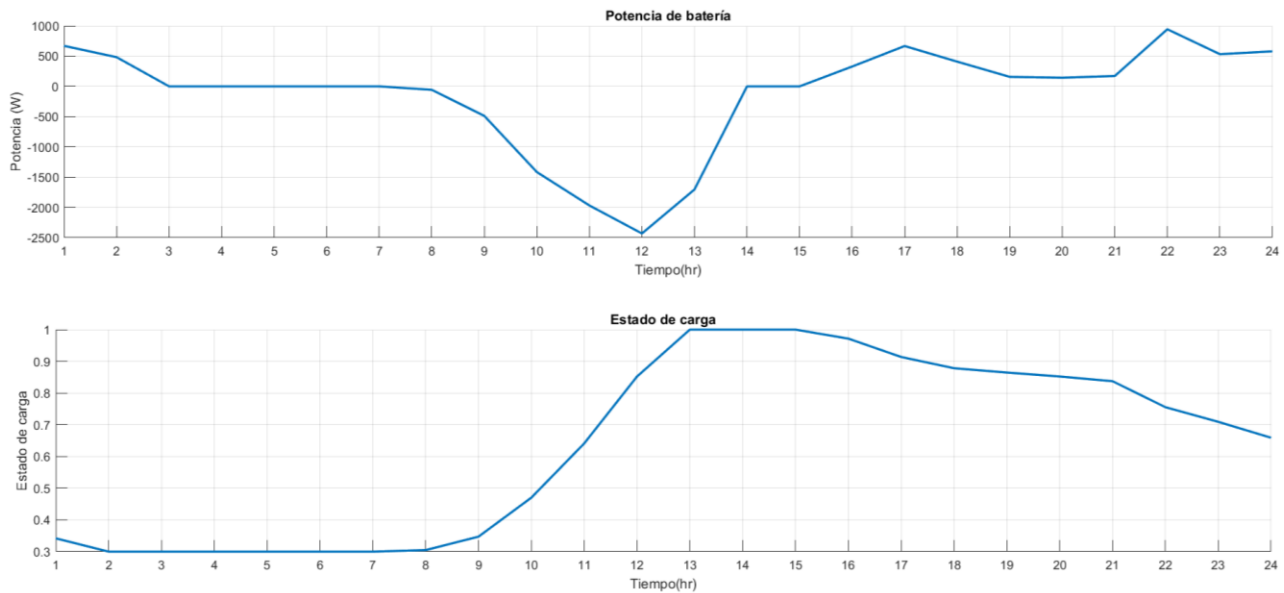


Figura 37. Prueba de la estrategia de EMS. Potencia de baterías y SoC.

A partir de esta prueba de un día, se puede validar la efectividad el EMS para hacer la gestión de la energía, ante las condiciones cambiantes de la potencia fotovoltaica y la demanda de la carga; no obstante, se lleva a cabo una segunda prueba para un periodo de 4 días. Para esta segunda prueba, se utilizó el perfil de cargas obtenido del conjunto de tres casas del periodo del 03-06 de septiembre 2024, junto con el perfil de potencia fotovoltaica, calculada con los datos de irradiancia de esos mismos días. En esta prueba se asignó un SoC inicial de 0.3 (30%).

Al igual que los resultados de la primera prueba, en la Figura 38 se observan las señales obtenidas de la implementación del EMS en el sistema. Los perfiles de potencia fotovoltaica y de potencia de cargas son las primeras dos señales de la Figura 38. Nótese cómo varía la potencia fotovoltaica y la potencia de carga a lo largo de los cuatro días, lo cual denota un escenario cambiante en medio del cual el EMS debe ser capaz de hacer la gestión energética. Por su parte, la potencia de red se muestra en la tercera señal, donde de igual manera se observan intervalos de potencia positiva (la red provee energía a la carga), así como intervalos de potencia negativa (se inyecta excedentes de energía a la red), e intervalos de potencia cero, lo que denota que el SFV y/o el banco de baterías es capaz de suministrar la demanda. Finalmente, la última señal, muestra cómo evoluciona el SoC a lo largo de la gestión del EMS. Algo que es importante resaltar en el comportamiento del SoC es, cómo día a día sube y baja, es decir, el banco de baterías se carga/descarga y termina más o menos en dónde empezó. Esto denota, entre otros, que el dimensionamiento del banco de baterías y del SFV, en relación con la demanda de energía de las cargas, ha sido adecuado, ya que, de lo contrario, por ejemplo, el SoC de las baterías se saturaría, y habría sobre-excedentes inyectados a la red.

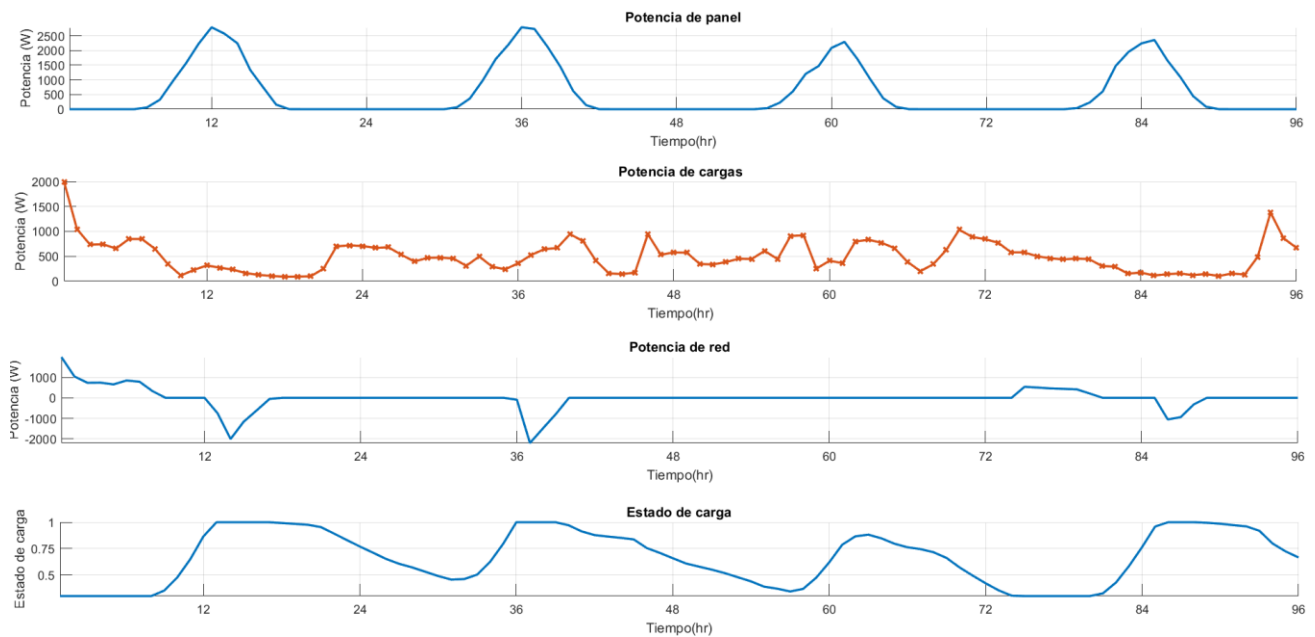


Figura 38. Prueba de la estrategia de EMS de cuatro días. Potencias del SFV, de las cargas, de la red; y SoC de baterías.

En la Figura 39 se puede observar de manera más detallada cómo va evolucionando el SoC y la potencia de las baterías. En la imagen se puede apreciar que conforme la batería se está cargando la potencia es negativa, y conforme esta se descarga la potencia es positiva. Al igual que en la Figura 37, este comportamiento en la potencia de batería es importante, porque, entre otros, deja ver claramente, la dinámica cambiante de la misma y lo que esto significa en cuanto a los procesos muy dinámicos de carga y descarga, que de manera específica se tiene que llevar a cabo a través del convertidor bidireccional Buck+Boost y los controladores correspondientes que se discutieron en las secciones 3.2 y 3.3.

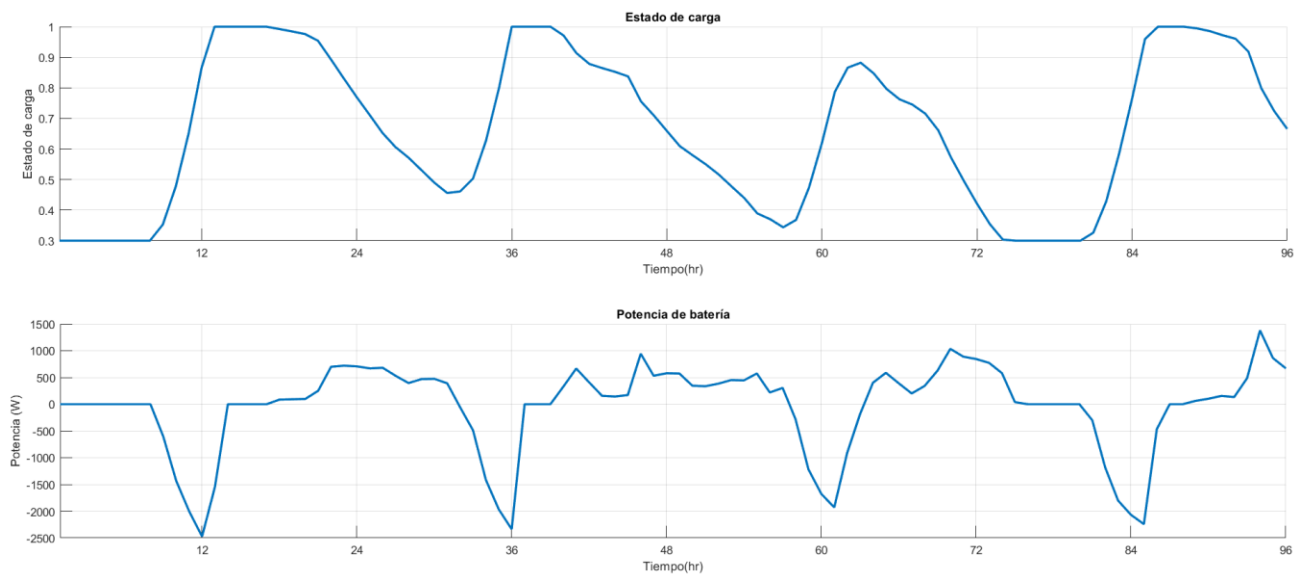


Figura 39. Prueba de la estrategia de EMS para cuatro días. SoC y potencia de baterías.

Capítulo 5. Pruebas de simulación y resultados

En este capítulo se realizan pruebas del sistema con la integración de los diferentes subsistemas desarrollados. La simulación se realiza en Simulink en donde se incluye los perfiles de potencia fotovoltaica y potencia de cargas, el BESS, el convertidor bidireccional Buck+Boost, los controles y el EMS.

Una vez completadas las diversas partes que integran al sistema propuesto, se continuó con la realización de diversas pruebas para comprobar el funcionamiento del mismo de manera integral. El simulador se desarrolló en el entorno de Simulink, entre otros, haciendo uso de los bloques de Función de MatLab. Este simulador incluye el sistema fotovoltaico, las cargas, el sistema de almacenamiento de energía basado en baterías (BESS, por sus siglas en inglés), así como el EMS. El sistema fotovoltaico y las cargas, dentro del simulador, se sintetizan únicamente a través de un set de datos que definen sus perfiles de potencia. En cuanto al BESS, en el simulador, este subsistema está compuesto por el convertidor Buck+Boost, las baterías y los controladores previamente diseñados. En la Figura 40 se observa el esquema general del simulador para el sistema propuesto.

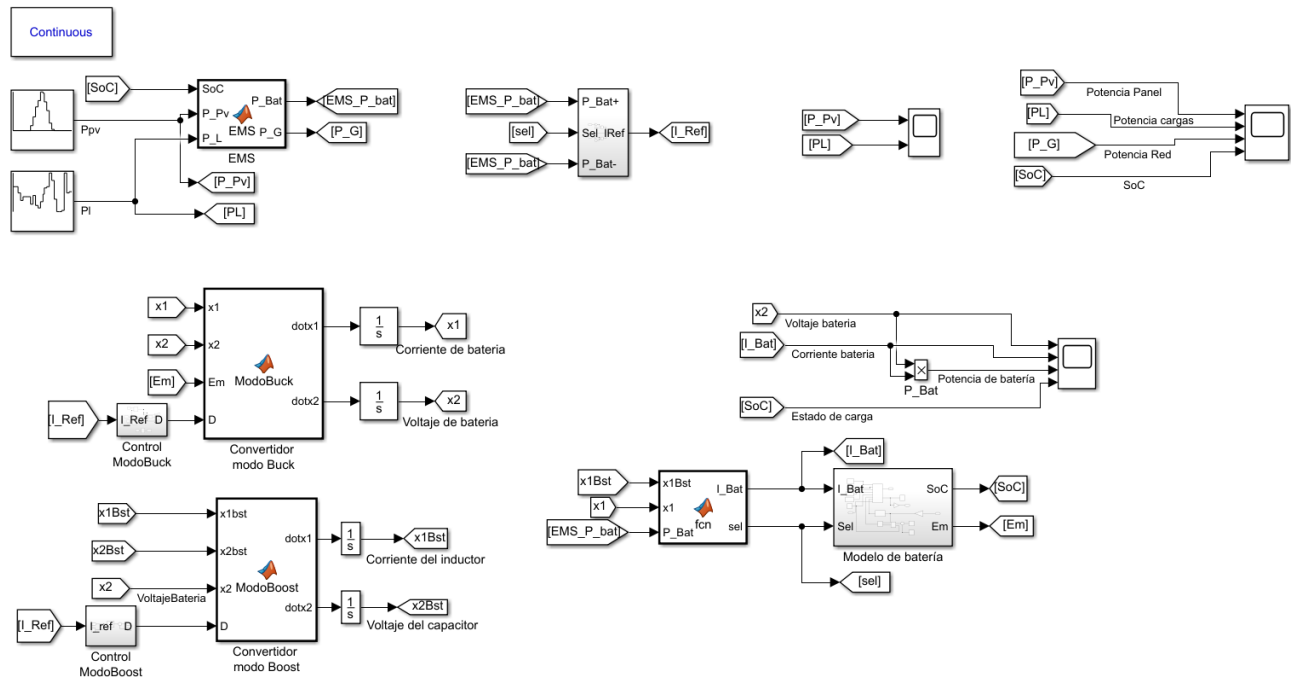


Figura 40. Esquema del diagrama de simulación del sistema propuesto.

Como se puede ver, el simulador no está conformado por subsistemas o circuitos eléctricos de cada uno de los elementos, sino por modelos matemáticos de estos subsistemas. Este esquema de simulación obedece a varias razones, pero, sobre todo, a la necesidad de llevar a cabo una simulación optimizada en términos de su tiempo de ejecución. Esto es importante, ya que, en una escala de tiempo grande, en el orden de las horas o los días, todo el sistema es operado por el EMS, sin embargo, los convertidores electrónicos de potencia, el banco de baterías y sus respectivos controladores, operan en una escala de tiempo menor, en el orden de los milisegundos o microsegundos. Así pues, al trabajar con los elementos eléctricos conmutados y llevar a cabo una simulación de horas o días, sería simplemente inviable. A continuación, se describen los subsistemas del simulador.

La Figura 41 muestra la sección correspondiente al algoritmo EMS, para la cual se utilizó un bloque de función en el cual se implementó la lógica de decisión mostrada en la Figura 35, mediante el código realizado en el capítulo 4. Las variables de entrada al EMS son la potencia fotovoltaica (P_{pv}), la potencia de carga (P_L) y el SoC. Como ya se mencionó, tanto P_{pv} como P_L , se introducen como un set de datos que definen sus perfiles de potencia, los cuales se conocen a priori en intervalos hora a hora; sin embargo, para proveer estos datos al EMS dentro del simulador, en una escala de tiempo segundo a segundo, se hace uso del bloque de secuencia repetitiva (repeating sequence stair), con lo que un valor determinado de P_{pv} o de P_L para alguna hora, se repite durante 3600s. Por su parte, el valor del SoC se obtiene directamente del modelo del banco de baterías.

En la Figura 41 también se muestra un bloque funcional de selección y generador de referencias de corriente. Como ya se explicó en relación al EMS, este genera el despacho o los valores de potencia de red P_{Red} y de potencia de batería P_{Bat} . En este sentido, de manera particular es de interés el valor de P_{Bat} ya que es el valor indicado por el EMS y que se espera que entregue (descarga) o absorba (carga) el banco de baterías. Sin embargo, debe recordarse que los controladores de la carga/descarga de baterías, a través del convertidor Buck+Boost, son controladores de corriente; en este sentido, el valor de P_{Bat} de referencia provisto por el EMS, se debe traducir en un valor de referencia de corriente, y eso es lo que hace este bloque funcional de generación de referencias de corriente. En este bloque, la variable de selección (Sel) lo que hace es, decidir si se trata de inyección (carga) o extracción (descarga) de corriente; es decir, modo de operación Buck o modo de operación Boost, respectivamente.

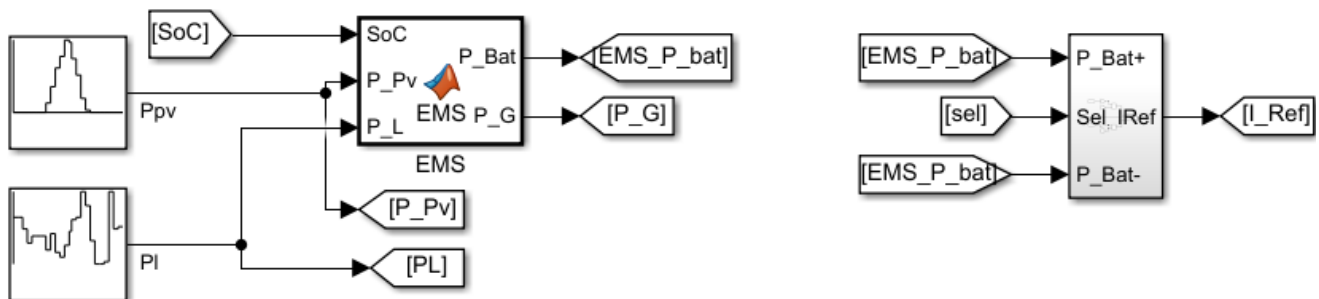


Figura 41. Sección del EMS y la corriente de referencia en el sistema.

Para emular el comportamiento del convertidor bidireccional Buck+Boost, se utilizaron dos bloques de función (ver Figura 42). De manera correspondiente, en cada bloque se colocaron las ecuaciones de las variables promediadas, para cada modo de operación, Buck (para carga) y Boost (para descarga). Particularmente, se resalta en el modelo Buck la entrada Em, que es el voltaje interno de las baterías, y aparece como entrada porque como se mostró en la Figura 29, para el modelado se integró el modelo del convertidor modo Buck con el modelo de baterías. En general, los modelos de variables promediadas a diferencia de los modelos conmutados, permiten llevar a cabo una simulación más rápida, sin perder la dinámica esencial del comportamiento del convertidor.

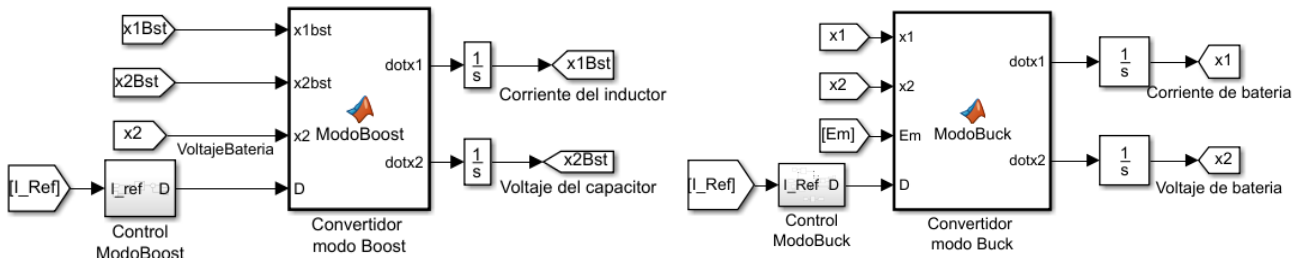


Figura 42. Modelo del convertidor Buck+Boost.

Ambos modelos operan de manera simultánea, ya que como se puede ver, el estado x_2 del modelo Buck es el voltaje de baterías, que a su vez es entrada del modelo Boost. Por su parte, el estado x_{2Bst} del modelo Boost es el voltaje del bus de CD, que a su vez es entrada del modelo Buck. En cuanto a las corrientes del inductor, estados x_1 y x_{1Bst} , cada modelo genera su propio valor; pero desde la perspectiva del modelo Buck, x_1 corresponde a la corriente de entrada de las baterías (carga), mientras que x_{1Bst} corresponde a la corriente de salida de las baterías (descarga). De manera análoga, cada modelo tiene su propia variable de control o ciclo de trabajo (D), que se obtiene de su correspondiente controlador, control modo Boost o control modo Buck.

Los controles de los procesos de carga y descarga de las baterías, también se agruparon en bloques de subsistemas. En la Figura 43 se muestra el subsistema del control para el proceso de descarga de baterías a través de un controlador PI; mientras que en la Figura 44 se muestra el subsistema de los controles para el proceso de carga de baterías. Recuérdese que para el proceso de carga se utiliza el método CC-CV, por lo tanto, se tienen dos controladores, uno de corriente y uno de voltaje, pero solo debe proveerse una sola acción de control o ciclo de trabajo (D). Para esto, se usa un mecanismo de selección de salida de acción de control, que identifica de manera automática cuando debe operar el control modo corriente y cuándo opera el control modo voltaje.

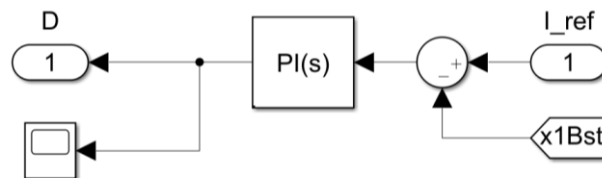


Figura 43. Bloque para el control del proceso de descarga de baterías (modo Boost).

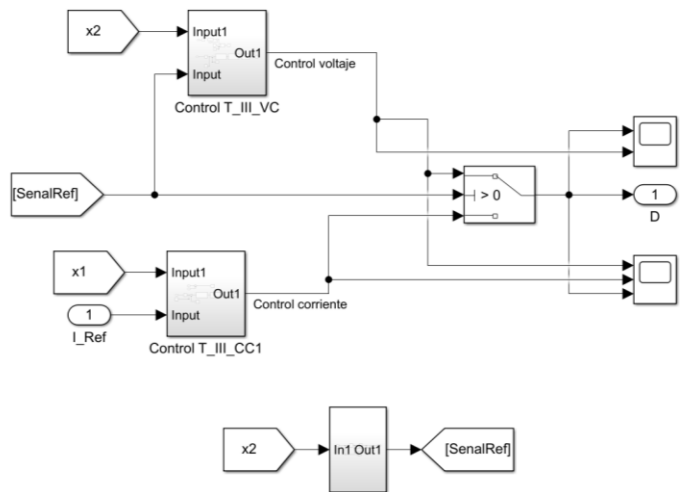


Figura 44. Bloque para el control del proceso de carga de baterías (modo Buck).

En cuanto al modelo del banco de baterías (ver Figura 45), este se modeló como una sola batería basado en el modelo de Shepherd, su implementación con bloques funcionales de Simulink es como el que se presentó en la Figura 27. No obstante, para la simulación funcional carga/descarga, se incorporó un bloque funcional adicional, que define qué corriente x_1 o x_{1Bst} , que provienen del modelo Buck+Boost, se usará como la corriente de batería I_{Bat} dentro del modelo de batería.

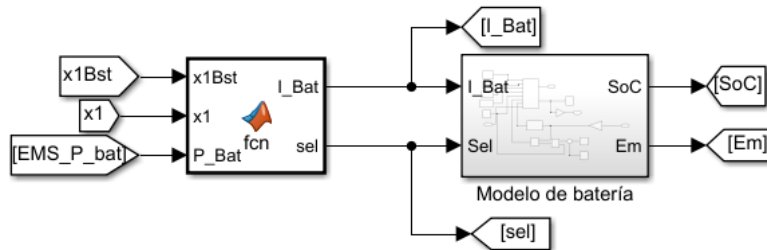


Figura 45. Modelo de baterías.

Como se mencionó, a partir de este simulador que integra todos los subsistemas para la gestión de energía del caso de estudio, a un nivel superior de control; y los subsistemas para la carga/descarga de baterías a un nivel inferior o local de control; entonces se llevan a cabo una serie de pruebas de simulación para comprobar el funcionamiento del sistema de manera integral.

Una primera prueba se lleva a cabo para un periodo de un día (24h o 86400s), para esto se cargan los datos correspondientes de P_{PV} y P_L ; y de manera particular, se define un SoC inicial de 50%. En la Figura 46 se muestran las señales obtenidas, las dos primeras señales muestran los perfiles de potencia fotovoltaica y potencia de cargas, correspondientes al día seleccionado, las siguientes señales corresponden a la potencia de red y de baterías resultantes del EMS. Nótese que la potencia de red es utilizada solo en un cierto periodo de tiempo, cuando $P_{PV} = 0$ y la batería no es capaz de suministrar energía a las cargas. Posterior a eso, $P_{PV} > P_L$, por lo que el panel suministra la energía necesaria a las cargas y comienza a cargar a las baterías. Dado que las baterías están totalmente cargadas, cuando $P_{PV} = 0$ (en la tarde-noche) estas se encargan de suministrar energía a las cargas por lo que no es necesario hacer uso de la red.

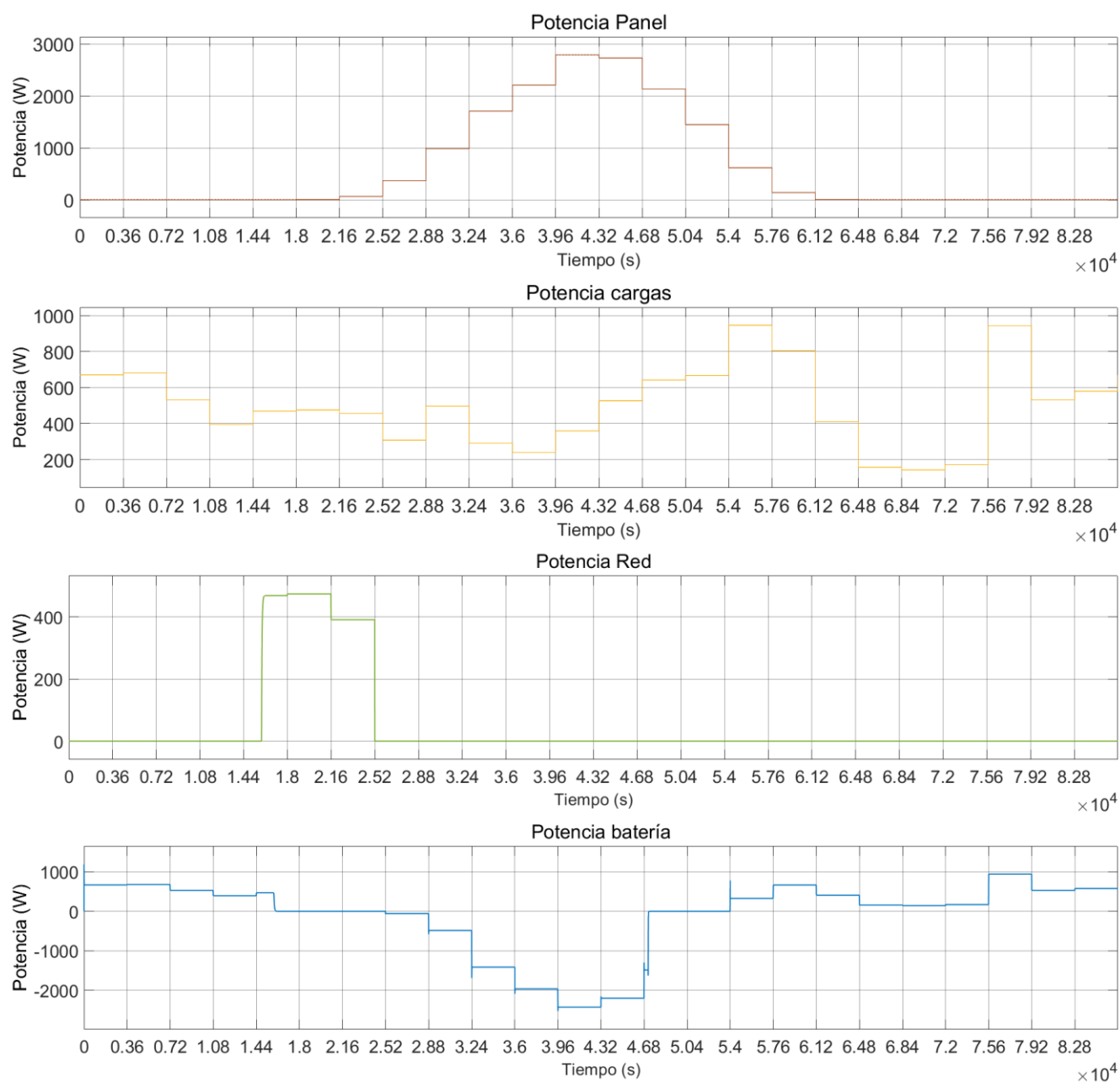


Figura 46. Prueba de un día. Potencia del SFV, de las cargas, de la red y de baterías.

En la Figura 47 se muestran las señales obtenidas de las baterías. Las dos primeras corresponden al voltaje y corriente de baterías y las dos últimas a la potencia y estado de carga de baterías. Los momentos en que las baterías se encuentran cargándose, la corriente y potencia de baterías se vuelven negativas y al momento de descargarlas se vuelven positivas. En los procesos de descarga se mantiene el límite establecido de 30% de SoC.

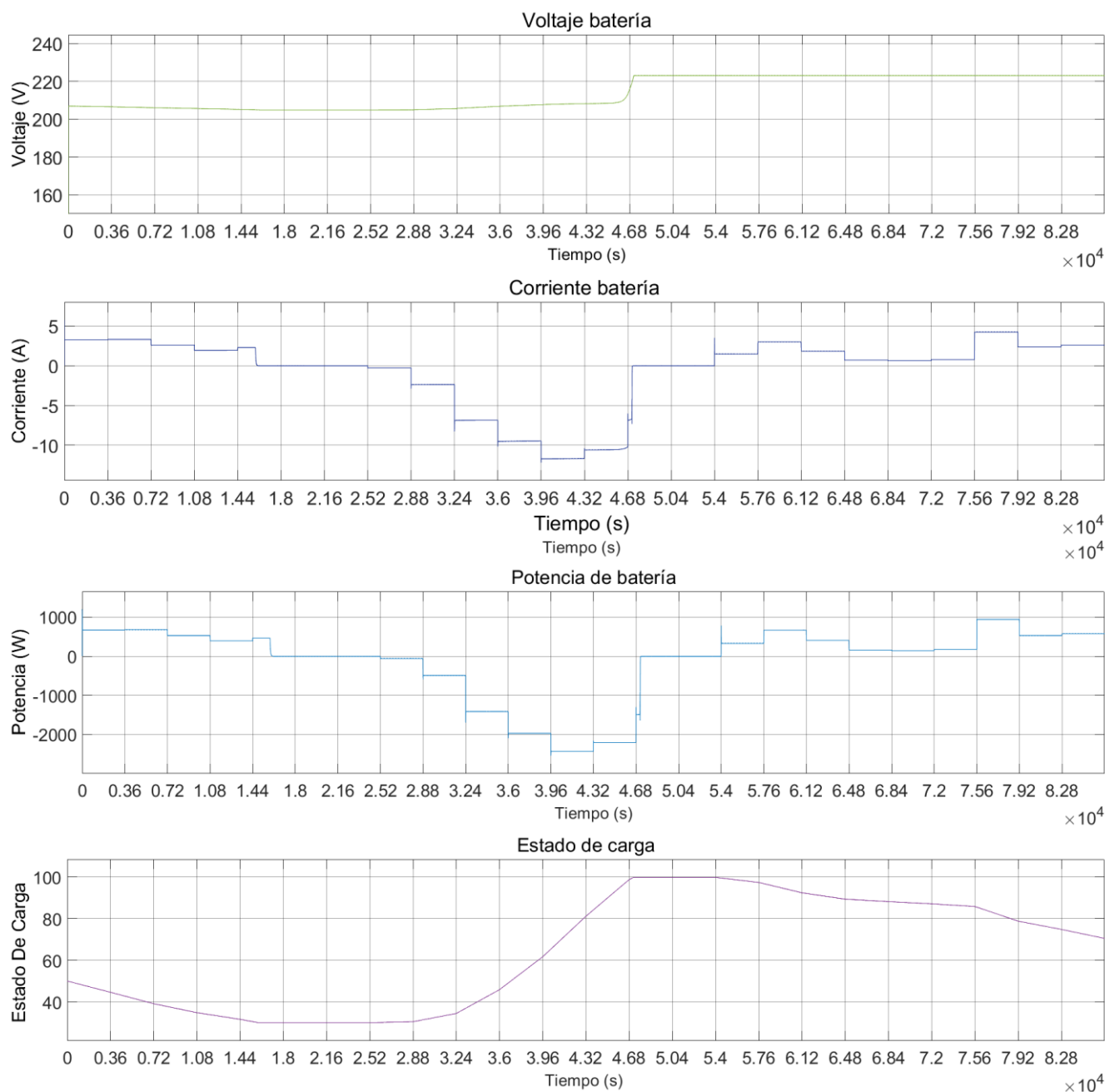


Figura 47. Señales de las baterías. Voltaje, corriente, potencia y SoC.

Como se puede observar en la Figura 46 y la Figura 47 durante el periodo de $t = 0$ y $t = 1.44 \times 10^{-4}$ s (las primeras 4 h) la batería es la encargada de suministrar energía a las cargas hasta que esta llega a su límite de SoC mínimo establecido en el EMS (30%), esto se debe a que el panel no tiene la capacidad energética para satisfacer a las cargas. Durante este periodo se encuentra trabajando el control de corriente (PI) del convertidor bidireccional en modo de operación Boost. En la Figura 48 se puede observar cómo el control mantiene la referencia de corriente en el primer proceso de descarga de batería llegando a $t = 1.44 \times 10^{-4}$ s, pasando ese tiempo la batería se mantiene en reposo dado que tanto la potencia fotovoltaica y la potencia de red no se encuentran cargándola. Posteriormente en $t = 5.4 \times 10^{-4}$ s, nuevamente se entra en el proceso de descarga de baterías, de igual manera en la Figura 48 se puede observar que el control mantiene la referencia de corriente.

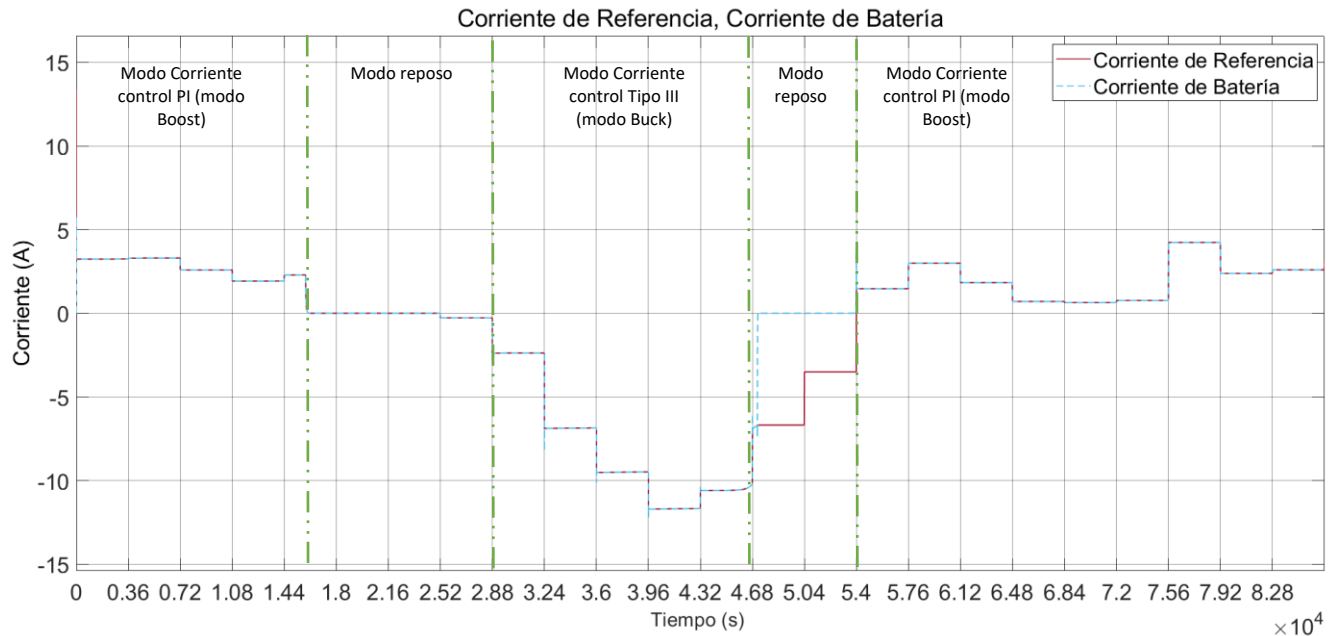


Figura 48. Señales obtenidas de la corriente de referencia y corriente de batería.

Pasando $t=2.88 \times 10^{-4}$ s (las primeras 8 h) la potencia del panel comienza a tener la capacidad energética para poder satisfacer a las cargas, y a su vez, tiene la capacidad de poder cargar a la batería, es en este periodo cuando empieza a trabajar el control CC-CV (control Tipo III) del convertidor bidireccional en modo de operación Buck. En esta primera etapa se entra en un control de corriente, en la Figura 48 se puede observar que la corriente se mantiene siguiendo a la referencia de corriente que se le aplica al control, solo que de una manera negativa ya que la batería se encuentra cargándose. Posteriormente, llegando al voltaje de referencia marcado (223 V) se realiza un cambio al control de voltaje constante en $t=4.68 \times 10^{-4}$ s (13 h) manteniendo un voltaje constante en la referencia establecida.

En la Figura 49 se muestra un acercamiento del periodo $t=1.44 \times 10^{-4}$ s, en donde se encuentra trabajando el control de corriente PI en modo de operación Boost, la señal de corriente de referencia es marcada por una línea continua roja y la señal de corriente de la batería es marcada por una línea punteada azul. Como se puede observar el control se mantiene siguiendo la referencia.

En la Figura 50 se muestra un acercamiento en el periodo de tiempo de $t=4.5 \times 10^{-4}$ s, en este periodo de tiempo se encuentra trabajando el control de corriente Tipo III en el modo de operación Buck, posteriormente casi llegando a $t=4.68 \times 10^{-4}$ s se cambia al control de voltaje Tipo III. Esta sección de la simulación es interesante porque muestra los dos modos de control (corriente y voltaje) del método de carga seleccionado CC-CV.

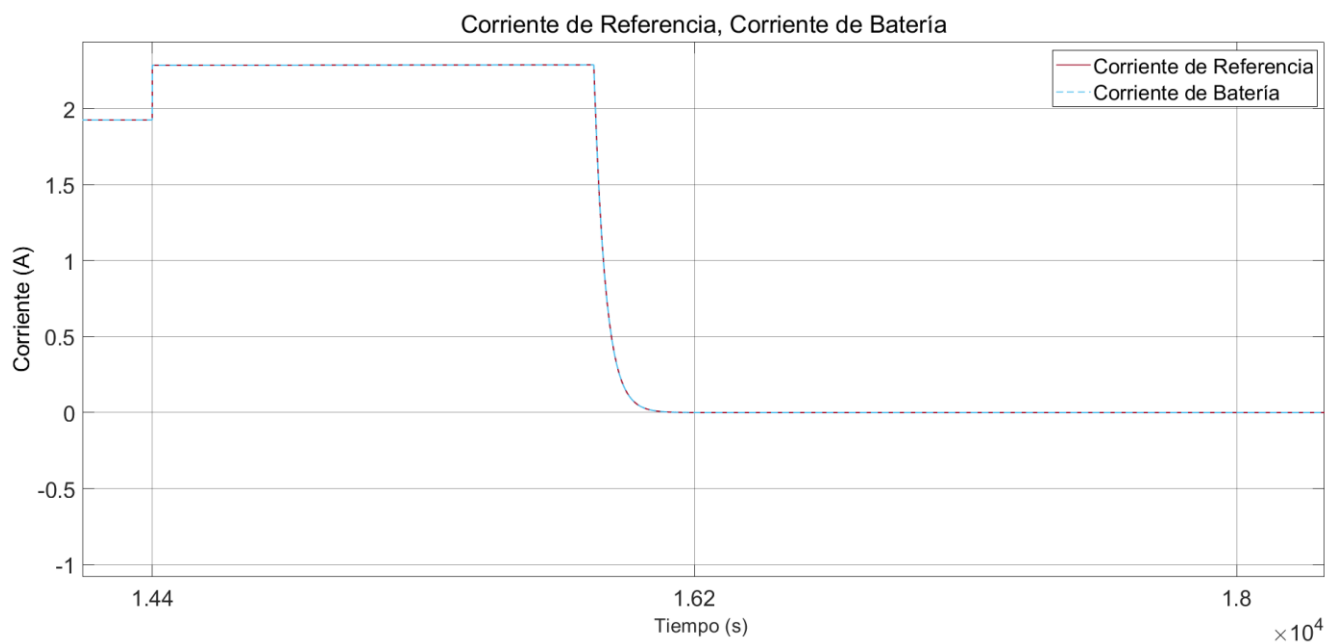


Figura 49. Señales de corriente de Referencia y corriente de batería. Control de corriente en modo Boost.

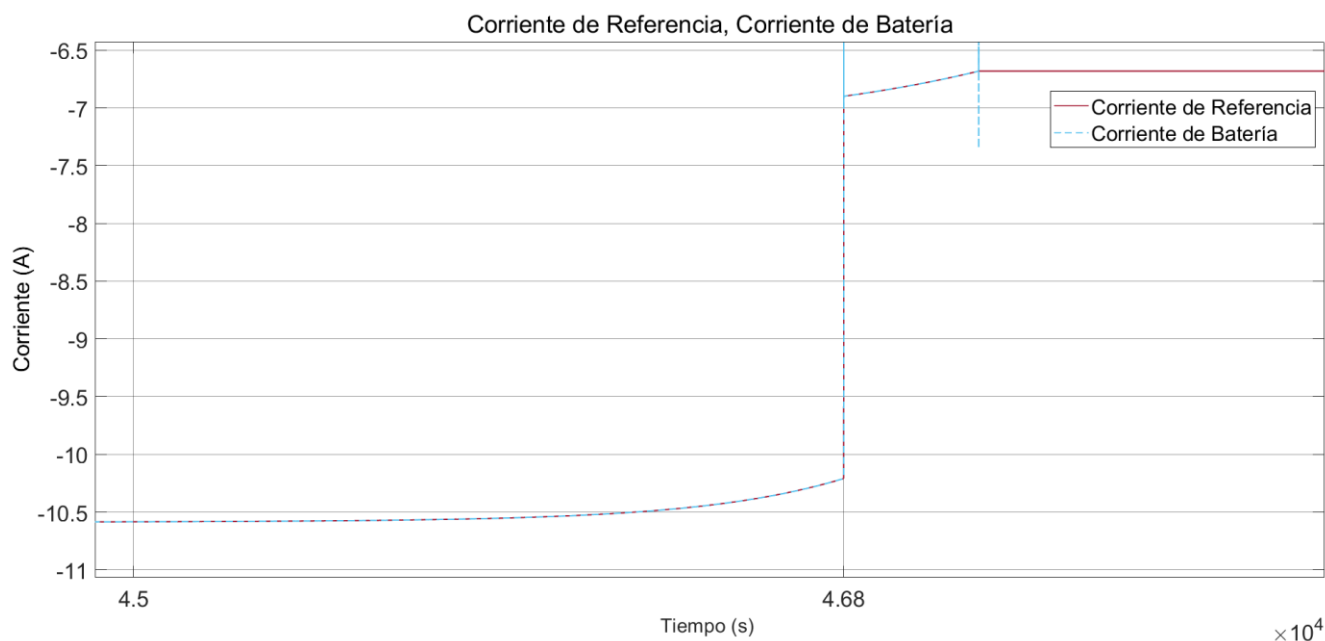


Figura 50. Señales de corriente de Referencia y corriente de batería. Control de corriente en modo Buck.

Se realizó otra prueba del sistema propuesto incorporando los perfiles de potencia fotovoltaica y potencia de cargas, correspondientes a cuatro días de los datos adquiridos. De igual manera a esta prueba se le fue asignado un SoC inicial del 50%. El tiempo de simulación corresponde a cuatro días seleccionados, por lo que se realizó la simulación con un tiempo de 345600s (correspondientes a 96h).

En la Figura 51 se muestran las señales obtenidas, las dos primeras señales muestran los perfiles de potencia fotovoltaica y potencia de cargas, correspondientes a los días seleccionados; la siguiente señal representa la potencia de red y la última la potencia de baterías. En las primeras horas, dado que $P_{PV} = 0$ y el SoC es del 50%, la carga se alimenta de

las baterías, llevándolas al límite de descarga establecido (30%) o $P_{Bat} = 0$; sin embargo, ante este escenario y cuando todavía $P_{PV} = 0$, la carga se tiene que alimentar de la red, por lo que $P_{Red} > 0$. Posteriormente $P_{PV} > P_L$ por lo que el SFV suministra la energía necesaria a las cargas, y al ser mayor que las cargas, el SFV comienza a cargar a las baterías ($P_{Bat} < 0$). Una vez las baterías están totalmente cargadas ($P_{Bat} = 0$) y $P_{PV} = 0$ (en la tarde-noche), estas se encargan de suministrar energía a las cargas por lo que no es necesario hacer uso de la red.

Este proceso se repite más o menos igual a lo largo de los cuatro días; de hecho, para las

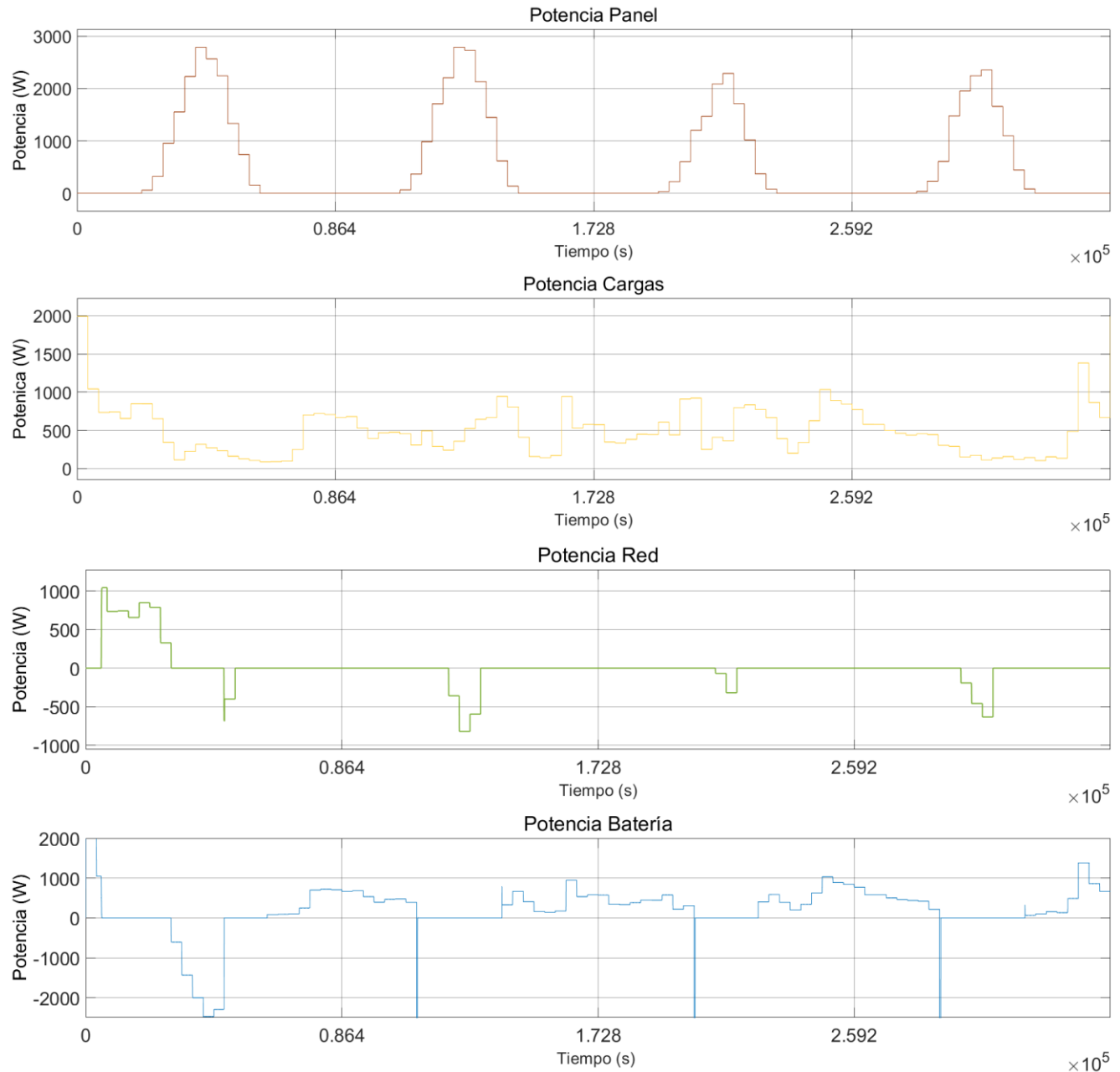


Figura 51. Prueba de cuatro días. Potencia del SFV, de las cargas, de la red y de baterías.

condiciones de potencia fotovoltaica y potencia de cargas de prueba, derivado de la gestión del EMS, se observa que, en los siguientes tres días, la red no provee energía, sino que, por el contrario, absorbe energía del SFV.

En la Figura 52 se muestran las señales obtenidas de las baterías. Las dos primeras corresponden al voltaje y corriente de baterías y las dos últimas a la potencia y estado de carga de baterías. En los procesos de descarga se mantiene el límite establecido de 30% de SoC, dado que P_L no llega a ser mayor que P_{PV} las baterías no llegan al límite de descarga establecido (exceptuando los momentos donde no hay sol y, por lo tanto, $P_{PV} = 0$).

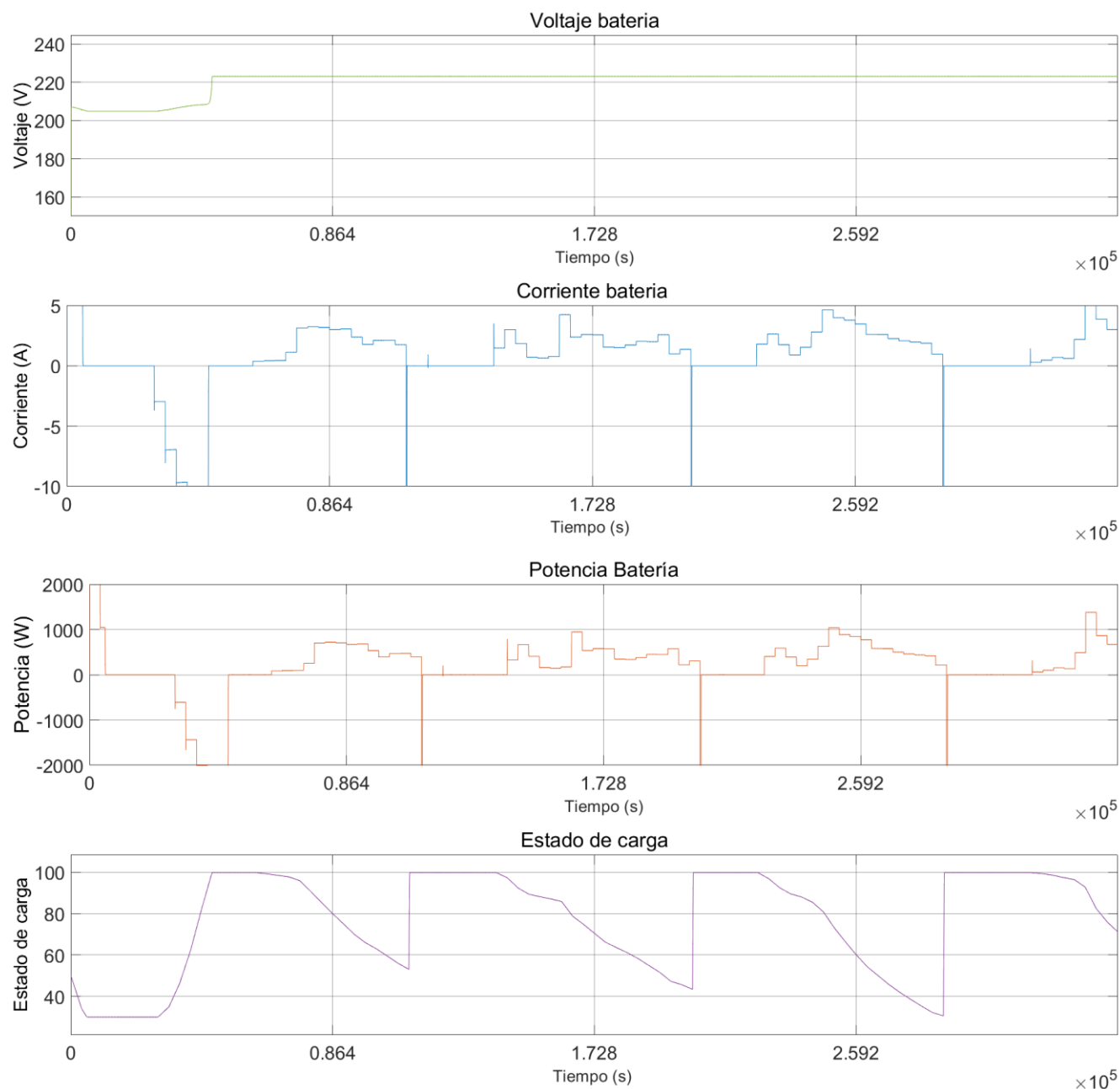


Figura 52. Señales de las baterías. Voltaje, corriente, potencia y SoC.

Capítulo 6. Conclusiones y trabajos futuros

Se concluye que el sistema propuesto y sus controladores presentan un funcionamiento adecuado ante variaciones de generación y demanda. Como trabajos futuros se plantea evaluar otros modelos de baterías, convertidores, estrategias de control y métodos de EMS

En este trabajo de tesis, se abordó un sistema híbrido de energía para el suministro energético de un conjunto de casas. El sistema híbrido está conformado por un sistema fotovoltaico (SFV), un sistema de almacenamiento de energía basado en baterías (BESS, por sus siglas en inglés), y la red eléctrica. De manera particular, el trabajo de tesis estuvo centrado en el desarrollo de un sistema de gestión de energía (EMS, por sus siglas en inglés) para operar de manera eficiente al sistema híbrido de energía, así como en el desarrollo de los convertidores de potencia y sus controladores locales que llevan a cabo el proceso de carga/descarga del BESS. El objetivo fue, evaluar el desempeño de este subsistema de carga/descarga (convertidor-controladores) en medio de condiciones cambiantes como sucede con la irradiancia y la demanda de energía. En este contexto, el EMS lleva a cabo la gestión/despacho de energía tanto de la potencia de red que se consume o se inyecta, así como de la potencia de batería que se consume o se inyecta. Y es esta energía de batería consumida o inyectada (descarga o carga) variante, la que el subsistema de carga/descarga tiene que controlar de manera eficiente.

El caso de estudio contempla: las cargas, el conjunto de paneles, un convertidor Boost de interface para los paneles, un control de seguimiento de máxima potencia (MPPT, por sus siglas en inglés), un convertidor Buck+Boost de interface para el proceso de carga/descarga del BESS, un banco de baterías (BESS), los controladores del proceso de carga y de descarga, y el EMS. La configuración del sistema híbrido, el tipo de convertidores, los controladores, el método de MPPT, así como la estrategia de EMS, se definió a partir de una correspondiente revisión del estado del arte.

En el trabajo se llevó a cabo el dimensionamiento de cada subsistema. Por ejemplo, para determinar el tipo y cantidad de paneles fotovoltaicos, se partió de la definición de la zona de instalación, en este caso del municipio de Jojutla, Morelos; y en relación con ello, de la información de la irradiancia disponible en la zona, así como del consumo de energía de las cargas de interés. De manera específica, la cantidad de energía o potencia de consumo de las cargas, se tomó de registros reportados en algunas fuentes, sobre el consumo real de casas de tipo familiar. Basado en esta información, adicionalmente, se llevó a cabo la selección y dimensionamiento del BESS, a partir de una comparación entre la capacidad de generación del SFV y de la demanda de energía de la carga.

De igual manera cada uno de los convertidores (Boost y Buck+Boost) fue dimensionado tomando en cuenta, entre otras cosas, los valores de potencia máxima de operación, así como los voltajes de operación, ya sea del bus de CD y del voltaje de baterías.

De manera específica, se resalta que el convertidor Buck+Boost es un convertidor bi-direccional y por ello, es capaz de manejar la energía que va del bus de CD al BESS (carga), modo Buck; así como la energía que va del BESS al bus de CD (descarga), modo Boost. Sin embargo, para ello fue necesario diseñar controladores correspondientes para cada uno de los procesos de carga y descarga. Para la descarga se hizo uso de un controlador de corriente de tipo PI y para la carga se hizo uso de un par de controladores tipo III, uno de corriente y otro de voltaje. Se diseñaron dos controladores tipo III (corriente y voltaje) porque el método de carga seleccionado fue el de corriente constante – voltaje constante (CC-CV).

Para el proceso de diseño de los controladores en cada modo del convertidor Buck+Boost, se llevó a cabo todo el proceso de modelado en cada uno de los modos, modelos de

variables promediadas, la linealización mediante análisis de pequeña señal y la obtención de las funciones de transferencia correspondientes. Se resalta de manera particular, el proceso de diseño del par de controladores (de corriente y voltaje) para el modo Buck. La particularidad subyace en el hecho de que, en este modo, a la salida del convertidor se tiene al BESS y no a una carga resistiva como se suele suponer en el diseño de controladores para convertidores cd-cd. Cuando se diseñan controladores asumiendo una carga resistiva y, por el contrario, se le pone una carga dinámica a la salida, el desempeño del sistema convertidor-control es muy deficiente, incluso llevando al sistema a la inestabilidad. En este sentido, fue necesario y relevante, el contemplar el modelo del BESS a la salida del convertidor en modo Buck, y llevar a cabo un modelado integral convertidor-batería, para así a partir de ello, diseñar los controladores correspondientes.

De acuerdo con lo mencionado previamente, fue necesario definir un modelo de BESS. El BESS es un sistema dinámico, con una naturaleza compleja, que, no obstante, se puede modelar de diversas formas. Una de las formas más sencillas es como una fuente de voltaje controlada y una resistencia serie de salida, este se conoce como modelo de Shepherd. La fuente controlada depende de varios parámetros del BESS, así como de la corriente que entra o sale del mismo. Para la determinación de los parámetros se hizo uso de las características de descarga del BESS, mediante el ToolBox del modelo de batería de Simulink y de datos de la batería seleccionada.

En cuanto al EMS, este se diseñó con un enfoque basado en reglas (o una lógica if-then-else), en donde aquí, se predefinieron 8 modos de operación. Estos modos de operación, en principio, son suficientes para establecer los flujos energéticos e.g. del SFV a la carga y BESS, del SFV a la carga y red, del BESS a la carga, etc. El esquema es sencillo y eficiente, ya que para su funcionamiento solo requiere del conocimiento actual de las potencias de carga y fotovoltaica, así como del estado de carga (SoC, por sus siglas en inglés) del BESS. Desde luego, también se le definen restricciones operativas claves, como límites máximo y mínimo del SoC, para cuidar la salud del BESS, y el balance generación-demanda. En el principio de operación, el EMS prioriza el aprovechamiento de la energía del SFV.

En relación al sistema completo se diseñó un simulador en la plataforma de Simulink de MatLab, para llevar a cabo las diversas pruebas de simulación y validar el sistema de manera integral. Uno de los desafíos fue, la necesidad de llevar a cabo una simulación de doble propósito; por un lado, el de evaluar el EMS que requiere tiempos de simulación en la escala de las horas o los días; y, por otro lado, el de evaluar los controles locales de la carga/descarga del BESS, que requieren tiempos de simulación en la escala de los milisegundos; sin dejar de lado, que los convertidores, son sistemas conmutados que operan a altas frecuencias o en escalas de tiempo de orden de los milisegundos o microsegundos. Esta condición de diversas escalas de tiempo conlleva a tiempos de simulación muy, muy largos, o imposibles por la saturación del procesamiento computacional.

Como parte de la solución al problema previamente descrito, por un lado, se hizo uso del modelo matemático del BESS, así como de los modelos matemáticos promediados, modo Buck y modo Boost, en paralelo, del convertidor Buck+Boost. De esta manera, también se pudo incorporar, de forma paralela, los controladores correspondientes a cada modo de operación. Desde luego, fue necesario, implementar algunos mecanismos para decidir cuándo tenía que entrar en función el modo Boost o el modo Buck, lo mismo que sus controladores y la corriente de inductor de cada convertidor. Esto último es clave, ya que en el caso del modelo Boost (descarga), la corriente de inductor sería la corriente de salida del BESS; y en el caso del modelo Buck (carga), la corriente de inductor sería la corriente de entrada del BESS.

De acuerdo con la serie de pruebas llevadas a cabo, en el trabajo, se pudo verificar:

- El adecuado desempeño de cada uno de los subsistemas, evaluados de manera parcial.
- El adecuado dimensionamiento del sistema basado en información real.
- El adecuado desempeño del EMS ante condiciones cambiantes de irradiancia y de la demanda de potencia por parte de las cargas.
- La adecuada integración de los componentes en el simulador, capaz de llevar a cabo simulaciones en periodos de tiempo largo (horas y días), ejecutados en poco tiempo de cómputo.
- El desempeño adecuado del EMS en el simulador integral. Llevando a cabo una gestión eficiente, al aprovechar la totalidad de la energía fotovoltaica, reduciendo el consumo de la red eléctrica, decidiendo la cantidad de potencia de batería para carga/descarga, así como manteniendo el SoC dentro de los valores límite. Y, por último, y no menos importante, satisfaciendo la demanda de la carga y/o cuidando el equilibrio entre la generación y la demanda.
- El desempeño adecuado de los controladores locales, en los procesos de carga y descarga del BESS. En donde la forma y los tiempos de respuesta de los controladores de corriente y voltaje, coinciden con la forma y tiempos de respuesta de diseño. Además, de su capacidad para responder adecuadamente y de manera estable, frente a las variaciones de la referencia de corriente (cambios de potencia de batería) según de manera dinámica lo fuera decidiendo el EMS.

En términos generales, las simulaciones realizadas muestran que el sistema con la arquitectura de control local y la estrategia de gestión propuestos, son capaces de suministrar energía adecuadamente a los diferentes elementos integrados en el sistema, manteniendo una buena operatividad y favoreciendo el uso de las energías renovables disponibles.

Por otro lado, si bien los resultados obtenidos permiten comprobar su correcto funcionamiento, existen diversos factores que pueden ser considerados para trabajos futuros con el propósito de mejorar o explorar otras áreas de interés, por ejemplo:

- Explorar otros modelos de baterías.
- Buscar alternativas para poder simular el sistema de manera más eficiente en términos de tiempo, con los circuitos de los convertidores, para evitar modelos paralelos y observar ciertos fenómenos inherentes de los convertidores, y obtener resultados más representativos a lo que se espera de una implementación práctica. Por ejemplo, hacer uso de plataformas de simulación en tiempo real.
- En relación con lo previo, incorporar de manera explícita, otros subsistemas que aquí se consideraron de manera genérica como la potencia de red, cuando se puede hacer la integración explícita del inversor, del filtro de acoplamiento con la red, y del controlador de inversor. Con lo cual, se podría evaluar la operatividad del sistema con escenarios aún más reales.
- Evaluar otro tipo de convertidores bidireccionales.
- Evaluar otras estrategias para los controladores locales, ya sea de tipo lineal o no lineal.
- Evaluar otras estrategias de EMS, entre otras, como aquellas basadas en un enfoque de optimización.

Referencias

- [1] M. Yekini Suberu, M. Wazir Mustafa, and N. Bashir, "Energy storage systems for renewable energy power sector integration and mitigation of intermittency," 2014, *Elsevier Ltd.* doi: 10.1016/j.rser.2014.04.009.
- [2] Larbi Tebessi University, Institute of Electrical and Electronics Engineers. Algeria Section, and Institute of Electrical and Electronics Engineers, *Power Management of Grid Connected PV System with Integrated Energy Storage*.
- [3] I. Renewable Energy Agency, *RENEWABLE ENERGY STATISTICS 2025 STATISTIQUES D'ÉNERGIE RENOUVELABLE 2025 ESTADÍSTICAS DE ENERGÍA RENOVABLE 2025*. 2025. [Online]. Available: www.irena.org
- [4] Secretaría de energía, "P R O D E S E N 2 0 2 4-2 0 3 8," 2024.
- [5] M. Sandelic, A. Sangwongwanich, and F. Blaabjerg, "Reliability evaluation of PV systems with integrated battery energy storage systems: DC-coupled and AC-coupled configurations," *Electronics (Switzerland)*, vol. 8, no. 9, Sep. 2019, doi: 10.3390/electronics8091059.
- [6] M. Argyrou, C. Spanias, C. Marouchos, S. Kalogirou, and P. Christodoulide, *Energy management and modeling of a grid-connected BIPV system with battery energy storage*. IEEE, 2019.
- [7] M. M. Hasan, S. Jaman, T. Geury, and O. Hegazy, "Design and Simulation of a Grid-Connected Two-Stage Bidirectional Converter for a Combined PV-Stationary Energy Storage System," in *2022 2nd International Conference on Sustainable Mobility Applications, Renewables and Technology, SMART 2022*, Institute of Electrical and Electronics Engineers Inc., 2022. doi: 10.1109/SMART55236.2022.9990149.
- [8] P. Athira Anil and M. Rajesh, "PV-ESS connected to a grid tied Inverter with a High gain DC-DC converter," in *ICCISc 2021 - 2021 International Conference on Communication, Control and Information Sciences, Proceedings*, Institute of Electrical and Electronics Engineers Inc., Jun. 2021. doi: 10.1109/ICCISc52257.2021.9484974.
- [9] Y. Shao and X. Wu, "Modeling and Control of Bi-directional Converter based on Battery Management in Photovoltaic System," in *2022 IEEE International Conference on Advances in Electrical Engineering and Computer Applications, AEECA 2022*, Institute of Electrical and Electronics Engineers Inc., 2022, pp. 335–341. doi: 10.1109/AEECA55500.2022.9919027.
- [10] D. Xu, G. Wang, W. Yan, and X. Yan, "A novel adaptive command-filtered backstepping sliding mode control for PV grid-connected system with energy storage," *Solar Energy*, vol. 178, pp. 222–230, Jan. 2019, doi: 10.1016/j.solener.2018.12.033.
- [11] G. Sharma and R. Gupta, "Solar PV Based Grid Scale Battery Energy Storage System with IBC and DAB," in *2023 7th International Conference on Computer Applications in Electrical Engineering-Recent Advances: Sustainable Transportation Systems, CERA 2023*, Institute of Electrical and Electronics Engineers Inc., 2023. doi: 10.1109/CERA59325.2023.10455215.
- [12] S. Pamu, R. Thogaru, and A. Mitra, *Resiliency Analysis of Grid connected Solar PV System with Battery Support*. IEEE, 2020.
- [13] S. Marhraoui, A. Abbou, Z. Cabrane, and S. Krit, "Sliding Mode Control for PV Grid-Connected System With Energy Storage," 2020, pp. 168–199. doi: 10.4018/978-1-7998-4381-8.ch008.
- [14] Metwally S, Zhang X, Ali S, and Krishnamoorthy H, *Solar PV and BESS based Home Energy System*. Institute of Electrical and Electronics Engineers, 2019.
- [15] H. M. M. Aflal, W. E. P. S. Ediriweera, and H. I. D. Pubudunee, "Energy Management System for Solar PV System to Reduce Peak Demand," in *EECon 2024 - Proceedings of the 2024 4th International Conference on Electrical Engineering*, Institute of Electrical and Electronics Engineers Inc., 2024, pp. 49–53. doi: 10.1109/EECon64470.2024.10841875.

- [16] M. Abuagreb, H. Beleed, and B. K. Johnson, "Energy Management of a Battery Combined with PV Generation," in *51st North American Power Symposium, NAPS 2019*, Institute of Electrical and Electronics Engineers Inc., Oct. 2019. doi: 10.1109/NAPS46351.2019.9000314.
- [17] K. N. C. Jayasena, D. K. J. S. Jayamaha, N. W. A. Lidula, and A. D. Rajapakse, *SoC Based Multi-Mode Battery Energy Management System for DC Microgrids*. IEEE, 2019.
- [18] Ing. A. E. G. García, Dra. M. B. Pacheco, Dr. M. A. Medina, Dr. C. D. G. Beltrán, and Dr. R. Garduño, "Optimization of the pv surface coverage system in Morelos," *Tecnología y Ciencia Aplicada*, pp. 128–132, Oct. 2024, doi: 10.3892/ol.2018.8567.
- [19] "NASA POWER | Data Access Viewer (DAV)." Accessed: Jul. 17, 2025. [Online]. Available: <https://power.larc.nasa.gov/data-access-viewer/>
- [20] FUNIBER, "ENERGÍA SOLAR FOTOVOLTAICA."
- [21] Pacific Power Association (PPA) and Sustainable Energy Industry Association of the Pacific Islands (SEIAPI), "GRID CONNECTED PV SYSTEMS WITH BATTERY ENERGY STORAGE SYSTEMS DESIGN GUIDELINES," 2020. Accessed: Jul. 01, 2025. [Online]. Available: <https://www.seiapi.com/wp-content/uploads/2022/02/Grid-Connected-PV-Systems-with-Battery-Energy-Storage-Systems-Design-Guideline-V1-July-2020.pdf>
- [22] Q. Peng, A. Sangwongwanich, Y. Yang, and F. Blaabjerg, "Grid-friendly power control for smart photovoltaic systems," *Solar Energy*, vol. 210, pp. 115–127, Nov. 2020, doi: 10.1016/j.solener.2020.05.001.
- [23] S. Deshmukh, S. Limkar, R. Nagthane, V. N. Pande, and A. V. Tare, "Design of Grid-Connected Solar PV System Integrated with Battery Energy Storage System," in *2023 3rd Asian Conference on Innovation in Technology, ASIANCON 2023*, Institute of Electrical and Electronics Engineers Inc., 2023. doi: 10.1109/ASIANCON58793.2023.10269854.
- [24] H. A. Serhan and E. M. Ahmed, "Effect of the Different Charging Techniques on Battery Life-time: Review."
- [25] E. Banguero, A. Correcher, Á. Pérez-Navarro, F. Morant, and A. Aristizabal, "A review on battery charging and discharging control strategies: Application to renewable energy systems," Apr. 01, 2018, *MDPI AG*. doi: 10.3390/en11041021.
- [26] S. M. Mousavi G. and M. Nikdel, "Various battery models for various simulation studies and applications," Apr. 2014. doi: 10.1016/j.rser.2014.01.048.
- [27] R. R. Thakkar, Y. S. Rao, and R. R. sawant, "Performance Analysis of Electrical Equivalent Circuit Models of Lithium-ion Battery," in *2020 IEEE Pune Section International Conference, PuneCon 2020*, Institute of Electrical and Electronics Engineers Inc., Dec. 2020, pp. 103–107. doi: 10.1109/PuneCon50868.2020.9362386.
- [28] L. Zhang, W. Dong, Y. Yang, and M. Sun, "Modeling and simulation of working characteristics of lithium titanate batteries for emergency power transmission," *Tehnicki Vjesnik*, vol. 26, no. 1, pp. 263–269, Feb. 2019, doi: 10.17559/TV-20180829092302.
- [29] S. M. Mousavi G. and M. Nikdel, "Various battery models for various simulation studies and applications," Apr. 2014. doi: 10.1016/j.rser.2014.01.048.
- [30] R. R. Thakkar, Y. S. Rao, and R. R. sawant, "Performance Analysis of Electrical Equivalent Circuit Models of Lithium-ion Battery," in *2020 IEEE Pune Section International Conference, PuneCon 2020*, Institute of Electrical and Electronics Engineers Inc., Dec. 2020, pp. 103–107. doi: 10.1109/PuneCon50868.2020.9362386.
- [31] S. N. Motapon, A. Lupien-Bedard, L. A. Dessaint, H. Fortin-Blanchette, and K. Al-Haddad, "A Generic Electrothermal Li-ion Battery Model for Rapid Evaluation of Cell Temperature Temporal Evolution," *IEEE*

Transactions on Industrial Electronics, vol. 64, no. 2, pp. 998–1008, Feb. 2017, doi: 10.1109/TIE.2016.2618363.

- [32] Chang Y and Lai Y, *Digital Compensator Design to Reduce Phase Lag for Multi-Sampling Controlled DC-DC Converters*. IEEE, 2009.

Anexo A

Se utilizó el bloque de Matlab Function de *Simulink* para integrar el algoritmo MPPT en el convertidor Boost diseñado para la conexión a la salida de los paneles solares, en la Figura A1 se muestra el código utilizado.

En este código se monitorean los valores de voltaje y de corriente del panel solar, en este código se modifica los valores del ciclo de trabajo del convertidor Boost, se disminuye su valor cuando se está operando en la izquierda del MPP y se aumenta su valor cuando se encuentra operando a la derecha del MPP.

```
1 function duty = MPPT_algorithm(vpv,ipv)
2 % Algoritmo de conductancia incremental (INC)MPPT
3 duty_init = 0.2;
4 %Valor máximo y mínimo usados para limitar el ciclo de trabajo entre 0 y 1
5 duty_min=0;
6 duty_max=1;
7 delta=20e-7;
8
9 persistent Vold Pold duty_old;
10 % La variable tipo pesistent puede almacenar los datos
11 % Se necesitan los valores anteriores para obtener la diferencia entre los valores nuevos y anteriores
12 if isempty(Vold)
13     Vold=0;
14     Pold=0;
15     duty_old=duty_init;
16 end
17 P= vpv*ipv; % Potencia
18 dV= vpv - Vold; % Diferencia entre el voltaje anterior y el voltaje nuevo
19 dP= P - Pold;% Diferencia entre la potencia anterior y potencia nueva
20
21 % Este algoritmo busca dP/dV=0
22 % Si la derivada es igual que cero el ciclo de trabajo no cambia
23 % Si las potencias anterior y nueva no son iguales y el voltaje del PV es mayor que 30V
24 % el algoritmo comienza a trabajar
25 if dP ~= 0 && vpv>30
26     if dP < 0
27         if dV < 0
28             duty = duty_old - delta;
29         else
30             duty = duty_old + delta;
31         end
32     else
33         if dV < 0
34             duty = duty_old + delta;
35         else
36             duty = duty_old - delta;
37         end
38     end
39 else
40     duty = duty_old;
41 end
42
43 % Establece el ciclo de trabajo entre el mínimo y el máximo
44 if duty >= duty_max
45     duty=duty_max;
46 elseif duty<duty_min
47     duty=duty_min;
48 end
49
50 % Almacenar datos
51 duty_old=duty;
52 Vold=vpv;
53 Pold=P;
```

Figura A 1. Código del algoritmo INC.

Anexo B

Como se mencionó el algoritmo EMS fue elaborado entorno a un código de simulación en Matlab, en el cual se establecieron las variables de los perfiles de potencia de carga y potencia del panel, y los límites establecidos de SoC para cuidar el estado de vida de la batería. Como se pudo observar en la Figura 35, el algoritmo realiza una toma de decisiones con respecto a los niveles de SoC, de la potencia de carga y de la potencia del panel para determinar quién será el encargado de suministrar energía a las cargas, así como de determinar los procesos de carga y descarga de las baterías.

En la Figura B 1. 1 y la Figura B 1. 2 se muestra el código elaborado, en donde se pueden ver los perfiles de potencia de cargas (P_L) y la potencia del panel (P_Pv), los estados de carga máximo y mínimo (SOC_Max y SOC_Min, respectivamente), así como un estado de carga inicial (SOC_0) el cual es un valor que nosotros determinarnos, en ese caso del 0.4. La variable N corresponde al número de horas (24 hrs), EBatMax a la capacidad máxima de la batería, esta variable nos es de utilidad para realizar el cálculo del estado de carga de la batería.

```

1 %Perfiles de consumo de tres casas por un día (8 paneles)
2 close all; clear all; clc;
3 P_L=[0.6696 0.6807 0.5313 0.3951 0.4689 0.4746 0.4563 0.3084 0.4962 0.2913 0.2397 0.3585 0.5265 0.6423 0.6669 0.9453 0.8046 0.411
4 P_Pv=[0 0 0 0 0.41314477 65.19046322 365.4068648 984.0692918 1707.281954 2207.719709 2789.543652 2732.328219 2132.268508 1449.9
5
6 N = 24; SOC_min = 0.3; SOC_max = 1.0; SOC_0 = 0.4; % SOC_0 = SOC inicial
7 deltaT = 1; EBatMax = 11520; % (Hora), Watt-hora
8
9 for j=1:24
10
11     if (P_Pv(j)==0)
12         if (j==1)
13             SOC(j)=SOC_0;
14         else
15             SOC(j)=SOC(j-1);
16         end
17         if (SOC(j)>SOC_min && SOC(j)<=SOC_max)
18             P_Bat(j)=(SOC(j)-SOC_min)*EBatMax;%Entrega energía a la carga con la batería
19             if (P_Bat(j)>=P_L(j))
20                 P_Bat(j)=P_L(j);
21                 P_G(j)=0;
22             else
23                 P_G(j)=P_L(j)-P_Bat(j);%Entregar energía a la carga con la batería y la red
24             end
25             SOC(j)=SOC(j)-(deltaT/EBatMax)*P_Bat(j);
26         else
27             P_G(j)=P_L(j);%Entregar energía a la carga con la red
28             P_Bat(j)=0;
29             SOC(j)=SOC(j);
30         end
31     elseif (P_Pv(j)==P_L(j)) %Entregar potencia del panel a la carga
32         P_G(j)=0;
33         P_Bat(j)=0;
34         SOC(j)=SOC_0;
35     elseif (P_Pv(j) > P_L(j))
36         P_dif(j)=P_Pv(j)-P_L(j);
37         if (j==1)
38             SOC(j)=SOC_0;
39         else
40             SOC(j)=SOC(j-1);
41         end
42         P_Batp(j)=(SOC_max-SOC(j))*EBatMax;
43         if (SOC(j)>=SOC_min && SOC(j)<SOC_max)%Cargar batería con panel
44             P_Bat(j)=-(min(P_dif(j),P_Batp(j)));
45             SOC(j)=SOC(j)-(deltaT/EBatMax)*P_Bat(j);
46             P_G(j)=-(P_dif(j)+P_Bat(j));
47         else
48             P_G(j)=-(P_dif(j));%Inyectar energía a la red
49             P_Bat(j)=0;
50             SOC(j)=SOC(j);
51         end
52     else
53         P_dif(j)=-(P_Pv(j)-P_L(j));
54         if (j==1)

```

Figura B 1. 1. Código del EMS propuesto.

```

55 -         SoC(j)=SOC_0;
56 -     else
57 -         SoC(j)=SoC(j-1);
58 -     end
59 -     P_Batp(j)=(SoC(j)-SOC_min)*EBatMax;
60 -     if (SoC(j)>=SOC_min && SoC(j)<=SOC_max) %Suministrar energía con panel y batería
61 -         P_Bat(j)=min(P_dif(j),P_Batp(j));
62 -         SoC(j)=SoC(j)-(deltaT/EBatMax)*P_Bat(j);
63 -         P_G(j)=P_dif(j)-P_Bat(j);
64 -     else
65 -         P_G(j)=P_dif(j);%Suministrar energía con panel y red
66 -         P_Bat(j)=0;
67 -         SoC(j)=SoC(j);
68 -     end
69 - end
70 - end
71 - P_Gen=P_Pv+P_Bat+P_G;
72 - figure (1)
73 -     hold on
74 -     grid on
75 -     subplot(4, 1, 1)
76 -         hold on
77 -         grid on
78 -         title('Potencia de panel');
79 -         plot(P_Pv,'LineWidth',2); xlabel('Tiempo(hr)','FontSize',11);ylabel('Potencia (W)','FontSize',11)
80 -     subplot(4, 1, 2);
81 -         hold on
82 -         title('Potencia de cargas');
83 -         plot(P_L,'LineWidth',2)
84 -         plot(P_Gen,'-x','LineWidth',2); xlabel('Tiempo(hr)','FontSize',11);ylabel('Potencia (W)','FontSize',11)
85 -         grid on
86 -     subplot(4, 1, 3);
87 -         hold on
88 -         title('Potencia de red');
89 -         plot(P_G,'LineWidth',2); xlabel('Tiempo(hr)','FontSize',11);ylabel('Potencia (W)','FontSize',11)
90 -         grid on
91 -     subplot(4, 1, 4);
92 -         hold on
93 -         title('Estado de carga');
94 -         plot(SoC,'LineWidth',2); xlabel('Tiempo(hr)','FontSize',11);ylabel('Estado de carga','FontSize',11)
95 -         grid on
96 -     figure(2)
97 -         hold on
98 -         grid on
99 -         subplot(2, 1, 1)
100 -             hold on
101 -             grid on
102 -             title('Potencia de batería');
103 -             plot(P_Bat,'LineWidth',2); xlabel('Tiempo(hr)','FontSize',11);ylabel('Potencia (W)','FontSize',11)
104 -         subplot(2, 1, 2);
105 -             hold on
106 -             title('Estado de carga');
107 -             plot(SoC,'LineWidth',2); xlabel('Tiempo(hr)','FontSize',11);ylabel('Estado de carga','FontSize',11)
108 -             grid on

```

Figura B 1. 2. Continuación del código EMS propuesto.