



Educación
Secretaría de Educación Pública



TECNOLÓGICO
NACIONAL DE MÉXICO

Tecnológico Nacional de México

**Centro Nacional de Investigación
y Desarrollo Tecnológico**

TESIS DE MAESTRÍA

**Convertidor Bidireccional Cargador de Baterías en un Esquema
Paralelo de un Sistema Fotovoltaico Autónomo**

presentada por

Ing. Josefina Jiménez Juárez

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

Director de tesis

Dr. Jaime Eugenio Arau Roffiel

Codirector de tesis

Dr. Carlos Aguilar Castillo

Cuernavaca, Morelos, México. Febrero 2026.



Centro Nacional de Investigación y Desarrollo Tecnológico
Departamento de Ingeniería Electrónica

Cuernavaca, Mor; 26/enero/2026

Oficio No. DIE/024/2026

Asunto: Aceptación de documentos.

DR. CARLOS MANUEL ASTORGA ZARAGOZA
SUBDIRECTOR ACADÉMICO
PRESENTE

Por este conducto, los integrantes de Comité Tutorial de la **C. JOSEFINA JIMÉNEZ JUÁREZ**, con número de control **M24CE025** de la Maestría en Ciencias en Ingeniería Electrónica, le informamos que hemos revisado el trabajo de tesis profesional titulado **"CONVERTIDOR BIDIRECCIONAL CARGADOR DE BATERÍAS EN UN ESQUEMA PARALELO DE UN SISTEMA FOTOVOLTAICO AUTÓNOMO"**, 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. Jaime Eugenio Arau Roffiel
Doctor en Ciencias en Ingeniería Electrónica
Cédula profesional 9884229

CODIRECTOR DE TESIS

Dr. Carlos Aguilar Castillo
Doctor en Ciencias en Ingeniería Electrónica
Cédula profesional 3581040

REVISOR 1

Dr. Víctor Hugo Olivares Peregrino
Doctor en Ciencias en Ingeniería Electrónica
Cédula profesional 5999002

REVISOR 2

Dr. Rodolfo Amalio Vargas Méndez
Doctora en Ciencias en Ingeniería Electrónica
Cédula profesional 9526506

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



Educación
Secretaría de Educación Pública



TECNOLÓGICO
NACIONAL DE MÉXICO



Centro Nacional de Investigación y Desarrollo Tecnológico
Subdirección Académica

Cuernavaca Mor, **26/enero/2026**

Oficio No. SAC/023/2026

Asunto: Autorización de impresión de tesis

JOSEFINA JIMÉNEZ JUÁREZ
CANDIDATA AL GRADO DE MAESTRA EN CIENCIAS
EN INGENIERÍA ELECTRÓNICA
P R E S E N T E

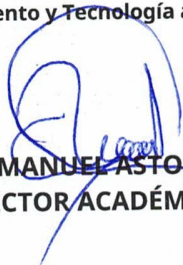
Por este conducto, tengo el agrado de comunicarle que el Comité Tutorial asignado a su trabajo de tesis titulado **"CONVERTIDOR BIDIRECCIONAL CARGADOR DE BATERIAS EN UN ESQUEMA PARALELO DE UN SISTEMA FOTOVOLTAICO AUTÓNOMO"**, ha informado a esta Subdirección Académica, que están de acuerdo con el trabajo presentado. Por lo anterior, se le autoriza a que proceda con la impresión definitiva de su trabajo de tesis.

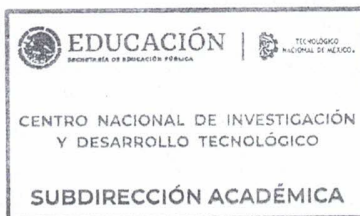
Esperando que el logro del mismo sea acorde con sus aspiraciones profesionales, reciba un cordial saludo.

A T E N T A M E N T E

Excelencia en Educación Tecnológica®

"Conocimiento y Tecnología al servicio de México"


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



Interior Internado Palmira S/N, Col. Palmira,
C.P. 62490, Cuernavaca, Morelos Tel. 01 (777) 3627770, ext. 4106,
e-mail: acad_cenidet@tecnm.mx | cenidet.tecnm.mx

Dedicatoria

Dedico este trabajo, en primer lugar, a mis padres, por su amor, apoyo incondicional y enseñanzas constantes, que han sido el pilar de mi formación personal y académica, quienes me impulsaron a perseguir cada uno de mis sueños con convicción y perseverancia. A mi familia, tanto a quienes hoy me acompañan como a aquellos que ya no están conmigo físicamente, pero cuya memoria, valores y ejemplo siguen siendo una fuente permanente de inspiración para recorrer este camino de formación con perseverancia, cariño y fortaleza.

Me dedico también este logro a mí, por no rendirme aun cuando el camino se tornó difícil, por la constancia en los momentos de duda y por la determinación de continuar avanzando incluso cuando los resultados parecían lejanos. Dedico este trabajo a mis asesores y revisores, quienes confiaron en mis capacidades, guiaron este proceso con profesionalismo y contribuyeron de manera fundamental a mi crecimiento académico y personal.

A mis amistades, por brindarme ánimo, apoyo y fuerza para seguir adelante en cada etapa de este proceso, de manera especial, a todas aquellas personas que han ido llegando a mi vida en los últimos años, quienes con su presencia, palabras y enseñanzas han contribuido a mi crecimiento personal.

Finalmente, a todos aquellos que me enseñaron que no siempre se avanza sin tropiezos, pero que cada caída fortalece el espíritu y reafirma el propósito, porque cada paso recorrido, incluso el más difícil, construye el camino hacia algo más grande.

Agradecimientos

Agradezco de manera especial a mis asesores de tesis el Dr. Carlos Aguilar Castillo y el Dr. Jaime Arau Roffiel por su orientación, apoyo académico y valiosas aportaciones durante el desarrollo de este trabajo, las cuales fueron fundamentales para la correcta estructuración y culminación de la presente investigación. Asimismo, expreso mi agradecimiento a los revisores el Dr. Víctor Hugo Olivares y el Dr. Rodolfo Vargas Méndez por sus observaciones y recomendaciones, que contribuyeron significativamente a fortalecer la calidad y el rigor académico de este documento.

Agradezco al Centro Nacional de Investigación y Desarrollo Tecnológico (CENIDET) y al programa académico correspondiente, por brindarme la formación, los recursos y el entorno académico necesarios para el desarrollo de esta investigación, así como por fomentar un espacio de aprendizaje, análisis y crecimiento profesional.

A mis padres, expreso mi más profundo agradecimiento por su apoyo incondicional, amor y confianza a lo largo de mi formación académica y personal. Gracias a su ejemplo, valores y enseñanzas, me han ayudado a convertirme en una mejor persona y a perseguir cada uno de mis sueños con determinación y compromiso, su esfuerzo y respaldo constante han sido el pilar fundamental para alcanzar este logro.

A mi familia, agradezco su acompañamiento, paciencia y palabras de aliento durante cada etapa de este proceso, especialmente en los momentos de mayor exigencia académica. Su apoyo ha sido clave para mantener la constancia y el compromiso necesarios para culminar esta etapa.

Finalmente, deseo expresar un agradecimiento a mí misma, por la constancia, disciplina y perseverancia demostradas a lo largo de este camino, por no rendirme ante las dificultades y por mantener el compromiso con este objetivo académico hasta su conclusión.

Resumen

En esta tesis se presenta el análisis, diseño y evaluación de un sistema fotovoltaico autónomo enfocado en la optimización del procesamiento y la gestión de energía ante la variabilidad de la radiación solar, la cual depende de factores como la ubicación geográfica, la época del año y las condiciones meteorológicas. Estas variaciones generan fluctuaciones en la producción energética, lo que dificulta un aprovechamiento eficiente y estable de la energía en sistemas autónomos.

Un sistema fotovoltaico autónomo convencional está conformado por diversas etapas de conversión de energía, entre las que se incluyen la captación solar, el seguimiento del punto de máxima potencia, el almacenamiento en baterías y el suministro de energía al usuario. La presencia de múltiples etapas incrementa las pérdidas energéticas y puede afectar la eficiencia global del sistema, especialmente en los procesos de carga y descarga del sistema de almacenamiento.

Con el objetivo de reducir estas pérdidas y mejorar la gestión energética, se propone el diseño e implementación de un convertidor bidireccional en simulación operando en esquema paralelo, capaz de gestionar de forma eficiente el flujo de energía entre el arreglo fotovoltaico, la batería y la carga. El convertidor diseñado opera bajo cinco modos de transferencia y control de potencia, permitiendo adaptarse a las condiciones de generación y demanda del sistema.

La evaluación del desempeño del sistema se realiza mediante simulaciones en el entorno de SIMetrix, considerando escenarios de irradiancia constante y variable, con perfiles reales obtenidos de la REDMET y la evaluación del comportamiento de un sistema fotovoltaico en el entorno de simulación de PSIM. Los resultados obtenidos evidencian que el esquema paralelo mejora la eficiencia global del sistema frente a la configuración tradicional, reduciendo pérdidas por conversiones sucesivas y proporcionando una gestión más estable de la energía en sistemas fotovoltaicos autónomos.

Abstract

This thesis presents the analysis, design, and evaluation of an autonomous photovoltaic system focused on optimizing energy processing and management in the face of variable solar radiation, which depends on factors such as geographic location, time of year, and weather conditions. These variations generate fluctuations in energy production, hindering efficient and stable energy utilization in autonomous systems.

A conventional autonomous photovoltaic system consists of several energy conversion stages, including solar energy capture, maximum power point tracking, battery storage, and energy delivery to the user. The presence of multiple stages increases energy losses and can affect the overall efficiency of the system, especially during the charging and discharging processes of the storage system.

To reduce these losses and improve energy management, the design and implementation of a simulated bidirectional converter operating in parallel is proposed. This converter is capable of efficiently managing the energy flow between the photovoltaic array, the battery, and the load. The designed converter operates under five power transfer and control modes, allowing it to adapt to the system's generation and demand conditions.

System performance evaluation is performed using simulations in the SIMetrix environment, considering constant and variable irradiance scenarios, with real-world profiles obtained from REDMET and the evaluation of photovoltaic system behavior in the PSIM simulation environment. The results obtained demonstrate that the parallel scheme improves the overall system efficiency compared to the traditional configuration, reducing losses from successive conversions and providing more stable energy management in stand-alone photovoltaic systems.

Contenido

Dedicatoria	iv
Agradecimientos	v
Resumen.....	vi
Abstract	vii
Contenido.....	viii
Lista de figuras	xi
Lista de tablas.....	xiii
Acrónimos	xiv
Nomenclatura	xv
Capítulo 1: Introducción	1
1.1 Antecedentes.....	2
1.2 Planteamiento del problema	3
1.3 Objetivos	3
1.3.1 Objetivo general.....	3
1.3.2 Objetivos específicos	3
Capítulo 2: Estado del arte	4
2.1 Sistemas fotovoltaicos.....	5
2.1.1 Elementos de un sistema fotovoltaico.....	6
2.1.2 Sistemas fotovoltaicos autónomos	8
2.2 Técnicas de procesamiento de energía en un sistema fotovoltaico	8
2.2.1 Técnica de enlace PV y Batería en CD	9
2.2.2 Técnica de enlace PV y Batería en CA	10
2.2.3 Técnica de enlace paralelo con la batería en CD	12
2.2.4 Técnica de enlace de PV y batería con convertidor multipuerto.....	13
2.3 Convertidores CD-CD.....	15
2.4 Convertidores multipuerto.....	17
2.4.1 Características.....	18
2.4.2 Aplicaciones	18
Capítulo 3: Sistema fotovoltaico autónomo y convertidor propuesto	22
3.1 Sistema fotovoltaico autónomo con esquema tradicional.....	23
3.2 Sistema fotovoltaico autónomo con esquema paralelo	23
3.3 Convertidor propuesto para operación en paralelo	24
Capítulo 4: Análisis de convertidor bidireccional en esquema paralelo	27
4.1 Introducción.....	28
4.2 Modo PV a Carga	30
4.2.1 Análisis eléctrico en CD	30
4.3 Modo Batería a Carga.....	34
4.3.1 Análisis eléctrico en CD	34
4.4 Modo PV a Batería.....	38
4.4.1 Análisis eléctrico en CD	38
4.5 Modo PV a Batería y Carga.....	42
4.5.1 Análisis eléctrico en CD	42
4.6 Modo PV y Batería a Carga.....	47
4.6.1 Análisis eléctrico en CD	47
4.7 Síntesis analítica y operacional del convertidor bidireccional.....	52
Capítulo 5: Simulación y resultados.....	53
5.1 Parámetros y selección de componentes para la simulación.....	54

5.2 Modelado y simulación del sistema fotovoltaico en PSIM	56
5.2.1 Adquisición y preparación de datos de entrada	56
5.2.2 Modelado eléctrico del panel fotovoltaico RGN-100D-SS	60
5.2.3 Simulación de arreglo fotovoltaico bajo condiciones de irradiancia constante	61
5.2.4 Simulación de arreglo fotovoltaico bajo condiciones de irradiancia variable	64
5.3 Escenarios de simulación	66
5.3.1 Comparación entre SIMetrix y PSpice	66
5.3.2 Escenario I: Simulación considerando pérdidas pasivas bajo condiciones constantes de irradiancia	68
5.3.2.1 Modo PV a Carga	68
5.3.2.2 Modo Batería a Carga	68
5.3.2.3 Modo PV a Batería	68
5.3.2.4 Modo PV a Batería y Carga	69
5.3.2.5 Modo PV y Batería a Carga	69
5.3.2.6 Síntesis operativa y resultados del escenario con irradiancia constante	70
5.3.3 Escenario II: Simulación considerando pérdidas pasivas bajo condiciones variables de irradiancia	73
5.3.3.1 Modo PV a Carga	73
5.3.3.2 Modo PV a Batería	73
5.3.3.3 Modo PV a Batería y Carga	74
5.3.3.4 Modo PV y Batería a Carga	74
5.3.3.5 Síntesis operativa y resultados del escenario con irradiancia variable	75
5.3.4 Análisis de eficiencia del convertidor bidireccional en esquema paralelo	77
5.4 Análisis comparativo del sistema fotovoltaico autónomo en esquema tradicional y paralelo	80
5.4.1 Introducción	80
5.4.2 Simulación del sistema fotovoltaico autónomo en esquema tradicional	80
5.4.2.1 Escenario I: Condiciones constantes de irradiancia	81
5.4.2.1.1 Modo PV a Bus CD	81
5.4.2.1.2 Modo Bus CD a Batería	81
5.4.2.1.3 Modo Batería a Carga	81
5.4.2.1.4 Síntesis operativa y resultados del Escenario I	82
5.4.2.2 Escenario II: Condiciones variables de irradiancia	83
5.4.2.2.1 Modo PV a Bus CD	83
5.4.2.2.2 Síntesis operativa y resultados del Escenario II	84
5.4.2.3 Análisis de eficiencia del sistema fotovoltaico autónomo en esquema tradicional	86
5.4.3 Simulación del sistema fotovoltaico autónomo en esquema paralelo	88
5.4.3.1 Escenario I: Condiciones constantes de irradiancia	88
5.4.3.1.1 Modo PV a Batería	88
5.4.3.1.2 Modo Batería a Carga	88
5.4.3.1.3 Síntesis operativa y resultados del Escenario I	88
5.4.3.2 Escenario II: Condiciones variables de irradiancia	89

5.5.3.2.1 Modo PV a Batería	89
5.5.3.2.2 Modo Batería a Carga	89
5.5.3.2.3 Síntesis operativa y resultados del Escenario II	90
5.4.4 Síntesis comparativa del sistema fotovoltaico autónomo en esquema paralelo y tradicional	91
5.5 Análisis comparativo global de desempeño	91
Capítulo 6: Conclusiones	94
6.1 Conclusión general	95
6.2 Trabajos futuros	96
Referencias	97
Anexo A	104

Lista de figuras

Fig.1 Componentes de un sistema fotovoltaico.	6
Fig.2 Esquema típico de un sistema fotovoltaico autónomo.	8
Fig.3 Esquema de un sistema fotovoltaico con enlace PV y Batería en CD, (a) Diagrama a bloques, (b) Implementación típica [18].	10
Fig.4 Esquema de un sistema fotovoltaico con enlace PV y batería en corriente alterna, (a) Diagrama a bloques, (b) Implementación típica [23].	11
Fig.5 Esquema de un sistema fotovoltaico en enlace paralelo con la batería en CD, (a) Diagrama a bloques, (b) Implementación típica [25].	13
Fig.6 Esquema de un sistema fotovoltaico con enlace de PV y Batería con convertidor multipuerto, (a) Diagrama a bloques [25], (b) Implementación con convertidor multipuerto aislado, (c) Implementación con convertidor multipuerto no aislado [33].	14
Fig.7 Esquema general de un convertidor multipuerto con fuentes renovables, almacenamiento bidireccional y cargas.	17
Fig.8 Representación del modelo equivalente de una topología CD-CD no aislada de tres puertos [63]-[64]. ..	19
Fig.9 Representación del modelo equivalente de un convertidor reconfigurable CD-CD de tres puertos [65]. ..	20
Fig.10 Representación del modelo equivalente de un convertidor de tres puertos con GaN y PWM fase-desfasada [66].	21
Fig.11 Representación a bloques de un sistema fotovoltaico autónomo en esquema tradicional.	23
Fig.12 Representación a bloques de un sistema fotovoltaico autónomo en esquema paralelo.	24
Fig.13 Representación del circuito equivalente del convertidor bidireccional en paralelo propuesto y sus rutas de flujo de energía.	25
Fig.14 Representación del circuito equivalente del convertidor bidireccional en paralelo propuesto.	29
Fig.15 Circuito equivalente del esquema fotovoltaico autónomo integrado en modo PV a Carga.	30
Fig.16 Circuito equivalente en tiempo de conducción en modo PV a Carga.	31
Fig.17 Circuito equivalente en tiempo de bloqueo en modo PV a Carga.	31
Fig.18 Formas de onda del convertidor Boost PV a Carga.	33
Fig.19 Circuito equivalente del esquema fotovoltaico autónomo integrado en modo Batería a Carga.	34
Fig.20 Circuito equivalente en tiempo de conducción en modo Batería a Carga.	35
Fig.21 Circuito equivalente en tiempo de bloqueo en modo Batería a Carga.	35
Fig.22 Formas de onda del convertidor Boost Batería a Carga.	37
Fig.23 Circuito equivalente del esquema fotovoltaico autónomo integrado en modo PV a Batería.	38
Fig.24 Circuito equivalente en tiempo de conducción en modo PV a Batería.	39
Fig.25 Circuito equivalente en tiempo de bloqueo en modo PV a Batería.	39
Fig.26 Formas de onda del convertidor Boost PV a Batería.	41
Fig.27 Circuito equivalente del esquema fotovoltaico autónomo integrado en modo PV a Batería y Carga.	42
Fig.28 Circuito equivalente en tiempo de conducción en modo PV a Batería y Carga.	43
Fig.29 Circuito equivalente en tiempo de bloqueo en modo PV a Batería y Carga.	43
Fig.30 Formas de onda del convertidor Boost y Buck en modo PV a Batería y Carga.	46
Fig.31 Circuito equivalente del esquema fotovoltaico autónomo integrado en modo PV y Batería a Carga.	47
Fig.32 Circuito equivalente en tiempo de conducción en modo PV y Batería a Carga.	48
Fig.33 Circuito equivalente en tiempo de bloqueo en modo PV y Batería a Carga.	48
Fig. 34 Formas de onda de los convertidores Boost de PV a Batería y Carga.	51
Fig.35 Registros de irradiancia en fechas representativas del año 2020, obtenido de la REDMET.	57
Fig.36 Registros de irradiancia en fechas representativas del año 2021, obtenido de la REDMET.	57
Fig.37 Registros de irradiancia en fechas representativas del año 2022, obtenido de la REDMET.	58
Fig.38 Registros de irradiancia en fechas representativas del año 2023, obtenido de la REDMET.	58

Fig.39 Registros de irradiancia en fechas representativas del año 2024, obtenido de la REDMET.	59
Fig.40 Modelado de panel solar mediante la herramienta Physical Model en el entorno de simulación PSIM. 60	60
Fig.41 Elementos principales del esquema de simulación de un arreglo en serie de paneles solares modelo RGN-100D-SS: (a) Irradiancia, (b) Control de simulación, (c) Modelo de panel solar.	62
Fig.42 Comportamiento de irradiancia, tensión y potencia del arreglo fotovoltaico el día 3 de septiembre de 2023.	63
Fig.43 Base de datos del comportamiento eléctrico del arreglo en serie de paneles solares.	63
Fig.44 Esquema de simulación de un arreglo en serie de paneles solares RGN-100D-SS en condiciones de barrido paramétrico.	64
Fig.45 Curvas características del panel RGN-100D-SS bajo irradiancias de 800 W/m ² y 200 W/m ² ,	65
Fig.46 Esquema de simulación del convertidor Boost en modo PV–Carga en condiciones constantes de irradiancia, correspondiente al Escenario I: a) SIMetrix, b) PSpice.	67
Fig.47 Eficiencia del sistema fotovoltaico autónomo en esquema paralelo: (a) escenario I y (b) escenario II.	79
Fig.48 Representación a bloques de un sistema fotovoltaico autónomo en esquema tradicional.	81
Fig.49 Eficiencia del sistema fotovoltaico autónomo en esquema tradicional: (a) escenario I y (b) escenario II.	87
Fig.50 Representación de diagrama a bloques del procesamiento de energía de PV hacia la Carga bajo esquemas de conexión: a) Esquema tradicional, b) Esquema paralelo.	92
Fig.51 Eficiencia del sistema fotovoltaico autónomo en esquema tradicional y paralelo: (a) escenario I y (b) escenario II.	93
Fig.52 Ejemplo del comportamiento de las formas de onda de tensión y corriente en el Escenario II bajo operación PV a Carga con irradiancia del día 3 de septiembre de 2023.	107
Fig.53 Ejemplo del comportamiento de las formas de onda de tensión y corriente en el Escenario II bajo operación PV a Batería con irradiancia del día 3 de septiembre de 2023.	109
Fig.54 Ejemplo del comportamiento de las formas de onda de tensión y corriente en el Escenario II, durante la operación simultánea del convertidor Boost al 80% y el convertidor Buck al 20%, en modo PV a Batería y Carga con irradiancia del día 3 de septiembre de 2023.	112
Fig.55 Ejemplo del comportamiento de las formas de onda de tensión y corriente en el Escenario II, durante la operación simultánea del convertidor Boost al 20% y el convertidor Buck al 80%, en modo PV a Batería y Carga con irradiancia del día 3 de septiembre de 2023.	115
Fig.56 Comportamiento de las formas de onda de tensión y corriente en el Escenario II, durante la operación simultánea de los convertidores Boost al 80% y al 20% en modo PV y Batería a Carga.	116
Fig.57 Comportamiento de las formas de onda de tensión y corriente en el Escenario II, durante la operación simultánea de los convertidores Boost al 80% y al 20% en modo PV y Batería a Carga.	117
Fig.58 Ejemplo de comportamiento de las formas de onda de tensión y corriente del esquema tradicional en el Escenario II (3 de septiembre de 2023).	118

Lista de tablas

Tabla. 1 Esquemas eléctricos de las topologías no aisladas de convertidores CD-CD.....	16
Tabla.2 Ecuaciones del análisis de circuitos para los modos de operación del convertidor bidireccional en esquema paralelo.	52
Tabla.3 Especificaciones eléctricas de los elementos considerados en el diseño del convertidor bidireccional en esquema paralelo.	55
Tabla.4 Periodos de canícula en México de 2020-2024.....	56
Tabla.5 Selección de registros diarios representativos de la canícula en México (2020–2024).	56
Tabla.6 Resultados eléctricos promedio del convertidor en modo PV a Carga bajo condiciones constantes de irradiancia: comparación entre SIMetrix y PSpice.	67
Tabla.7 Esquemas de simulación del convertidor bidireccional en esquema paralelo correspondientes al escenario I.	70
Tabla.8 Resultados eléctricos promedio del convertidor bidireccional en esquema paralelo bajo escenario I.	72
Tabla.9 Esquemas de simulación del convertidor bidireccional en esquema paralelo correspondientes al escenario II.	75
Tabla.10 Resultados eléctricos promedio del convertidor bidireccional en esquema paralelo bajo escenario II.	77
Tabla.11 Resultados eléctricos promedio del convertidor bidireccional en esquema paralelo bajo los escenarios de simulación (SIMetrix).....	78
Tabla.12 Modelos de simulación del sistema fotovoltaico autónomo en esquema tradicional bajo Escenario I.	82
Tabla. 13 Resultados eléctricos promedio de convertidor en esquema tradicional bajo escenario I.	83
Tabla. 14 Modelos de simulación del sistema fotovoltaico autónomo en esquema tradicional bajo Escenario II.	84
Tabla. 15 Resultados eléctricos promedio de convertidor en esquema tradicional bajo escenario II.	85
Tabla. 16 Resultados eléctricos promedio del sistema fotovoltaico autónomo en esquema tradicional bajo los escenarios de simulación (SIMetrix).	86
Tabla.17 Modelos de simulación del sistema fotovoltaico autónomo en esquema paralelo bajo Escenario I....	88
Tabla.18 Resultados promedio del convertidor bidireccional en paralelo en los Escenarios I (PV-Batería y Batería-Carga).	89
Tabla.19 Modelos de simulación del sistema fotovoltaico autónomo en esquema paralelo bajo Escenario II.	90
Tabla.20 Resultados promedio del convertidor bidireccional en paralelo bajo Escenario I, (PV-Batería y Batería-Carga).	90
Tabla. 21 Comparativa de un sistema fotovoltaico autónomo con conexión en esquema paralelo y esquema tradicional bajo los escenarios de simulación (SIMetrix).	91
Tabla.22 Resultados del análisis matemático de los modos de operación en el convertidor bidireccional en esquema paralelo correspondientes al Escenario I.	105
Tabla.23 Resultados del análisis matemático de los modos de operación en el convertidor bidireccional en esquema paralelo correspondientes al Escenario II.	105
Tabla.24 Registro de resultados eléctricos promedio del esquema paralelo PV a Carga en el Escenario II.	106
Tabla.25 Registro de resultados eléctricos promedio del esquema paralelo PV a Batería en el Escenario II.	108
Tabla.26 Registro de resultados eléctricos promedio durante la operación simultánea del convertidor Boost al 80% y el convertidor Buck al 20% bajo el Escenario II de PV a Batería y Carga.....	110
Tabla.27 Registro de resultados eléctricos promedio durante la operación simultánea del convertidor Boost al 20% y el convertidor Buck al 80% bajo el Escenario II de PV a Batería y Carga.....	113
Tabla.28 Resultados del análisis matemático en esquema tradicional correspondientes al Escenario I.....	118

Acrónimos

Acrónimo	Significado (inglés técnico / español)
MPPT	Máximum Power Point Tracking (<i>Punto de máxima potencia</i>)
CD	Corriente Directa
PV	Sistemas Fotovoltaicos/Paneles Fotovoltaicos/ Energía fotovoltaica
CA	Corriente Alterna
CD-CD	Corriente Directa a Corriente Directa
CD-CA	Corriente Directa a Corriente Alterna
BEES	Battery Energy Storage System (<i>Sistema de almacenamiento de energía en baterías</i>)
EV	Electric Vehicle (<i>Vehículo eléctrico</i>)
PWM	Pulse Width Modulation (<i>Modulación por Ancho de Pulso</i>)
MOSFET	Metal-Oxide-Semiconductor Field-Effect Transistor (<i>Transistor de Efecto de Campo Metal-Óxido-Semiconductor</i>)
IGBT	Insulated-gate bipolar transistor (<i>Transistor bipolar de puerta aislada</i>)
SiC	Silicon Carbide (<i>Carburo de silicio</i>)
GaN	Gallium Nitride (<i>Nitruro de galio</i>)
PI	Control Proporcional-Integral
Bus CD	Bus de corriente directa
PSpice	Personal Simulation Program with Integrated Circuit Emphasis
SIMETRIX	SIMetrix Mixed-Mode Simulator (<i>Simulador analógico mixto</i>)
PW	Pulse Width (<i>Ancho de pulso</i>)
TR	Rise Time (<i>Tiempo de subida</i>)
TF	Fall Time (<i>Tiempo de caída</i>)
TD	Time Delay (<i>Retraso</i>)
REDMET	Red de Meteorología y Radiación Solar
DCR	Resistencia de Corriente Continua
ESR	Resistencia Serie Equivalente

Nomenclatura

Símbolo	Descripción	Unidad
I_{sc}	Corriente de cortocircuito	Amperios (A)
V_{oc}	Tensión en circuito abierto	Volts (V)
P_{max}	Potencia máxima	Watts(W)
D_{pv}	Diodo del sistema fotovoltaico	-
C_{pv}	Condensador del sistema fotovoltaico	Faradios (F)
L_{pv}	Inductor del sistema fotovoltaico	Henrios (H)
L_{bat}	Inductor del sistema de almacenamiento	Henrios (H)
N_{pv}	Devanado primario 1	-
N_{bat}	Devanado primario 2	-
N_{out}	Devanado secundario	-
D_{batn}	Diodo de antiparalelo de almacenamiento n	-
Q_{batn}	Transistor de almacenamiento n	-
S_n	Interruptor n	-
D_{in}	Diodo antirretorno	-
V_{in}	Tensión de entrada	Volts (V)
V_o	Tensión de salida	Volts (V)
i_{in}	Corriente de entrada	Amperios (A)
i_o	Corriente de salida	Amperios (A)
i_{pv}	Corriente de sistema fotovoltaico	Amperios (A)
α	Punto de entrada común	-
β	Punto de salida común	-
Q_n	Transistor n	-
D_{an}	Diodo antiparalelo n	-
D_n	Diodo n	-
L_n	Inductor n	Henrios (H)
C_n	Condensador n	Faradios (F)
PV	Fuente fotovoltaica	-
B_{att}	Sistemas de almacenamiento en baterías	Volts (V)
R_{Load}	Resistencia de carga o salida	Ohmios (Ω)
D	Ciclo de trabajo	Porcentaje (%)
T_s	Periodo de conmutación	Segundos (s)
t_{on}	Tiempo de conducción	Segundos (s)
t_{off}	Tiempo de bloqueo o apagado	Segundos (s)
V_{PV}	Tensión en el sistema fotovoltaico	Volts (V)
V_{GS}	Tensión de drenaje a fuente	Volts (V)
V_{Load}	Tensión en la carga	Volts (V)
V_{Batt}	Tensión en la batería	Volts (V)
M	Ganancia en corriente directa	-
i_{Ln}	Corriente en el inductor n	Amperios (A)
V_{Ln}	Tensión en el inductor n	Volts (V)
V_{Cn}	Tensión en el condensador n	Volts (V)
i_{Cn}	Corriente en el condensador n	Amperios (A)

i_{Qn}	Corriente en el transistor n	Amperios (A)
i_{Batt}	Corriente en la batería	Amperios (A)
f_s	Frecuencia de conmutación	Hertz (Hz)
Δi_{Ln}	Rizo de corriente en el inductor n	Amperios (A)
ΔV_{Cn}	Rizo de voltaje en el condensador n	Volts (V)
I_{Qn}	Corriente promedio en el transistor n	Amperios (A)
I_{Dn}	Corriente promedio en el diodo n	Amperios (A)
I_{Load}	Corriente promedio en la carga	Amperios (A)
I_{Qn}	Corriente promedio en el transistor n	Amperios (A)
I_{Batt}	Corriente promedio en la batería	Amperios (A)
V_{DSn}	Tensión máxima del transistor n	Volts (V)
V_{KAn}	Tensión máxima del diodo n	Volts (V)
V_{Bus}	Tensión de bus en corriente directa	Volts (V)
E_{req}	Energía requerida	Kilo Watts Hora (kWh)
P_{out}	Potencia de salida	Watts(W)
t	Tiempo estimado	Segundos (s)
C_{Ah}	Capacidad en la batería	Amperio-hora (Ah)
I_F	Corriente directa	Amperios (A)
V_{RRM}	Tensión máxima inversa	Volts (V)
t_{rr}	Tiempo de recuperación inversa	Segundos (s)
P_{pv_n}	Potencia en el sistema fotovoltaico	Watts(W)
PER	Periodo	Segundos (s)

Capítulo 1:

Introducción

El desarrollo de sistemas energéticos basados en fuentes renovables se ha convertido en una prioridad frente a los retos actuales asociados al crecimiento de la demanda eléctrica, la sostenibilidad ambiental y la confiabilidad del suministro. En este contexto, la generación fotovoltaica, particularmente en configuraciones autónomas, representa una alternativa estratégica para atender regiones con acceso limitado a la red eléctrica convencional, donde la eficiencia y la gestión adecuada de la energía resultan factores determinantes para el desempeño del sistema.

No obstante, la integración de la generación solar con sistemas de almacenamiento y conversión de potencia presenta desafíos técnicos asociados a la variabilidad del recurso solar y a la eficiencia operativa, lo que hace necesario el análisis de estrategias orientadas a optimizar el procesamiento energético y el desempeño global del sistema.

Bajo este enfoque, el presente capítulo establece el contexto general de la investigación mediante la definición de los objetivos que orientan el estudio, la descripción de la problemática que motiva su desarrollo y el análisis de los antecedentes más relevantes reportados en la literatura. De esta manera, se sientan las bases conceptuales y técnicas necesarias para la comprensión y justificación de la propuesta abordada en los capítulos subsecuentes.

1.1 Antecedentes

En los últimos años, el crecimiento demográfico, la industrialización y la urbanización han incrementado de forma considerable la demanda mundial de energía, generando importantes desafíos en términos de seguridad y sostenibilidad energética [1]. Ante esta situación, se ha impulsado de forma sostenida el desarrollo y la integración de fuentes de energía renovable y sostenible, las cuales permiten diversificar las fuentes energéticas y reducir el impacto ambiental asociado a la generación convencional de electricidad. Entre las diversas alternativas disponibles, la energía solar fotovoltaica destaca por su abundancia, disponibilidad geográfica, carácter inagotable y bajo impacto ambiental durante su operación, consolidándose como una opción viable para avanzar hacia sistemas energéticos sostenibles y resilientes [2].

En el caso de México, el potencial solar disponible es uno de los más elevados a nivel mundial, con valores promedio de irradiancia diaria que oscilan entre 4.5 y 6.5 kWh/m² en amplias regiones del territorio nacional. Esta condición privilegiada ha favorecido la adopción creciente de sistemas fotovoltaicos tanto en aplicaciones conectadas a la red eléctrica como en configuraciones aisladas o autónomas, particularmente en zonas rurales, comunidades alejadas y regiones con acceso limitado a infraestructura eléctrica convencional [3].

Particularmente, los sistemas fotovoltaicos autónomos han surgido como una solución eficaz para cubrir las necesidades energéticas de zonas remotas o con infraestructura eléctrica limitada. Estos sistemas integran módulos fotovoltaicos encargados de la captación de la irradiancia solar, etapas de conversión de potencia que incluyen algoritmos de seguimiento del punto de máxima potencia (MPPT), sistemas de almacenamiento energético basados principalmente en baterías electroquímicas y etapas de acondicionamiento que convierten la energía en corriente directa (CD) a corriente alterna (CA), adecuada para el suministro de cargas residenciales, comerciales o industriales.

Sin embargo, la operación eficiente y confiable de los sistemas fotovoltaicos autónomos enfrenta múltiples desafíos técnicos. Entre los más relevantes se encuentran la naturaleza intermitente y variable de la radiación solar, las fluctuaciones ambientales, la degradación progresiva de los sistemas de almacenamiento, las pérdidas asociadas a los procesos de conversión de energía y las limitaciones en las estrategias de control y gestión energética. Estos factores impactan directamente en la eficiencia global del sistema, la calidad del suministro eléctrico y la vida útil de los componentes, particularmente de las baterías, que representan uno de los elementos más críticos y costosos del sistema.

En este sentido, la optimización de la gestión energética y el desarrollo de arquitecturas de conversión de potencia más eficientes, flexibles y confiables se han convertido en aspectos fundamentales para maximizar el aprovechamiento de la energía solar disponible. La implementación de estrategias avanzadas de control, así como el uso de convertidores de potencia innovadores, permite mejorar el rendimiento global del sistema, reducir pérdidas energéticas y garantizar un suministro eléctrico estable y continuo, especialmente en aplicaciones aisladas donde la confiabilidad del sistema es un factor crítico [4].

1.2 Planteamiento del problema

A pesar de los beneficios ambientales que ofrece un sistema fotovoltaico autónomo, su adopción generalizada enfrenta un desafío significativo: la variabilidad de la radiación solar, la cual es afectada por factores como la ubicación geográfica, la época del año y las condiciones meteorológicas, provocando fluctuaciones en la generación de energía. Esto dificulta la integración de la energía solar en las redes eléctricas convencionales, por lo que dichas fluctuaciones plantean la necesidad de desarrollar soluciones que permitan una gestión más eficiente y estable de la energía generada.

En esencia, un sistema fotovoltaico autónomo típico comprende cinco etapas clave: (1) captación de energía solar a través de paneles fotovoltaicos; (2) conversión mediante un convertidor MPPT; (3) almacenamiento de energía en baterías; (4) conversión de corriente directa a alterna conocida como inversor; y (5) suministro de la energía almacenada al usuario final. En relación a la energía captada por los paneles solares debe gestionarse adecuadamente para maximizar su aprovechamiento y minimizar las pérdidas, en este contexto, la conversión y el almacenamiento de energía, especialmente en la carga y descarga de baterías, son procesos críticos en los que una gestión ineficiente puede provocar pérdidas energéticas y reducir la vida útil del sistema de almacenamiento. Por lo tanto, es crucial abordar la gestión ineficiente generada por estas diversas etapas de conversión de energía en un sistema fotovoltaico autónomo.

1.3 Objetivos

1.3.1 Objetivo general

Diseñar un convertidor electrónico de potencia, capaz de realizar la carga y descarga de una batería en un sistema fotovoltaico, de manera tal que aumente la eficiencia global de las etapas de procesamiento de la energía de un sistema fotovoltaico autónomo en una configuración paralela.

1.3.2 Objetivos específicos

- ✓ Asimilar el estado de arte relacionado con la reducción de etapas de conversión en sistemas fotovoltaicos con almacenamiento, para mejorar la eficiencia global del sistema.
- ✓ Analizar y diseñar un convertidor bidireccional cargador/descargador de batería para un sistema autónomo de cosecha de energía fotovoltaica.
- ✓ Validar en simulación la eficiencia de un convertidor bidireccional para la carga y descarga de baterías en sistemas fotovoltaicos autónomos.
- ✓ Publicar resultados de la investigación en una revista o congreso.

Capítulo 2:

Estado del arte

En el presente capítulo se desarrolla la revisión del estado del arte y de los fundamentos teóricos que sustentan el desarrollo de la presente investigación, con el propósito de identificar y analizar las principales contribuciones científicas relacionadas con la optimización del procesamiento de la energía en sistemas fotovoltaicos autónomos y en tecnologías de almacenamiento de energía solar. Se examinan las características, ventajas, limitaciones y campos de aplicación de las diferentes propuestas reportadas en la literatura especializada.

Asimismo, se analizan las investigaciones más relevantes vinculadas al uso de convertidores multipuerto, con especial atención a su papel en la optimización del rendimiento global del sistema, la gestión energética y la mejora de la confiabilidad operativa. Este análisis se centra particularmente en aspectos de eficiencia energética y estrategias de almacenamiento, estableciendo las bases conceptuales que sustentan el desarrollo y la propuesta planteada en la presente tesis.

2.1 Sistemas fotovoltaicos

Los sistemas fotovoltaicos (PV) son un conjunto de dispositivos eléctricos diseñados para la captura de energía proveniente de la radiación solar y convertirla en energía eléctrica. Su principio de operación se fundamenta en el efecto fotoeléctrico interno que ocurre en las celdas solares, elemento principal del sistema. Cuando los fotones incidentes son absorbidos por el semiconductor, generan pares electrón hueco en su estructura cristalina, a su vez el campo eléctrico interno presente en la unión p-n, permite la separación eficiente de estas cargas, minimizando los procesos de recombinación y favoreciendo su desplazamiento hacia las regiones correspondientes. Posteriormente, los electrones fluyen a través del circuito hacia la carga, mientras que los huecos completan el ciclo dentro del material, produciendo así una corriente eléctrica [5]-[7].

Este fenómeno constituye la base de un proceso de conversión energética renovable, sobre el cual se desarrollan diferentes arquitecturas y técnicas de procesamiento de potencia, así como una amplia gama de aplicaciones. En residencias, se usan para alimentar casas y edificios, reduciendo la dependencia de la red eléctrica convencional y sus costos. En entornos comerciales e industriales, pueden alimentar empresas y fábricas, ayudando a reducir los costos operativos y la huella de carbono. También son útiles en aplicaciones remotas y fuera de la red, como estaciones de telecomunicaciones y sistemas de bombeo de agua, donde el acceso a la red eléctrica es limitado o costoso.

Los PV pueden clasificarse de acuerdo con su configuración operativa y su interacción con la red eléctrica, dando lugar a tres categorías principales: sistemas conectados a la red, sistemas híbridos y sistemas aislados [8]-[10].

Los sistemas conectados a la red se caracterizan por prescindir de elementos de almacenamiento de energía, debido al funcionamiento mediante inversores sincronizados con el sistema eléctrico público, permitiendo la inyección directa de energía. Es decir, el sistema transfiere en tiempo real la energía producida por el arreglo fotovoltaico, permitiendo reducir costos, simplificar la instalación y aumentar la eficiencia global, su principal aplicación es en entornos residenciales, comerciales e industriales.

Los sistemas híbridos integran el sistema fotovoltaico con otras fuentes de energía, como generadores diésel o bancos de baterías de mayor capacidad, lo que permite una gestión del flujo energético mediante convertidores bidireccionales y estrategias de control orientadas a la optimización del almacenamiento y la distribución de potencia.

En contraste, los sistemas fotovoltaicos aislados operan de manera independiente de la red eléctrica, requiriendo elementos adicionales como sistemas de almacenamiento, controladores de carga, entre otros. Esta configuración resulta indispensable en zonas rurales o aplicaciones autónomas donde la continuidad del suministro eléctrico es escasa.

2.1.1 Elementos de un sistema fotovoltaico

Un sistema fotovoltaico está compuesto por diversos elementos, tal como se muestra en la Fig.1 con el objetivo de recolectar, convertir y gestionar la energía solar, entre sus componentes se incluyen paneles solares, un sistema de almacenamiento, un sistema de control, un inversor, la carga y los elementos de montaje.

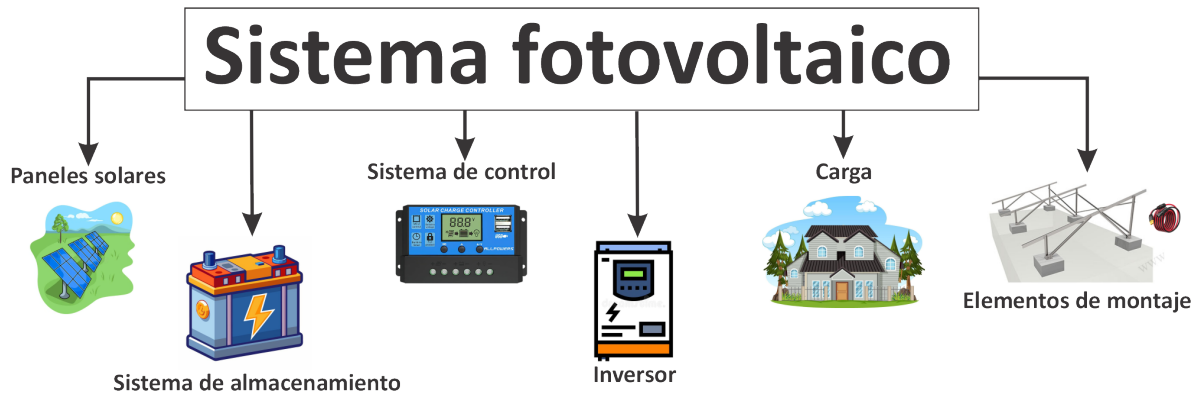


Fig.1 Componentes de un sistema fotovoltaico.

A continuación, se presenta la descripción detallada de los principales elementos que integran un sistema fotovoltaico [5]-[10].

Los paneles solares son el principal instrumento para recolectar y transformar la energía solar en energía eléctrica, con la finalidad de maximizar la eficiencia de esta conversión, se emplean diferentes configuraciones de conexión de paneles, que pueden conectarse en serie, en paralelo o en una combinación de ambas. Los parámetros clave de las celdas fotovoltaicas incluyen la corriente de cortocircuito (I_{sc}), la tensión en circuito abierto (V_{oc}) y la potencia máxima (P_{max}).

El sistema de almacenamiento mediante baterías, se utiliza para almacenar la energía generada y garantizar el suministro energético cuando la incidencia de luz solar es insuficiente, por lo tanto, la selección de baterías considera varios aspectos, como la autonomía, la capacidad de suministro de picos de intensidad, la estabilización de la tensión y la capacidad nominal de las baterías.

Así mismo, el sistema de almacenamiento considera diferentes técnicas tradicionales de carga de las baterías conocidas como: corriente constante, tensión constante y métodos híbridos.

La técnica de corriente constante suministra una corriente de referencia constante a la batería hasta que ésta alcanza una tensión específica y en ese momento se deja de cargar la batería. En la técnica de voltaje constante la batería toma la corriente necesaria para cargarse, pero tiene el inconveniente de que esto puede provocar cargas rápidas fuera de las especificaciones de los fabricantes de baterías. Por otro lado, en los métodos híbridos, la carga se inicia a corriente constante hasta que la batería alcanza una tensión ligeramente superior al de flotación y a partir de ese momento se carga la batería a tensión constante.

para mantener en la región de flotación a la batería, esta técnica es utilizada para proteger la vida útil de la batería.

Los sistemas de control se encargan de asegurar la eficiencia y seguridad en la generación de energía, almacenamiento y distribución de la energía solar. Los sistemas de control, como los reguladores de carga, son fundamentales para la gestión adecuada de la carga y descarga de las baterías, además de proteger contra sobrecargas y descargas profundas, siendo esencial para prolongar su vida útil.

El regulador más conocido en los sistemas fotovoltaicos son los reguladores de carga MPPT (Máximo Power Point Tracking), este dispositivo se encarga de extraer la máxima potencia disponible de los paneles solares, optimizando así la eficiencia de la generación de energía eléctrica en función de las condiciones de irradiación solar. Aunque las funciones no son compatibles simultáneamente, el regulador MPPT también gestiona la carga de la batería de respaldo, contribuyendo a una mayor eficiencia en el PV.

Los inversores permiten convertir la corriente directa generada por el PV en corriente alterna, forma de electricidad utilizada en residencias y negocios, cabe mencionar que algunas cargas electrónicas se alimentan directamente con CD y no requieren del inversor.

Existen diferentes tipos de inversores que pueden clasificarse de acuerdo a la conexión de los paneles solares y la electrónica de potencia utilizada, entre ellos se encuentran los inversores en cadena, encargados de conectar varios paneles solares en serie y a cada rama se conecta una etapa de electrónica de potencia. Los inversores centralizados, las cadenas de paneles se conectan en paralelo y a su vez se pueden conectar a la etapa de electrónica de potencia, son utilizados en sistemas de mucho mayor potencia, mantienen una ventaja en costo, sin embargo, en términos de eficiencia de cosecha de energía, no son la mejor opción. Por último, los inversores modulares permiten ser conectados directamente a cada panel, mejorando así la eficiencia de cosecha de energía, pero aumentando el costo de la implementación.

Cabe destacar que dentro de los sistemas fotovoltaicos existen dispositivos donde su principal funcionamiento se basa en el consumo de energía siendo conocidas como cargas, las cuales se deben gestionar eficientemente para mantener la estabilidad del sistema.

Las partes mecánicas que aseguran la instalación duradera y segura de los componentes del sistema fotovoltaico, se denominan elementos de montaje encargados de proteger los paneles y otros componentes de las inclemencias del tiempo y optimiza la orientación y el ángulo de los paneles, para maximizar la captación de luz solar.

2.1.2 Sistemas fotovoltaicos autónomos

Los sistemas fotovoltaicos autónomos son aquellos que funcionan de forma independiente al no estar conectados a la red de distribución de energía eléctrica. Sus principales características son su bajo mantenimiento, su fiabilidad y su capacidad de generar energía de forma silenciosa y sin contaminación. Además, la instalación suele ser más económica que ampliar la red eléctrica convencional.

Estos sistemas son ideales para zonas remotas sin acceso a la red eléctrica pública, como zonas rurales o lugares de difícil acceso. También se utilizan en aplicaciones como balizas de navegación, marcas viales, estaciones meteorológicas y sistemas de comunicación de larga distancia [11]-[13].

En la Fig.2 se presenta el esquema típico de una instalación en sistemas fotovoltaicos autónomos que incorpora entre otros, un convertidor bidireccional encargado de gestionar la carga y descarga de la batería. En esta configuración de sistema fotovoltaica, el esquema completo se compone de cuatro etapas: un convertidor CD-CD con MPPT, una etapa de carga de batería, una etapa de descarga de batería y un convertidor CD-CA, etapas destinadas al procesamiento eficiente de la energía almacenada para su posterior utilización.

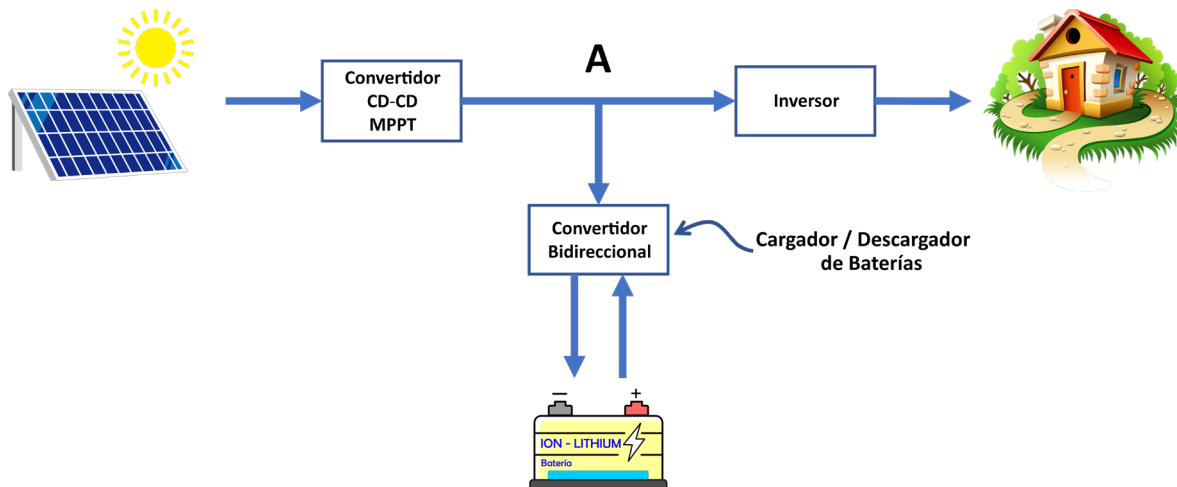


Fig.2 Esquema típico de un sistema fotovoltaico autónomo.

2.2 Técnicas de procesamiento de energía en un sistema fotovoltaico

Las técnicas de procesamiento de energía en sistemas fotovoltaicos abarcan el conjunto de etapas encargadas de transformar, regular y administrar la energía generada por los paneles solares para asegurar un suministro óptimo hacia las cargas y los sistemas de almacenamiento. Su función principal es maximizar el aprovechamiento energético bajo condiciones variables de irradiancia y temperatura, garantizando que el sistema opere cerca del punto de máxima potencia [14]-[15].

Entre los beneficios del procesamiento adecuado de energía destacan el aumento de eficiencia global, la optimización del uso del almacenamiento, la posibilidad de operación estable en condiciones variables. Sin embargo, se presentan limitaciones, como las pérdidas

asociadas a múltiples etapas de conversión, mayor complejidad de control, incremento en costos de implementación y exigencias adicionales en protección y monitoreo [16].

Particularmente el procesamiento de energía es un elemento clave para asegurar que los sistemas fotovoltaicos trabajen con altos niveles de eficiencia, estabilidad, por ello integra un sistema de almacenamiento, una estrategia de control y conversión que permite mejorar la calidad del suministro y prolongar la vida útil del almacenamiento energético. Se identifican cuatro técnicas principales conocidas como: enlace PV y Batería en corriente directa, en corriente alterna, en enlace paralelo con la batería y el uso de convertidores multipuerto. A continuación, se describe detalladamente estas técnicas:

2.2.1 Técnica de enlace PV y Batería en CD

Esta configuración permite una conexión directa entre el sistema fotovoltaico y la batería, facilitando una gestión eficiente de la energía generada, representada mediante el esquema de la Fig.3. De igual manera, se caracteriza por el uso de control multicapa en corriente directa, la optimización del flujo de energía en tiempo real y la integración de estrategias que maximizan el autoconsumo y la eficiencia del sistema. Se emplean convertidores CD-CD bidireccionales para controlar el flujo de energía durante las fases de carga y descarga ante variaciones de irradiancia y demanda del sistema, así mismo, entre sus ventajas destacan la mejora de la eficiencia energética, la prolongación de la vida útil de las baterías, la reducción de pérdidas y la facilidad de integración en microrredes y sistemas aislados. Su principal desventaja es el aumento del costo y la complejidad del sistema debido a los convertidores bidireccionales y los algoritmos de gestión avanzada [17]. Los estudios revisados muestran su implementación en diferentes escenarios.

En los artículos [18]-[19], se presentan diversas estrategias para optimizar el manejo de energía en sistemas fotovoltaicos. Las estrategias abarcan técnicas para gestionar el almacenamiento y equilibrar la energía, con el fin de mitigar intermitencias, los PV requieren un uso eficiente del almacenamiento y una alta densidad energética. Para abordar estos desafíos, se emplean técnicas de corriente directa con control multicapa y se implementan mecanismos de optimización de la gestión de energía en condiciones reales. Estos enfoques permiten maximizar el rendimiento y la eficiencia de los sistemas fotovoltaicos, asegurando un suministro energético estable y confiable.

En [20], se analizan estrategias de gestión energética para sistemas residenciales con almacenamiento, enfocadas en maximizar el autoconsumo, minimizar costes y prolongar la vida útil de las baterías. En la investigación se proporciona una descripción general y un estudio comparativo de diferentes estrategias de gestión energética incluyendo el autoconsumo inmediato, el autoconsumo diferido, la minimización de costes y la optimización de la duración de las baterías proporcionando información para el diseño y operación óptimos de sistemas fotovoltaicos con almacenamiento de batería.

En el artículo [21] se presenta un modelo de simulación en Matlab Simulink que permite evaluar el desempeño de sistema fotovoltaico con almacenamiento en baterías mediante un convertidor CD-CD bidireccional. El estudio tiene como objetivo principal desarrollar un

modelo computacional eficiente para analizar el rendimiento de sistemas fotovoltaicos con almacenamiento en baterías, considerando las interacciones entre paneles solares, baterías y convertidores CD-CD bidireccionales. Los resultados proporcionan información valiosa sobre el diseño e implementación de estos sistemas, así como las estrategias de control necesarias para optimizar la eficiencia energética y la confiabilidad.

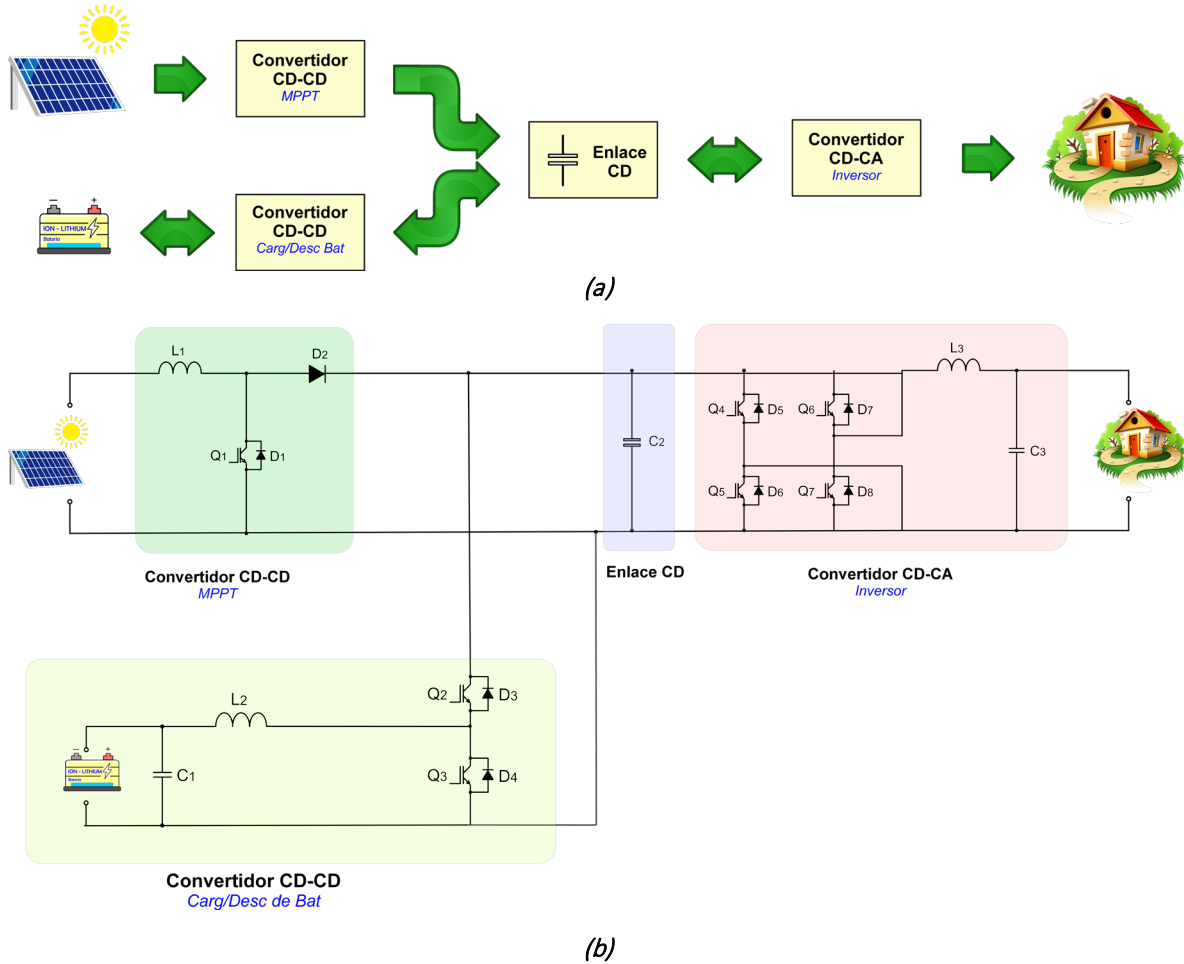


Fig.3 Esquema de un sistema fotovoltaico con enlace PV y Batería en CD, (a) Diagrama a bloques, (b) Implementación típica [18].

2.2.2 Técnica de enlace PV y Batería en CA

Se ilustra en la Fig.4 una técnica basada en el uso de convertidores CD-CD y CD-CA para gestionar la energía generada por el PV y ser almacenada en las baterías, es decir, permite una conversión eficiente de la energía, asegurando un suministro adecuado y optimizado para las necesidades residenciales [22]. Además, se busca mejorar el factor de capacidad general del sistema y garantizar la estabilidad del punto de máxima potencia, entre sus ventajas destaca la conversión eficiente de energía y la estabilidad en el suministro para aplicaciones residenciales, sin embargo, la incorporación de convertidores adicionales aumenta la complejidad y el costo del sistema. Dentro de la literatura documentada se ejemplifica algunas aplicaciones.

En el artículo [23], se presentan técnicas que permiten que un solo convertidor CD-CD funcione simultáneamente como controlador de carga y dispositivo del MPPT. Estas técnicas tienen como objetivo mejorar el factor de capacidad general del sistema, aumentar la eficiencia de conversión y garantizar la estabilidad del MPPT. En situaciones donde los inversores suelen limitar o recortar la energía disponible del sistema fotovoltaico, se proponen técnicas de acoplamiento del almacenamiento de energía mediante el uso de la técnica BESS (Sistema de almacenamiento de energía en baterías, por sus siglas en inglés).

En [24], se analiza una alternativa para implementar un sistema fotovoltaico con enlace en CA de las fuentes de energía, integrando acondicionadores de energía desde cada fuente hasta la vivienda, utilizando dos convertidores CD-CA (inversores) para cada fuente de energía, lo que permite una conversión eficiente y flexible de la energía generada en necesidades residenciales.

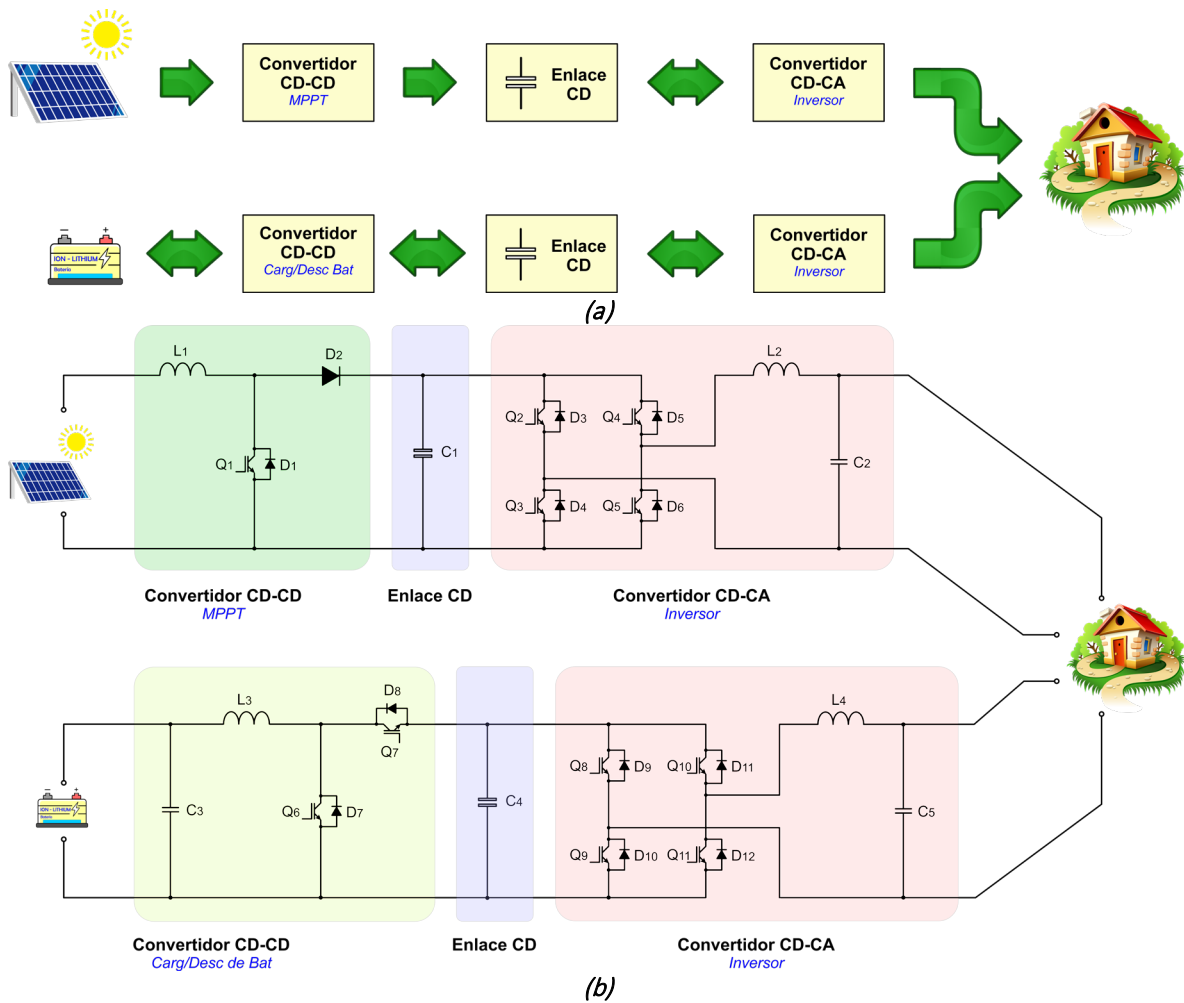


Fig.4 Esquema de un sistema fotovoltaico con enlace PV y batería en corriente alterna, (a) Diagrama a bloques, (b) Implementación típica [23].

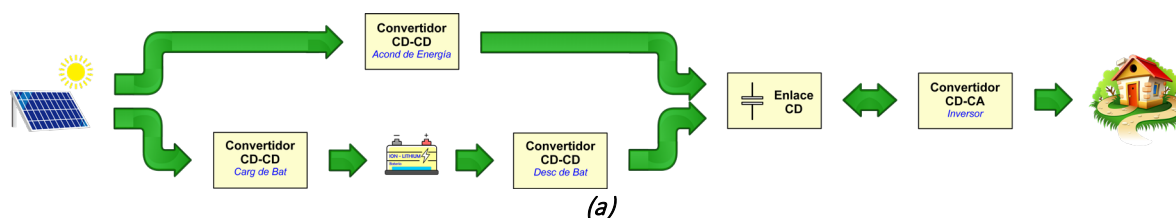
En relación al artículo [24] se muestra una alternativa para implementar un PV con enlace en CA de las fuentes de energía. En este caso, se han integrado acondicionadores de energía desde cada fuente hasta la casa habitación, a diferencia del esquema tradicional de un sistema fotovoltaico, esta configuración incluye dos convertidores CD-CA (inversores), uno para cada fuente de energía. Esta disposición permite una conversión eficiente y flexible de la energía generada, asegurando un suministro adecuado y optimizado para las necesidades residenciales.

2.2.3 Técnica de enlace paralelo con la batería en CD

La Fig.5 muestra una configuración donde el enlace con la batería se conecta en paralelo con el convertidor del panel fotovoltaico, permitiendo que la potencia se procese sólo a través de un convertidor, optimizando así la eficiencia y reduciendo pérdidas. Principalmente este esquema mejora el rendimiento general del sistema y prolonga la vida útil de la batería al minimizar los ciclos de carga y descarga.

Particularmente esta técnica presenta una ventaja ante su capacidad para optimizar el uso de la energía solar y mejorar la estabilidad del sistema, ofreciendo un flujo energético más eficiente y reduciendo el estrés sobre las baterías, lo que contribuye a extender su vida útil. No obstante, la implementación de un control implica una mayor complejidad en el diseño y en la programación del sistema, lo que incrementa los costos iniciales y requiere un mantenimiento más especializado.

En el trabajo [25] se enfoca en sistemas fotovoltaicos autónomos residenciales o rurales, donde se requiere una gestión optimizada de la energía generada y almacenada. El esquema optimiza la utilización de la energía generada por los paneles solares y el almacenamiento en las baterías, garantizando un suministro continuo y confiable de energía a las cargas conectadas, de tal manera no sólo mejora el rendimiento general del sistema, sino que también ayuda a prolongar la vida útil de la batería al minimizar la carga y optimizar la eficiencia de los procesos de carga y descarga. Estudios complementarios [26]- [27], confirman la efectividad de estrategias de control de voltaje y gestión de energía en sistemas híbridos PV-batería, contribuyendo a mejorar la eficiencia y la estabilidad de la red aislada.



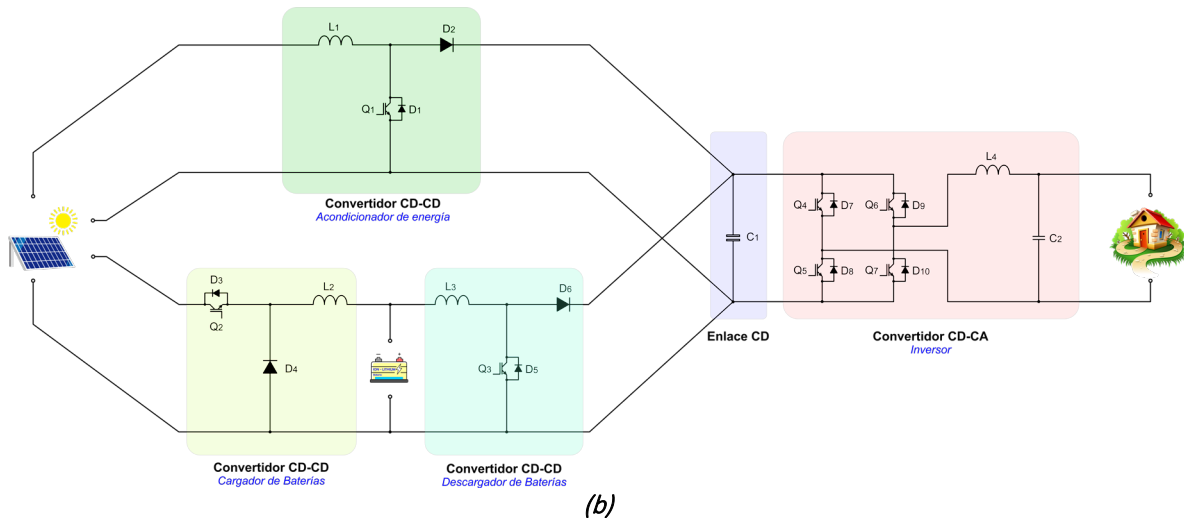


Fig.5 Esquema de un sistema fotovoltaico en enlace paralelo con la batería en CD, (a) Diagrama a bloques, (b) Implementación típica [25].

2.2.4 Técnica de enlace de PV y batería con convertidor multipuerto

La técnica principalmente se caracteriza por su capacidad bidireccionalidad, la operación en buses de corriente directa y la posibilidad de implementar controladores coordinados que regulen el flujo de energía entre los distintos puertos, reduciendo el número de etapas de potencia y mejorando la densidad energética del sistema [28].

Entre sus ventajas se encuentran la reducción de pérdidas en conversión, menor volumen y costo del sistema al eliminar convertidores intermedios, así como la mejora de la confiabilidad al evitar corrientes pulsantes hacia la batería [29]. Sin embargo, presentan ciertas desventajas, como una mayor complejidad en el diseño y control al manejar múltiples flujos de energía simultáneamente, posibles interacciones entre puertos que requieren controladores más sofisticados [30].

Las investigaciones reportadas en la literatura sobre esta técnica, dadas en los artículos [31] y [32] se orientan a sistemas de generación distribuida y microrredes con integración fotovoltaica y almacenamiento. En el esquema representado en la Fig.6 c) se utiliza una topología multipuerto basada en convertidores sin aislamiento para optimizar la interacción entre fuentes de energía renovable y medios de almacenamiento, permitiendo la integración de paneles solares y buses de corriente directa con sistemas de recolección y almacenamiento de energía. Su enfoque busca extraer eficientemente la energía de los paneles fotovoltaicos y gestionarla hacia las baterías, utilizando corrientes no pulsantes para mantener la integridad de cada componente. El objetivo es aumentar la eficiencia y confiabilidad de los sistemas de generación distribuida con almacenamiento de energía, optimizando la integración de fuentes renovables y asegurando el funcionamiento óptimo de cada componente.

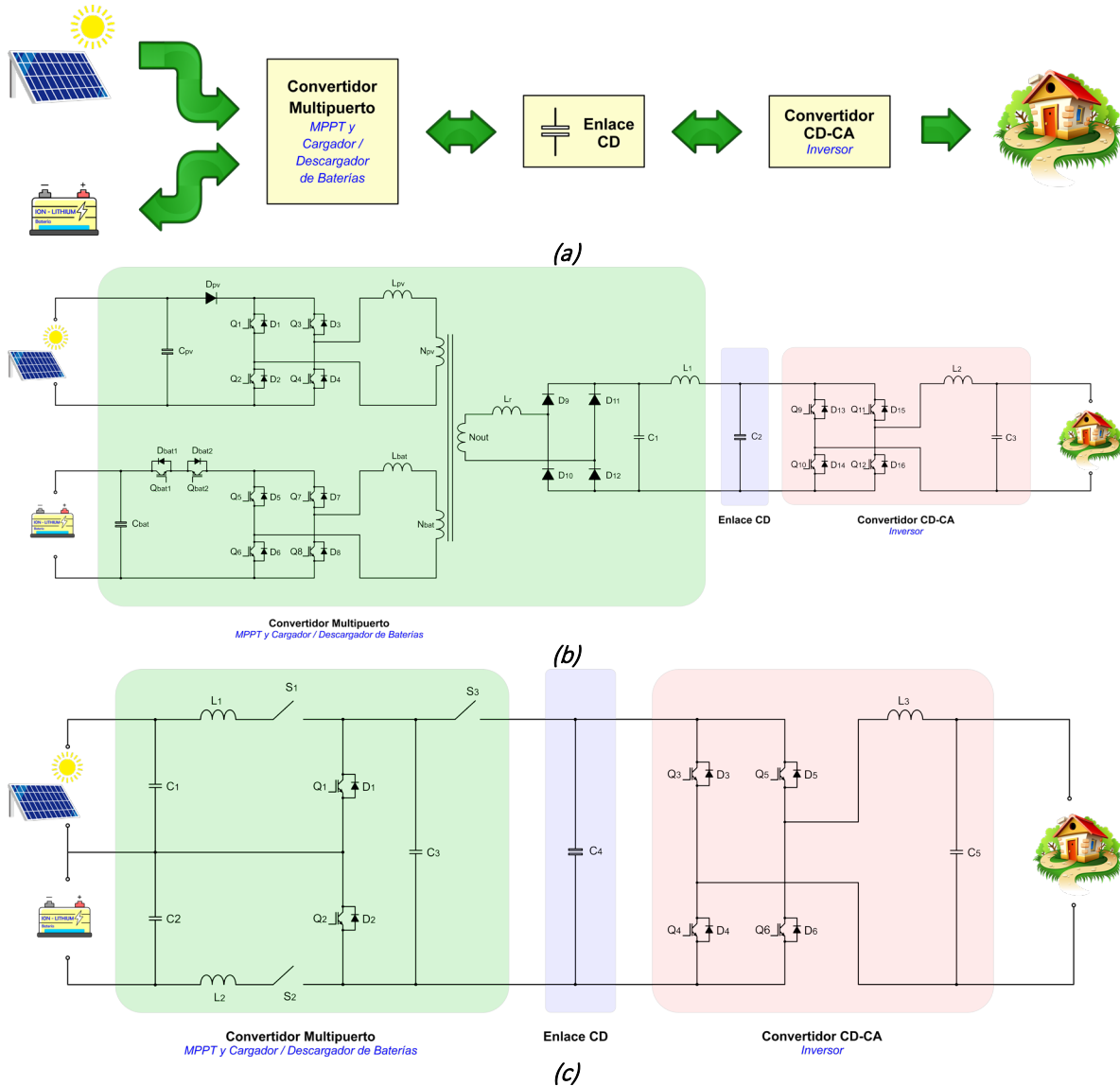


Fig.6 Esquema de un sistema fotovoltaico con enlace de PV y Batería con convertidor multipuerto, (a) Diagrama a bloques [25], (b) Implementación con convertidor multipuerto aislado, (c) Implementación con convertidor multipuerto no aislado [33].

En otro ámbito el artículo [33] se aplica a sistemas híbridos PV-batería con conversión CD-CA para optimizar la transferencia de energía hacia cargas locales o la red. Como se muestra en la Fig.6 b), la investigación se enfoca en el diseño y desarrollo de un convertidor que permite una mayor flexibilidad en el control de la potencia generada por el sistema fotovoltaico y almacenada en las baterías, optimizando así la eficiencia y la gestión energética del sistema en diferentes condiciones de operación. Los autores proponen un enfoque innovador que mejora la integración y el rendimiento de los sistemas fotovoltaicos con almacenamiento, lo que puede tener múltiples aplicaciones en el campo de la energía renovable y la sostenibilidad.

2.3 Convertidores CD-CD

Los convertidores CD-CD son dispositivos electrónicos que permiten modificar un nivel de tensión continuo hacia otro, ya sea elevándolo, reduciéndolo o regulándolo, mediante la conmutación de dispositivos semiconductores y el almacenamiento temporal de energía en elementos reactivos [34]. Su uso permite la gestión de diferentes niveles de tensión, adaptación de fuentes y cargas, mejora en la eficiencia, además de aumento en la densidad de potencia, son utilizados en sistemas de electrónica de potencia modernos como vehículos eléctricos (EV), sistemas fotovoltaicos (PV), energías renovables, telecomunicaciones y sistemas embebidos [35], orientados hacia la investigación de nuevos materiales, topologías resonantes y soluciones bidireccionales y multipuerto.

Estos convertidores son etapas electrónicas que permiten adaptar la tensión de una fuente a los requerimientos de una carga. Dentro de la categoría de topologías no aisladas como se muestra en la Tabla.1 se incluyen los convertidores Buck, Boost, Buck-Boost, así como las configuraciones Cúk y SEPIC, los cuales permiten regular la energía de manera eficiente según los requisitos de cada aplicación.

El convertidor Buck reduce la tensión de entrada con alta eficiencia y es ampliamente utilizado en reguladores locales. El Boost eleva el nivel de tensión, siendo común en sistemas fotovoltaicos, vehículos eléctricos y accionamientos. El Buck-Boost ofrece una salida mayor o menor que la entrada, por lo que es útil en aplicaciones con sistemas de almacenamiento como baterías. Los convertidores Cúk y SEPIC destacan por su menor rizo de corriente y su capacidad de ofrecer salidas inversoras o no inversoras. Estas topologías permiten una regulación estable bajo diversas condiciones de operación [34]-[38]. Por otro lado, los convertidores aislados se basan en transformadores de alta frecuencia, como los Flyback, Forward, Push-Pull, Half-Bridge y Full-Bridge, útil en aplicaciones donde el aislamiento galvánico es un requisito de seguridad.

Tabla. 1 Esquemas eléctricos de las topologías no aisladas de convertidores CD-CD.

Topología	Esquema eléctrico
Buck	
Boost	
Buck-Boost	
Ćuk	
SEPIC	

Los avances en tecnología de semiconductores han impulsado de manera significativa la eficiencia, la capacidad de conmutación y densidad de potencia de los convertidores de corriente directa. Entre los dispositivos más utilizados se encuentran los MOSFET de potencia, adecuados para aplicaciones de alta frecuencia y baja tensión, los IGBT son preferidos en niveles de potencia elevados y frecuencias moderadas, así como los dispositivos basados en carburo de silicio (SiC), que ofrecen menores pérdidas, operación a altas temperaturas y mayor velocidad de conmutación. De igual manera, los transistores de nitruro de galio (GaN) permiten diseños compactos y altamente eficientes gracias a su elevada capacidad de conmutación [39]-[42].

En el control de convertidores CD-CD se emplean diversas estrategias destinadas a garantizar una regulación precisa, una elevada eficiencia energética y una respuesta dinámica optimizada. Entre las técnicas más comunes destacan la modulación por ancho de pulso (PWM) basada en compensadores de tipo proporcional-integral (PI), el control en modo corriente, que mejora la respuesta dinámica y la protección de los inductores, y los métodos no lineales, tales como el control por modo deslizante y el control en modo promedio. Asimismo, los sistemas de control digital, implementados mediante microcontroladores, permiten mayor flexibilidad y adaptación a diferentes condiciones de operación. En aplicaciones bidireccionales y multipuerto, se incorporan metodologías avanzadas como el control predictivo, la optimización energética y los esquemas de gestión multiobjetivo [43].

2.4 Convertidores multipuerto

Los convertidores multipuerto son dispositivos que se caracterizan por integrar de manera eficiente múltiples fuentes de energía renovable y almacenamiento en una arquitectura unificada, optimizando tanto la operación como la estabilidad del sistema. La capacidad para conectar y gestionar de forma simultánea diversas fuentes, como paneles solares, baterías y supercondensadores, los convierte en una herramienta versátil para aplicaciones autónomas y descentralizadas [44]-[50].

Para visualizar la integración de múltiples elementos energéticos en una arquitectura unificada, se presenta en la Fig.7 un esquema general de un convertidor multipuerto. A través de sus diferentes puertos, el convertidor posibilita el flujo energético en múltiples direcciones, permitiendo la entrega de potencia hacia distintas cargas o la interacción con otros subsistemas dentro de una microrred. Esta configuración facilita la gestión coordinada de energía, optimiza la eficiencia operativa y reduce la necesidad de etapas de conversión independientes.

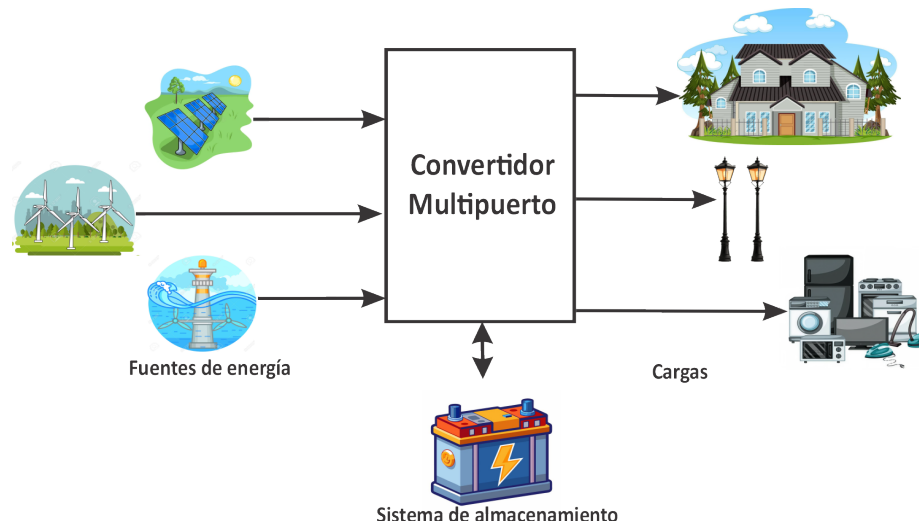


Fig.7 Esquema general de un convertidor multipuerto con fuentes renovables, almacenamiento bidireccional y cargas.

2.4.1 Características

Las características de un convertidor multipuerto permiten ser ideales para enfrentar los desafíos de eficiencia, flexibilidad y densidad de potencia en los procesos de conversión y almacenamiento de energía [51]-[55]. Entre las principales características se incluyen:

- ⊗ Integración y transferencia simultánea de energía entre múltiples fuentes de energía, como paneles solares y baterías, así como diversos sistemas de almacenamiento.
- ⊗ Aumento en la densidad de potencia posibilitan diseños más compactos y ligeros.
- ⊗ Eliminación de la necesidad de emplear múltiples convertidores aislados para gestionar diferentes fuentes, lo que reduce la complejidad del sistema y disminuye la cantidad de componentes pasivos y activos requeridos.

Además, se destacan por su transferencia bidireccional de energía, adaptabilidad modular, y compatibilidad con múltiples tecnologías, como paneles solares y turbinas eólicas. Ofrecen alta eficiencia en topologías optimizadas y control avanzado, además de gestión inteligente con monitoreo en tiempo real, que incorporan tecnologías para reducir interferencias electromagnéticas y en algunos casos, aislamiento galvánico, mejorando la seguridad [56]-[62].

2.4.2 Aplicaciones

En años recientes, los convertidores multipuerto han adquirido relevancia debido a su capacidad de integrar múltiples fuentes de energía y dispositivos de almacenamiento en un mismo sistema. Al ofrecer distintas rutas de flujo energético estas topologías se posicionan como elementos clave en aplicaciones modernas de conversión y distribución de energía.

En los artículos [63]-[64] se propone una topología de convertidor CD-CD no aislado de tres puertos mostrada en la Fig.8 la cual integra directamente el panel fotovoltaico, la batería y la carga, simplificando la arquitectura y eliminando convertidores adicionales. Esta topología busca maximizar la eficiencia operativa incluso bajo condiciones variantes durante sus diferentes modos de operación entre los puertos, alcanzando un rendimiento superior al 90 % en la eficiencia, así mismo ofrece flexibilidad y reduce el número de componentes al prescindir de transformadores, lo que disminuye pérdidas y mejora el desempeño global del sistema. Su operación se basa en tres modos de operación: (1) PV a Carga, donde solo conduce S1 y el convertidor opera en topología tipo Buck; (2) PV Batería, los interruptores S1 y S2 se encuentran en conducción para cargar la batería operando también en modo Buck; y (3) PV y la Batería hacia la Carga, los interruptores S1 y S3 en conducción, habilitando el

aporte conjunto de ambas fuentes y un comportamiento Buck/Boost según las condiciones de potencia.

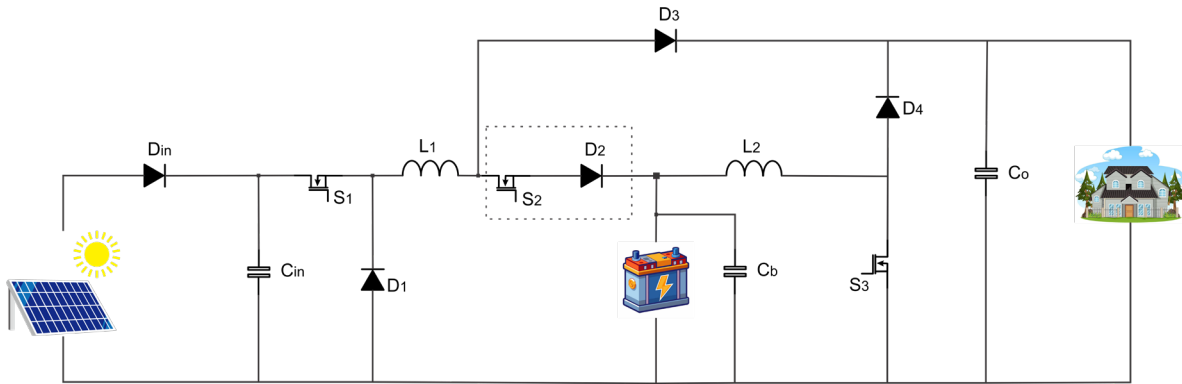


Fig.8 Representación del modelo equivalente de una topología CD-CD no aislada de tres puertos [63]-[64].

En la investigación [65] se desarrolla un convertidor reconfigurable de tres puertos ilustrado en Fig.9 diseñado para sistemas fotovoltaicos y baterías que permite la transferencia bidireccional de energía y una gestión eficiente bajo condiciones de irradiancia variable y una reconfiguración dinámica de los flujos de energía según las necesidades del sistema. El sistema utiliza un control inteligente que ajusta automáticamente los modos de operación, alcanzando una eficiencia superior al 96% mediante técnicas de modulación avanzada y conmutación suave, cabe mencionar se validó experimentalmente bajo diferentes escenarios, demostrando su rendimiento estable y eficiente en diversos modos operativos. Esta topología es capaz de funcionar en modo PV a Carga operando como Boost, PV a Batería en modo Buck combinado con Boost, así como PV y batería hacia la carga en configuración Flyback. Su arquitectura incorpora un interruptor bidireccional y un diodo, además de un devanado acoplado que habilita la etapa Flyback para la entrega eficiente de energía, el sistema cuenta con una entrada unidireccional, un puerto de batería bidireccional y un puerto de salida regulado, permitiendo mantener estable el suministro energético

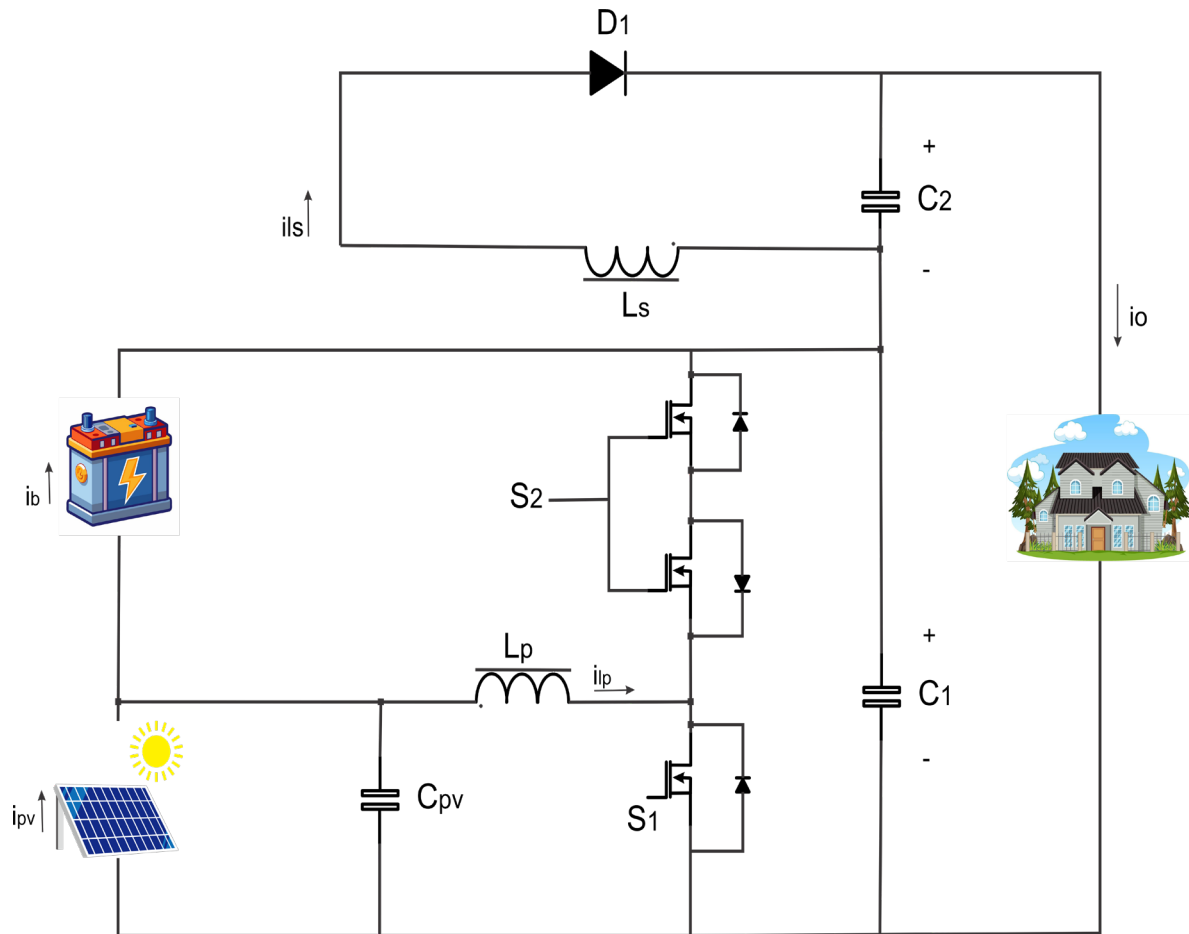


Fig.9 Representación del modelo equivalente de un convertidor reconfigurable CD-CD de tres puertos [65].

El estudio [66] se presenta el diseño y análisis de un convertidor de tres niveles para aplicaciones fotovoltaicas. Utilizando transistores de nitruro de galio (GaN) y una modulación por ancho de pulso (PWM) con desplazamiento de fase para una transferencia eficiente de energía entre una fuente fotovoltaica, una batería y una carga. El diseño, se validó y simuló alcanzando eficiencia energética superior al 97.5%, destacando por su alta eficiencia y capacidad de operar conmutando de manera suave, reduciendo pérdidas y mejorando el rendimiento en condiciones variables, la configuración del convertidor se ilustra en la Fig.10. En esta aplicación multipuerto, el uso de dispositivos GaN permite operar a frecuencias de conmutación más altas con menores pérdidas, mejorando significativamente el rendimiento del convertidor, la modulación fase-desfasada facilita la regulación de la potencia transferida sin modificar la frecuencia de conmutación, proporcionando un control más flexible y eficiente del flujo energético entre los puertos.

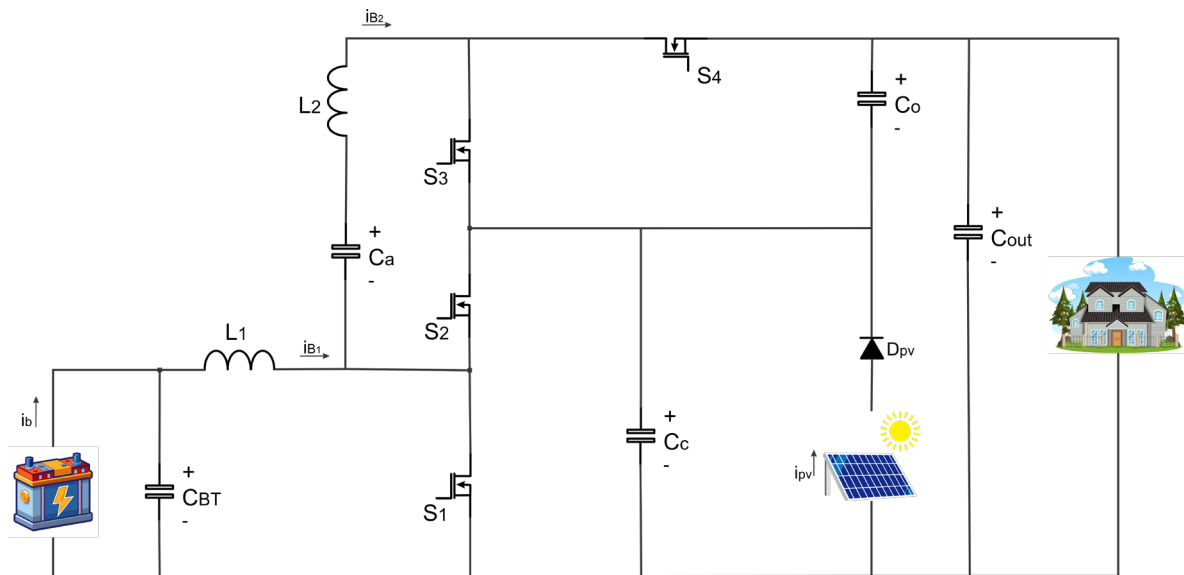


Fig.10 Representación del modelo equivalente de un convertidor de tres puertos con GaN y PWM fase-desfasada [66].

Capítulo 3:

Sistema fotovoltaico autónomo y convertidor propuesto

Los sistemas fotovoltaicos autónomos permiten la generación y suministro de energía eléctrica de forma independiente a la red, integrando fuentes solares, sistemas de almacenamiento y etapas de conversión de potencia. La arquitectura de interconexión de estos elementos influye directamente en la eficiencia y el desempeño del sistema.

En este capítulo se describe el esquema tradicional de conexión y una configuración en paralelo empleada en sistemas fotovoltaicos autónomos. Asimismo, se presenta como propuesta de solución un convertidor bidireccional en esquema paralelo, el cual considera dos rutas de transferencia de energía orientadas a mejorar la gestión energética y el rendimiento global del sistema.

3.1 Sistema fotovoltaico autónomo con esquema tradicional

Los sistemas fotovoltaicos autónomos se suelen implementar bajo un esquema tradicional de conexión que comprende de cinco etapas ilustradas en la Fig.11, las cuales aseguran el adecuado flujo de energía desde la captación de energía solar hasta el consumo final del usuario.

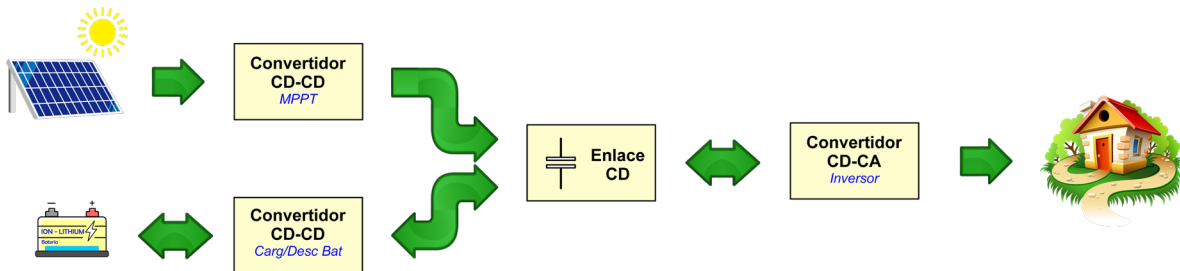


Fig.11 Representación a bloques de un sistema fotovoltaico autónomo en esquema tradicional.

El procesamiento de la energía inicia cuando los paneles fotovoltaicos reciben la irradiancia solar, transformando la energía lumínica en energía eléctrica de corriente directa mediante el efecto fotovoltaico. Esta energía generada, compuesta por una corriente y una tensión variables según las condiciones de irradiancia, es conducida hacia un convertidor CD-CD tipo Boost con control MPPT, el cual eleva y regula el nivel de tensión para optimizar la potencia entregada al bus de corriente directa (Bus CD).

La energía transferida por el convertidor Boost se dirige al bus CD, que actúa como un enlace común entre las distintas etapas del sistema. Desde este bus, la energía es dirigida hacia el sistema de almacenamiento en la batería, sin embargo, antes de su almacenamiento pasa por un convertidor CD-CD bidireccional, el cual opera con una única entrada/salida para realizar la carga y descarga de la batería. Durante la carga, el convertidor opera bajo una topología tipo Buck, reduciendo la tensión del bus para adecuarla al nivel requerido por la batería, mientras para la descarga funciona con topología Boost, elevando la tensión de la batería para devolver la energía al Bus CD.

Donde finalmente la energía se dirige a la etapa de conversión CD-CA, donde se transforma en potencia de corriente alterna, esta etapa garantiza que la tensión y frecuencia de salida cumplan con los requerimientos del consumo del usuario o de la carga conectada.

3.2 Sistema fotovoltaico autónomo con esquema paralelo

En la Fig.12 se presenta un diagrama a bloques del esquema paralelo en un sistema fotovoltaico autónomo, el cual se caracteriza por permitir dos posibles rutas de transferencia de energía generada por los paneles solares.

En la primera ruta, la energía generada por PV se utiliza de manera inmediata cuando la producción coincide con la demanda del usuario. En este sentido, la corriente directa es procesada por un convertidor CD-CD con control MPPT, posteriormente se dirige de forma directa hacia la etapa de transformación de corriente directa a corriente alterna suministrando así la potencia eléctrica requerida por el consumo del usuario.

En la segunda ruta, se contempla el escenario en el que la energía generada excede la demanda o no es requerida de forma inmediata. Particularmente la energía es derivada hacia el sistema de almacenamiento en baterías, antes de su almacenamiento, pasa a través de un convertidor CD-CD bidireccional, el cual cuenta con una entrada y salida independientes, permitiendo las funciones de carga y descarga de la batería según las condiciones del sistema. Posteriormente, la energía almacenada en la batería puede ser utilizada durante periodos de baja o nula irradiancia solar, fluyendo nuevamente hacia el inversor, de esta manera el esquema paralelo garantiza un suministro constante y confiable de energía hacia el usuario.

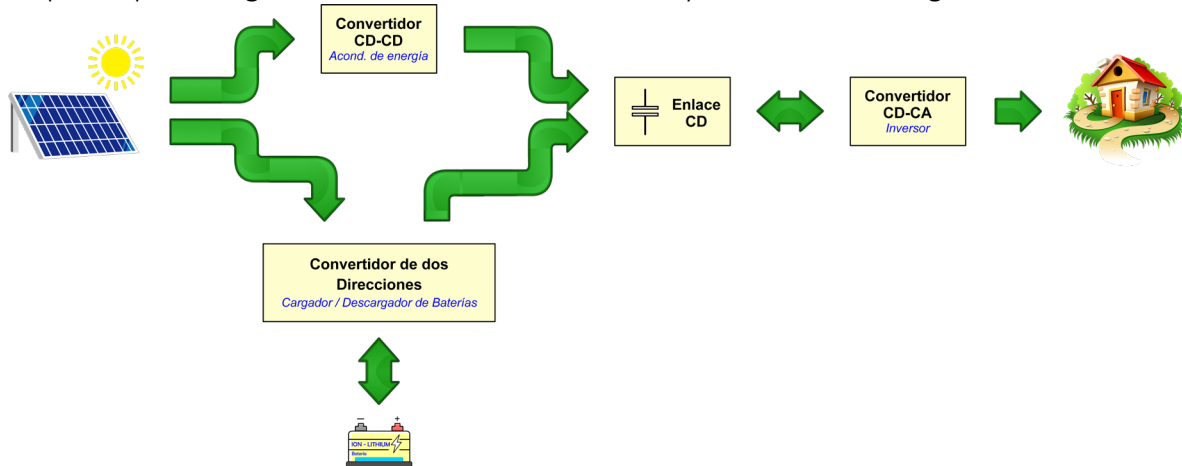


Fig.12 Representación a bloques de un sistema fotovoltaico autónomo en esquema paralelo

3.3 Convertidor propuesto para operación en paralelo

Se propone un convertidor bidireccional en paralelo con el convertidor CD-CD MPPT para optimizar la gestión de carga y descarga de baterías en sistemas fotovoltaicos autónomos. Esta topología permite un flujo de energía bidireccional, adaptado a la disponibilidad de energía, demanda de carga y control del flujo, de esta manera reduce las etapas de conversión de cuatro a tres optimizando el flujo de energía y mejorando significativamente la eficiencia del sistema.

En función de ser paralelo permite dos rutas principales para la energía generada: el suministro directo a la carga a través del convertidor CD-CD MPPT cuando la generación solar es suficiente, o el almacenamiento en baterías mediante un convertidor bidireccional para su uso posterior, donde ambas rutas comparten un punto de salida común (β).

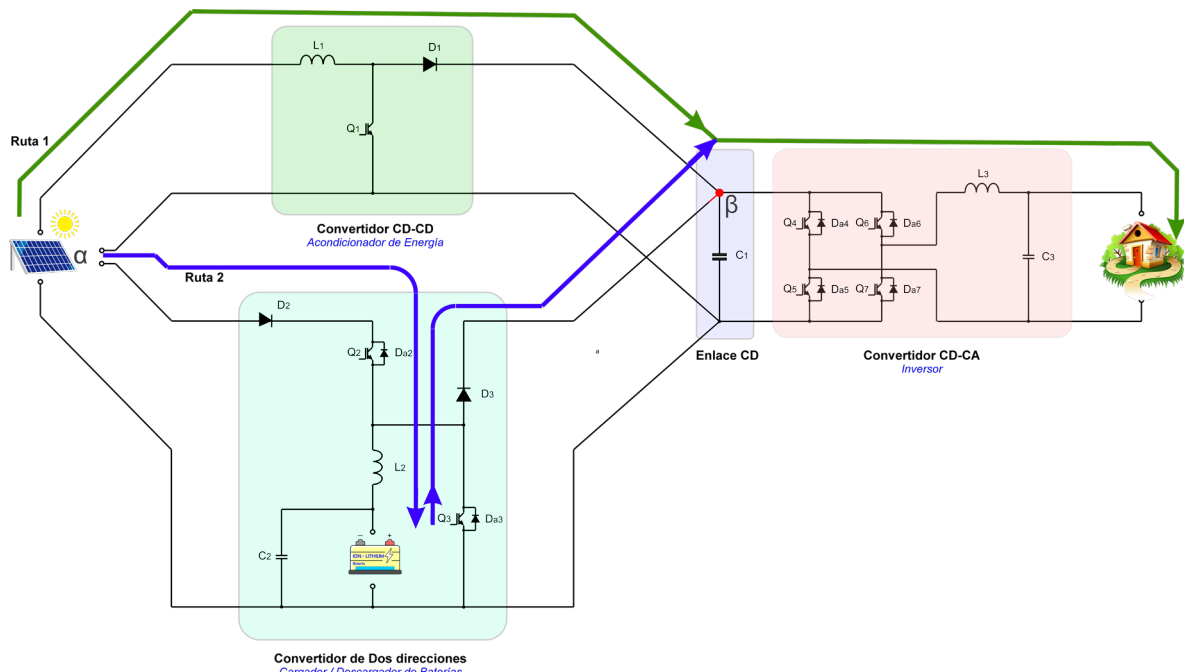


Fig.13 Representación del circuito equivalente del convertidor bidireccional en paralelo propuesto y sus rutas de flujo de energía.

El convertidor bidireccional propuesto opera en cinco modos distintos de transmisión y control de potencia diseñados para adaptarse a la disponibilidad de las fuentes de entrada, las demandas de la carga y las necesidades de control del flujo energético. Como se muestra en la Fig.13, el circuito equivalente depende del estado de activación o desactivación de los transistores controlados (Q_1 , Q_2 , Q_3), además entre su composición cuenta con tres diodos (D_1 , D_2 , D_3), dos condensadores (C_1 , C_2), dos inductores (L_1 , L_2), una fuente fotovoltaica denominada PV, una batería (B_{att}) y una carga (R_{Load}) representada mediante una casa habitación, cabe destacar que la representación del convertidor de CD-CA no se incorpora, solo es una representación gráfica.

En este contexto, los modos de operación considerados presentan una función principal que se define a partir de una analogía funcional entre las fuentes de energía y las topologías de conversión involucradas tales como:

- ❑ **Modo PV a Carga:** Cuando la batería alcanza su carga completa, el sistema fotovoltaico suministra energía exclusivamente a la carga mediante una topología Boost controlada por el transistor Q_1 .
- ❑ **Modo Batería a Carga:** En ausencia de generación fotovoltaica, la batería alimenta a la carga operando como convertidor Boost bajo el control del transistor Q_3 .
- ❑ **Modo PV a Batería:** En ausencia de requerimiento de energía en la carga, la energía del sistema fotovoltaico se dirige al almacenamiento, funcionando como convertidor Buck controlado por Q_2 .
- ❑ **Modo PV a Batería y Carga:** Cuando la generación fotovoltaica excede la demanda, la energía se distribuye simultáneamente hacia la carga y la batería, combinando las

topologías Boost y Buck para optimizar el aprovechamiento energético. Este modo opera de forma paralela, mediante el control coordinado de los transistores Q_2, Q_1 .

- ❑ **Modo PV y Batería a Carga:** Cuando la generación del PV es insuficiente, el suministro se realiza de forma conjunta entre el sistema fotovoltaico y la batería, asegurando la continuidad del servicio hacia la carga. Este modo también opera en paralelo, controlando los transistores Q_3, Q_1 .

En circuito equivalente, la entrada del convertidor bidireccional se identifica con el símbolo α y la salida con (β) debido a que son independientes, es importante destacar que la topología propuesta permite gestionar la distribución de energía, combinando el flujo hacia el suministro del usuario y el almacenamiento en la batería.

Capítulo 4:

Análisis de convertidor bidireccional en esquema paralelo

Con el objetivo de mejorar la eficiencia en la gestión de los procesos de carga y descarga de baterías en sistemas fotovoltaicos autónomos, en este capítulo se presenta el análisis del convertidor bidireccional propuesto. Dicho análisis permite evaluar su comportamiento eléctrico bajo diferentes condiciones de operación, con el fin de justificar su eficiencia y confiabilidad dentro del sistema.

La topología propuesta se basa en la reconfiguración de un esquema tradicional de enlace CD con la batería en corriente directa, incorporando dos rutas principales de transferencia de energía. Estas rutas permiten el suministro directo de energía a la carga a través del convertidor CD-CD con MPPT cuando la generación solar es suficiente, o bien el almacenamiento de energía en baterías mediante el convertidor bidireccional para su uso posterior, garantizando así un suministro energético continuo y confiable.

4.1 Introducción

El funcionamiento del convertidor bidireccional propuesto puede describirse mediante distintos modos de operación, los cuales dependen del estado de conmutación de los interruptores electrónicos que conforman la topología. En las secciones 4.2 a 4.6, se analizó el comportamiento eléctrico de convertidor bidireccional (Ver Fig.14), respectivamente en sus distintos modos de operación considerando el flujo de corriente en los inductores y las tensiones en los condensadores.

Los modos de operación se definen a partir de la activación y desactivación de los transistores Q_1 , Q_2 y Q_3 , lo que permite establecer los diferentes estados de conmutación responsables de la transferencia de energía entre la fuente fotovoltaica, el sistema de almacenamiento y la carga. Este análisis proporciona las bases para comprender el desempeño dinámico del convertidor en cada condición de operación.

El primer tiempo de conmutación es denominado tiempo de conducción (t_{on}) y está determinado por el encendido del interruptor de control permitiendo al convertidor almacenar energía en el inductor, para posteriormente transmitirlo al condensador en el segundo intervalo de conmutación denominado tiempo de bloqueo (t_{off}) cuando el interruptor se encuentra apagado. Mediante la suma de los tiempos de conmutación se obtiene el periodo de conmutación (T_s) el convertidor representado en la ecuación (1).

$$t_{on} + t_{off} = T_s \quad (1)$$

La forma de controlar el funcionamiento de los transistores para el convertidor bidireccional en esquema paralelo presente es mediante la modulación por ancho de pulso, para generar dos estados de conmutación, permitiendo gestionar eficientemente el flujo bidireccional de energía, minimizar pérdidas y garantizar un funcionamiento estable del sistema.

El análisis descrito en estas próximas secciones es primordial para la implementación del convertidor bidireccional en una herramienta de simulación de circuitos eléctricos, por ende, se analiza los estados de conmutación de los distintos modos de operación del circuito, identificando su principal funcionamiento. Se presenta cada modo de operación con sus diagramas eléctricos, circuitos equivalentes y se describe el comportamiento de la tensión y corriente que circula por los componentes mediante su forma de onda características operando en modo de conducción continua. En consecuencia, al análisis de circuitos de los distintos modos de operación, se determinaron las ecuaciones derivadas presentadas en la Tabla.2 de la sección 4.7.

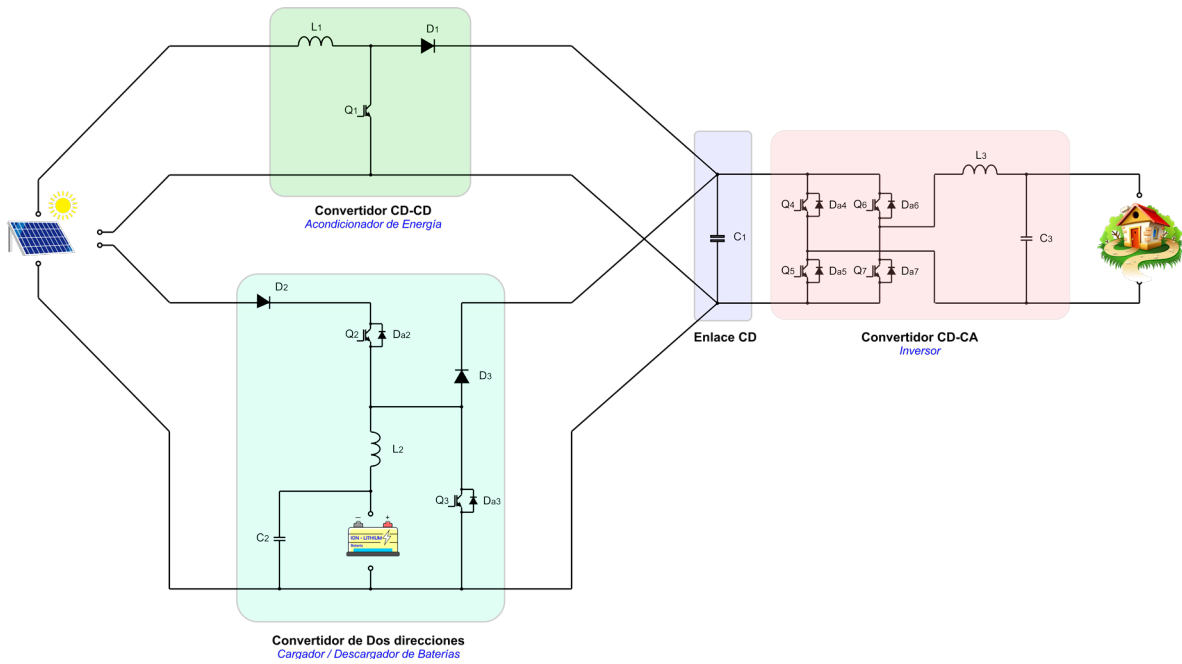


Fig.14 Representación del circuito equivalente del convertidor bidireccional en paralelo propuesto.

4.2 Modo PV a Carga

Cuando la batería alcanza su estado de carga completa, el PV suministra energía exclusivamente a la carga mediante una topología tipo Boost, tal como se muestra en la Fig.15. En este modo de operación, los transistores Q_2 y Q_3 permanecen apagados, mientras que Q_1 realiza el control del flujo energético a través de sus estados de conmutación. Los componentes clave son la fuente fotovoltaica (PV), el transistor Q_1 , el diodo D_1 , el condensador C_1 y la resistencia representativa de la carga (R_{Load}).

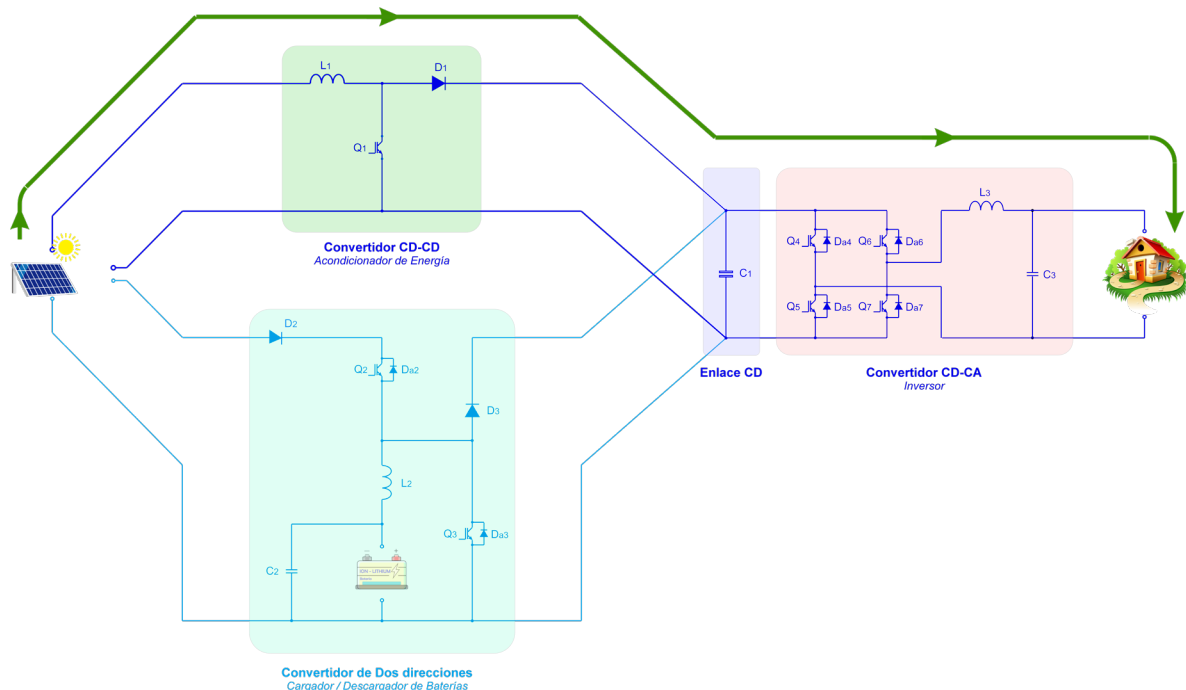


Fig.15 Circuito equivalente del esquema fotovoltaico autónomo integrado en modo PV a Carga.

4.2.1 Análisis eléctrico en CD

Durante el modo de funcionamiento PV a Carga, el transistor Q_1 realiza el control de la energía mediante dos estados de conmutación en un período de operación. El primer estado de conmutación se ilustra en la Fig.16, donde Q_1 está activado, lo que permite que la corriente fluya desde PV hacia el inductor L_1 , mientras que D_1 permanece apagado.

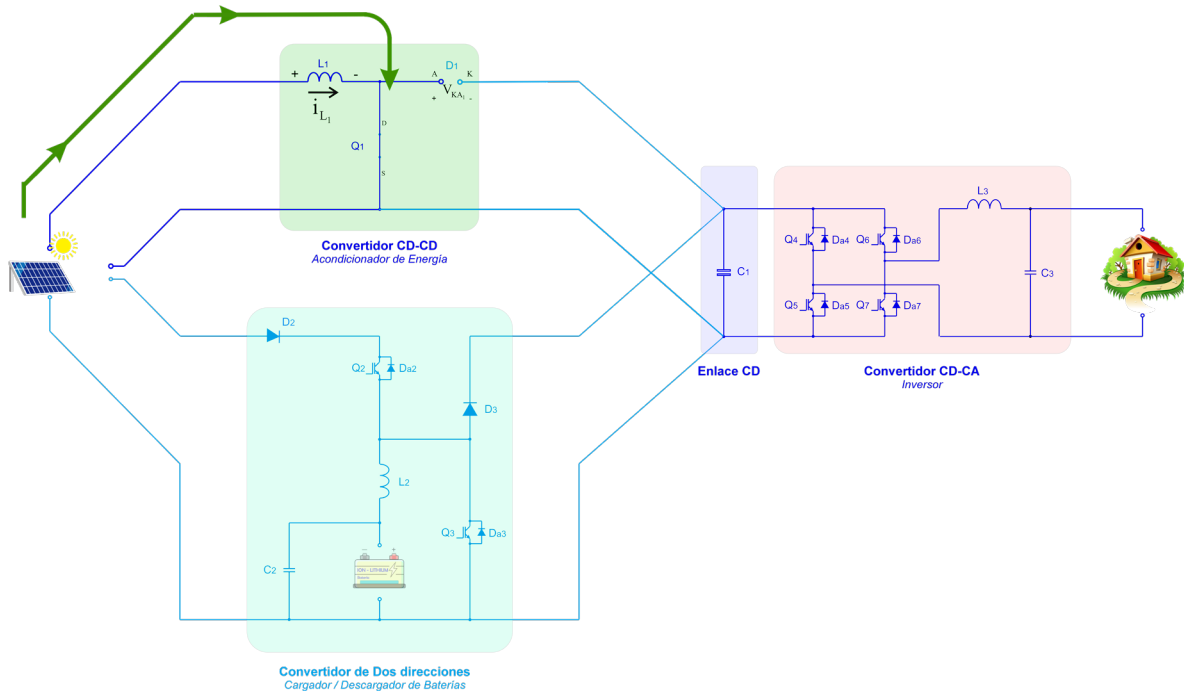


Fig.16 Circuito equivalente en tiempo de conducción en modo PV a Carga.

Por otro lado, cuando Q_1 está desactivado y el diodo D_1 conduce, permitiendo la descarga del condensador C_1 hacia la carga representada como una casa habitación, como se observa en la Fig.17.

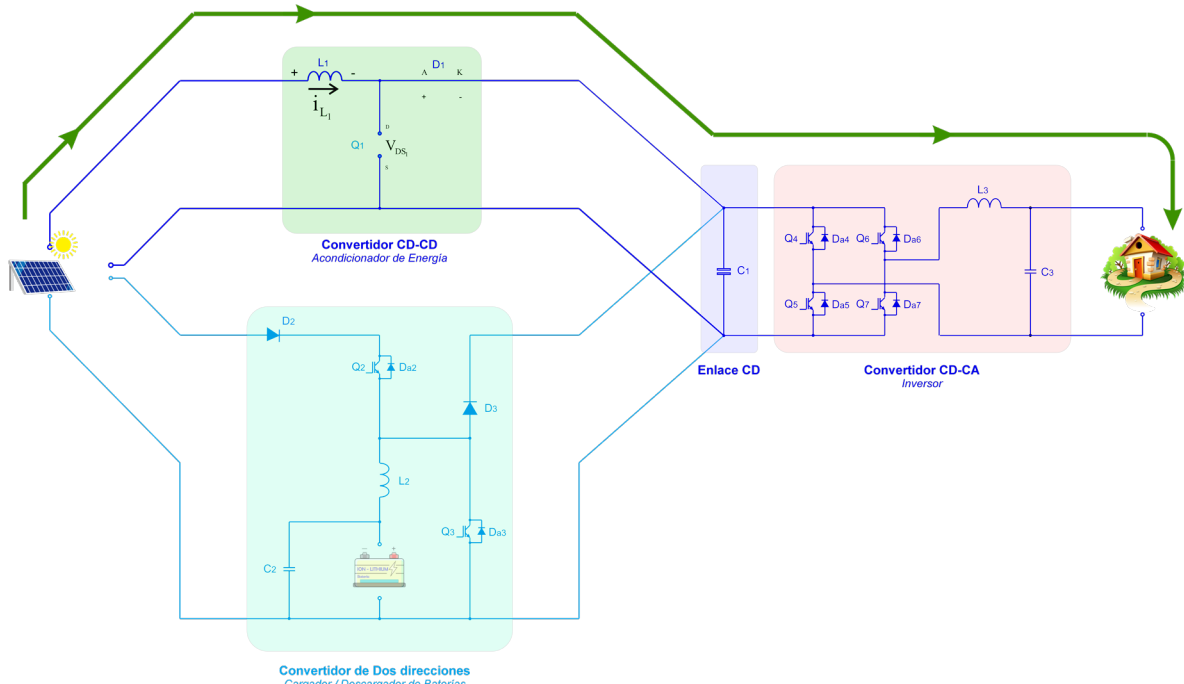


Fig.17 Circuito equivalente en tiempo de bloqueo en modo PV a Carga.

Esta operación asegura una transferencia eficiente de energía desde el sistema fotovoltaico a la carga cuando la batería no requiere más energía de carga. Utilizando los estados de conmutación, se generan las formas de onda correspondientes a cada uno de los

componentes mostrados en la Fig.18. A partir del comportamiento del circuito, se obtiene la ganancia en corriente directa, aplicando el balance de energía en el inductor, se deduce la siguiente ecuación

$$(D \cdot T_s)(V_{Batt}) = (1-D)(V_{Batt} - V_{Load})(T_s) \quad (2)$$

Mediante de la ecuación (2), es posible derivar la expresión de la ganancia en corriente directa mediante la aplicación de la condición de balance volt-segundo sobre el inductor. Esto permite obtener una ecuación (3), en función del ciclo de trabajo:

$$M = \frac{1}{1-D} \quad (3)$$

La tensión en el inductor es directamente proporcional a la velocidad de cambio de la corriente. Por tanto, la relación tensión-corriente está dada por la ecuación (4). Cuando la corriente es constante, la tensión en el inductor es cero, lo que implica que el inductor se comporta como un cortocircuito en corriente directa.

$$V_{L_1} = L_1 \cdot \frac{di_{L_1}}{dt} \quad (4)$$

Con base en la ecuación (4) y Fig.18 b), se determina el valor del inductor como función de la tensión del panel solar, el ciclo de trabajo, el rizo de corriente y la frecuencia de conmutación, según la ecuación (5).

$$L_1 = \frac{V_{PV} \cdot D}{\Delta i_{L_1} \cdot f_s} \quad (5)$$

Para determinar el valor del condensador, se sigue un procedimiento similar al utilizado para el inductor, se parte del análisis de la corriente en el condensador, representada en la ecuación (6).

$$i_{C_1}(t) = C_1 \frac{dV_{C_1}}{dt} \quad (6)$$

A partir de su desarrollo, se obtiene la expresión para el valor de la capacitancia, mostrada en la ecuación (7), la cual depende de la tensión de salida, el ciclo de trabajo, el rizo de voltaje (expresado como un porcentaje de la tensión de salida), la resistencia de carga y la frecuencia de conmutación.

$$C_1 = \frac{V_{Load} \cdot D}{R_{Load} \cdot \Delta V_{C_1} \cdot f_s} \quad (7)$$

La corriente promedio que circula a través del transistor **Q₁** es igual a la corriente de entrada o corriente promedio del convertidor. Al expresar esta relación en función del ciclo de trabajo, se obtiene la ecuación (8).

$$I_{Q_1} = I_{Load} \cdot D \quad (8)$$

Por otro lado, la corriente promedio que fluye a través del diodo **D₁** está relacionada con la corriente de salida, tal como se muestra en la ecuación (9).

$$I_{D_1} = I_{Load} (1-D) \quad (9)$$

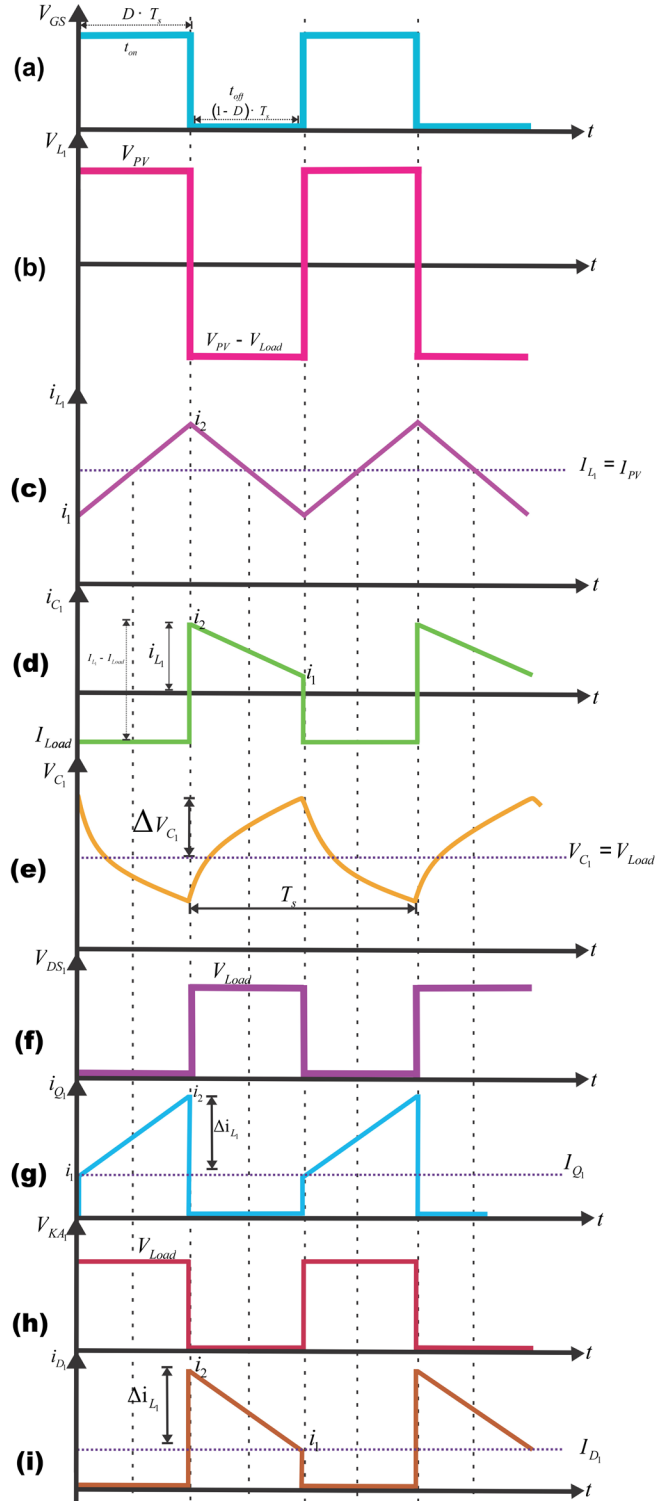


Fig.18 Formas de onda del convertidor Boost PV a Carga.

a) Disparo del transistor, b) Tensión en el inductor, c) Corriente en el inductor, d) Corriente en el condensador, e) Tensión en el condensador, f) Tensión en el transistor, g) Corriente de transistor, h) Tensión en el diodo, i) Corriente en el diodo.

4.3 Modo Batería a Carga

El modo de transmisión y control de potencia desde la Batería hacia Carga se activa en ausencia de generación de energía del sistema fotovoltaico, es decir, la batería alimenta a la carga operando como convertidor Boost bajo el control del transistor Q_3 , mientras Q_1 y Q_2 permanecen desconectados durante todo el ciclo. Los componentes principales en este modo incluyen el inductor L_2 , los condensadores C_1 y C_2 , la batería y la resistencia de carga (R_{Load}) representada como una casa habitación en la Fig.19.

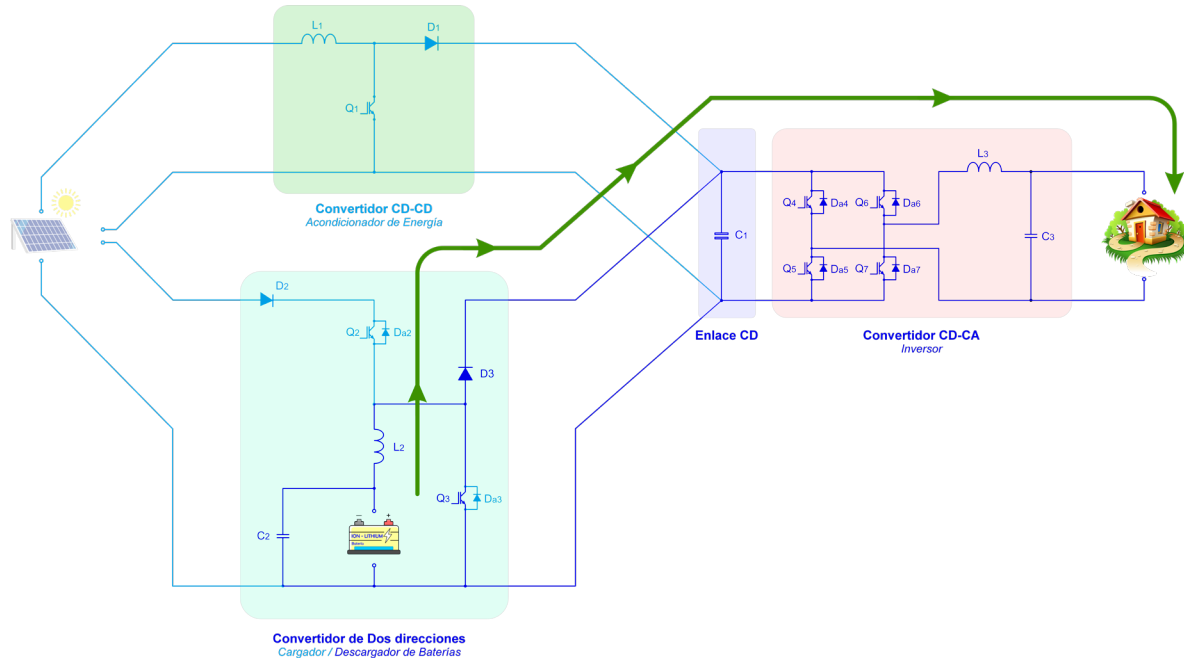


Fig.19 Circuito equivalente del esquema fotovoltaico autónomo integrado en modo Batería a Carga

4.3.1 Análisis eléctrico en CD

La Fig.19 muestra el circuito equivalente del convertidor Boost para este modo de operación, en la presente configuración el transistor Q_3 se encarga de regular el flujo de energía durante todo el ciclo. El funcionamiento del convertidor en este modo se define por dos estados de conmutación, durante el primer estado, el transistor Q_3 se encuentra en conducción, la corriente fluye directamente desde la batería a través del inductor L_2 , mientras que el diodo D_3 permanece apagado, aislando la carga como se ilustra en la Fig.20.

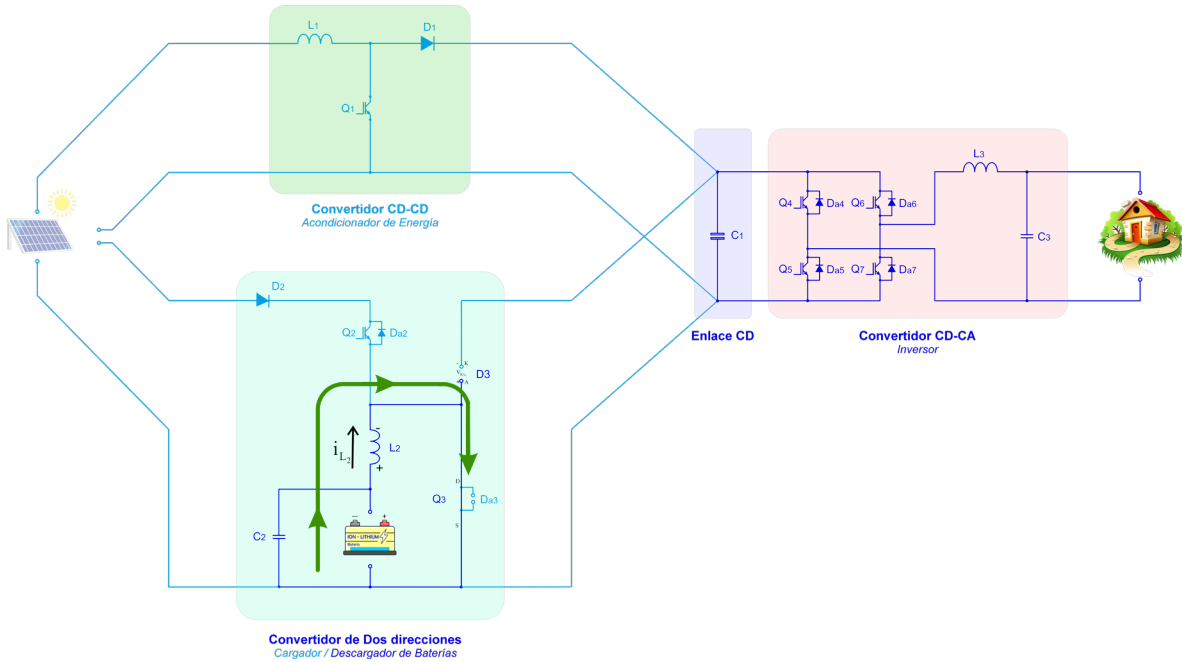


Fig.20 Circuito equivalente en tiempo de conducción en modo Batería a Carga.

Para el segundo estado desactivar Q_3 , el diodo D_3 entra en conducción y la energía previamente almacenada en el inductor L_2 se transfiere a la carga a través de D_3 y el condensador C_1 , garantizando un suministro continuo de energía hacia la carga (R_{Load}), como se muestra en la Fig.21.

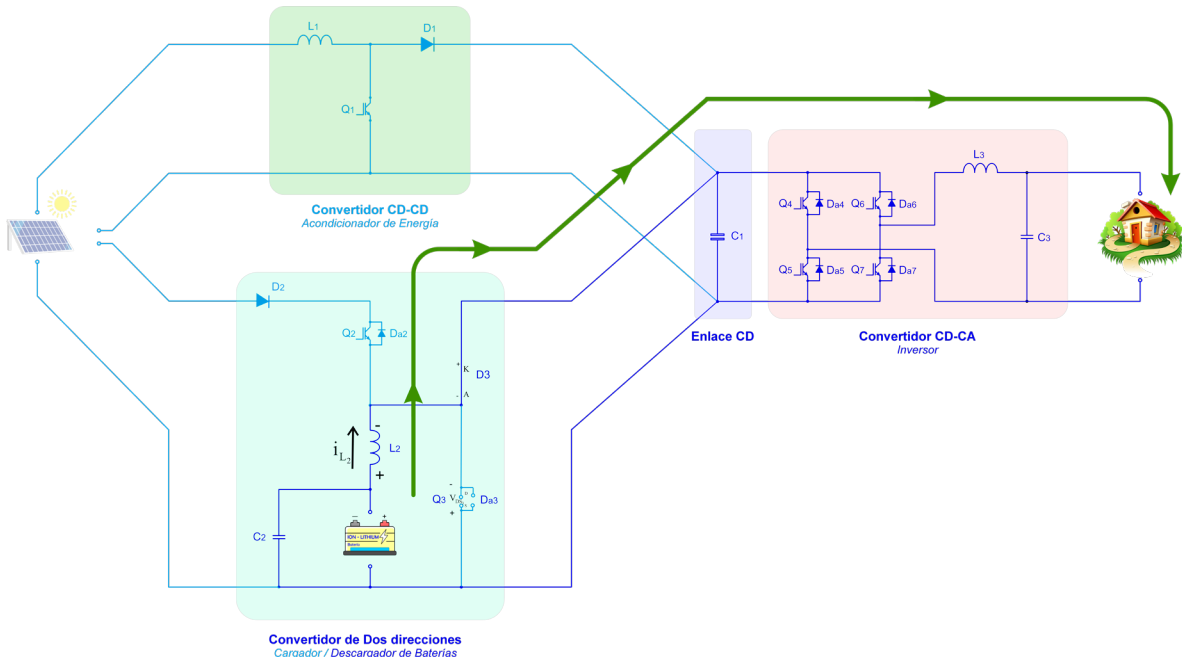


Fig.21 Circuito equivalente en tiempo de bloqueo en modo Batería a Carga.

Para caracterizar este modo de operación, se analizan los circuitos equivalentes a partir de los cuales se generan las formas de onda de los diferentes componentes, ilustrados en la Fig.22. Por otro lado, se determina la ganancia en corriente directa, cuya expresión se obtiene aplicando el balance de energía en el inductor, resultando en la ecuación (10).

$$(D \cdot T_s)(V_{Batt}) = (1-D)(V_{Batt} - V_{Load})(T_s) \quad (10)$$

Mediante la aplicación de la condición de balance volt-segundo sobre el inductor L_2 , se deriva la ecuación de ganancia en función del ciclo de trabajo, mostrada en la ecuación (11):

$$M = \frac{1}{1-D} \quad (11)$$

Dado que la tensión en un inductor es proporcional a la variación de la corriente, se establece la relación tensión-corriente en la ecuación (12).

$$V_{L_2} = L_2 \cdot \frac{di_{L_2}}{dt} \quad (12)$$

A partir de esta ecuación (12) y de la Fig.22 b), se determina el valor óptimo del inductor L_2 como función de la tensión de la batería, el ciclo de trabajo, el rizo de corriente y la frecuencia de conmutación, según la ecuación (13):

$$L_2 = \frac{V_{Batt} \cdot D}{\Delta i_{L_2} \cdot f_s} \quad (13)$$

El dimensionamiento del condensador se realiza de forma análoga, partiendo del análisis de la corriente que lo atraviesa, de esta manera se deduce la capacitancia necesaria, que depende de la tensión de salida, el ciclo de trabajo, el rizo de voltaje (como porcentaje de la tensión de salida), la resistencia de carga y la frecuencia de conmutación, como se presenta en la ecuación (14):

$$C_1 = \frac{V_{Load} \cdot D}{R_{Load} \cdot \Delta V_{C_1} \cdot f_s} \quad (14)$$

La corriente promedio que circula por el transistor Q_3 equivale a la corriente de entrada del convertidor, y su relación con el ciclo de trabajo se expresa en la ecuación (15).

$$I_{Q_3} = I_{Load} \cdot D \quad (15)$$

Finalmente, la corriente promedio que fluye a través del diodo D_3 está relacionada con la corriente de salida, tal como se describe en la ecuación (16).

$$I_{D_3} = I_{Load} (1-D) \quad (16)$$

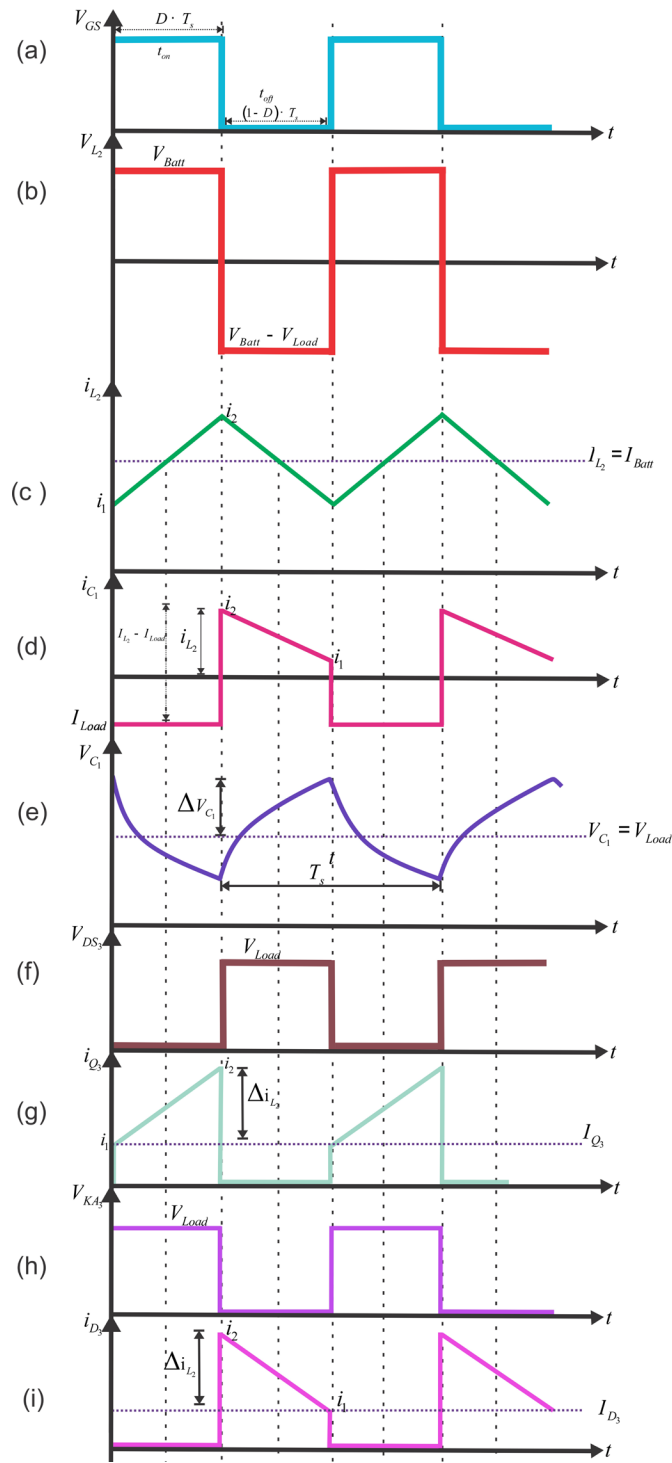


Fig.22 Formas de onda del convertidor Boost Batería a Carga

a) Disparo del transistor, b) Tensión en el inductor, c) Corriente en el inductor, d) Corriente en el condensador, e) Tensión en el condensador, f) Tensión en el transistor, g) Corriente de transistor, h) Tensión en el diodo, i) Corriente en el diodo.

4.4 Modo PV a Batería

En ausencia de carga, la energía del sistema fotovoltaico se dirige al almacenamiento, funcionando como convertidor Buck. La Fig.23 representa esta configuración, el transistor Q_2 controla el flujo de energía, mientras que los transistores Q_1 y Q_3 permanecen desactivados y los componentes principales involucrados son el diodo D_2 , el inductor L_2 , el condensador C_2 y la batería (B_{att}).

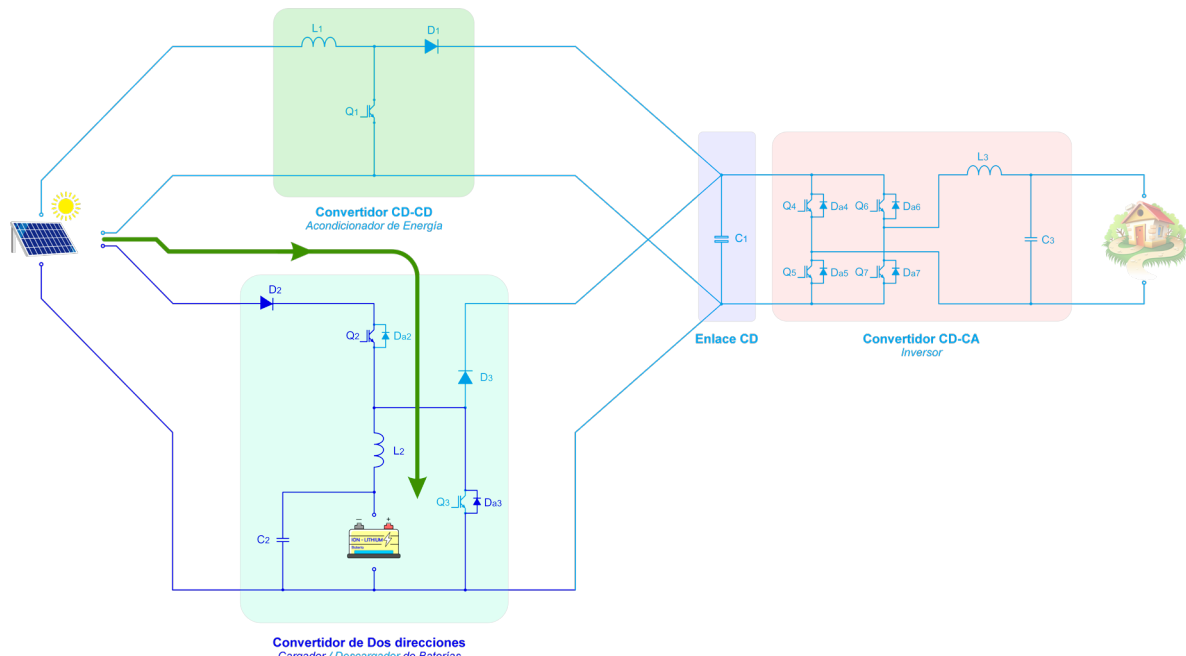


Fig.23 Circuito equivalente del esquema fotovoltaico autónomo integrado en modo PV a Batería.

4.4.1 Análisis eléctrico en CD

En esta configuración, el transistor Q_2 controla el flujo de energía, provocando que únicamente el inductor L_2 y el condensador C_2 mantengan un trayecto hacia la carga.

El proceso de conversión de energía se realiza mediante dos estados de conmutación es decir cuando el transistor Q_2 se encuentra en conducción, permitiendo que la corriente fluya desde el PV hacia el inductor L_2 . Simultáneamente, el diodo D_2 también conduce, facilitando la transferencia de energía hacia el condensador C_2 y la batería, este primer estado se encuentra, representado en la Fig.24, esto mismo permite una carga controlada del sistema de almacenamiento.

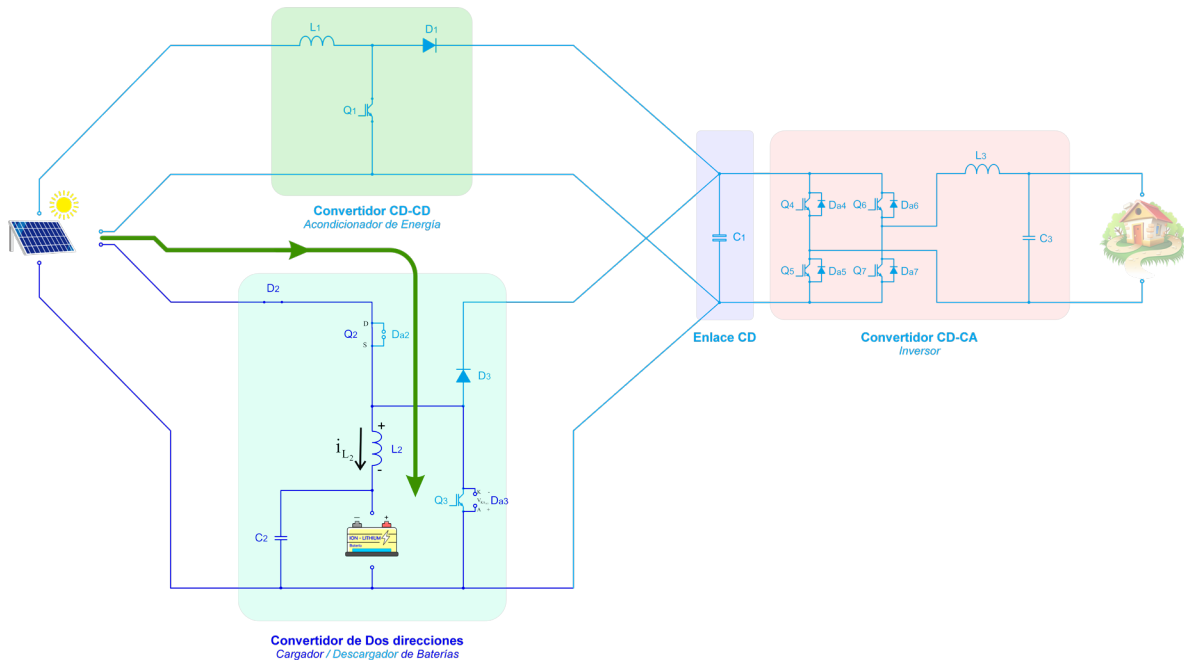


Fig.24 Circuito equivalente en tiempo de conducción en modo PV a Batería.

El segundo estado al desactivarse Q_2 , el diodo D_2 entra en conducción, cerrando el circuito a través de L_2 y C_2 . De esta forma, la energía almacenada en el inductor continúa suministrándose a la batería, asegurando un flujo de corriente continuo tal como se muestra en la Fig.25.

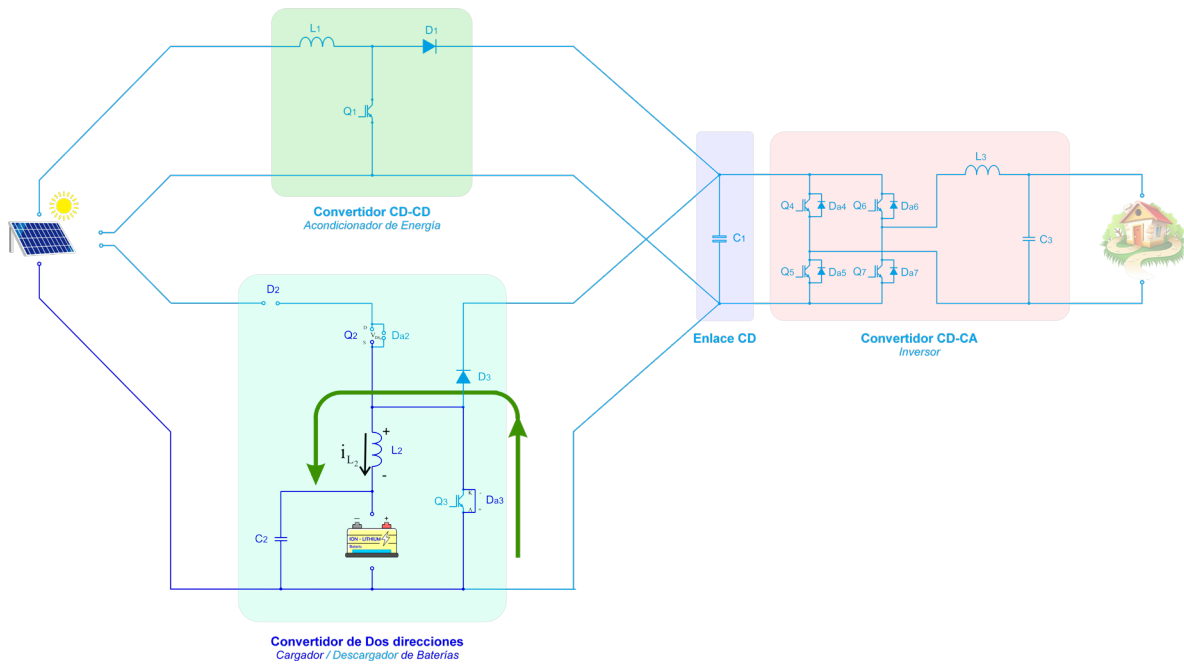


Fig.25 Circuito equivalente en tiempo de bloqueo en modo PV a Batería.

Esta estrategia de control permite realizar una carga eficiente y regulada de la batería a partir de la fuente PV, optimizando la utilización de la energía generada aun en ausencia de carga activa. A partir de los circuitos equivalentes presentados en la Fig.24 y Fig.25, se derivan las formas de onda características de los componentes, como se muestra en la Fig.26.

A partir de las formas de onda se identifican los intervalos de conducción y apagados asociados al inductor L_2 . Suponiendo régimen permanente, donde la tensión promedio en el inductor durante un ciclo de conmutación es nulo (condición de balance de energía), se establece la siguiente ecuación (17):

$$(D \cdot T_s)(V_{Batt} - V_{Load}) = (1-D)(V_{Batt})(T_s) \quad (17)$$

Aplicando la ecuación (17), se obtiene la relación de ganancia en corriente directa del convertidor en función del ciclo de trabajo, expresada en la ecuación (18).

$$M = D = \frac{V_{Batt}}{V_{PV}} \quad (18)$$

Asimismo, considerando la tensión en el inductor L_2 durante el intervalo de conducción, se determina el valor del inductor en función de los parámetros del sistema: tensiones de entrada y salida, ciclo de trabajo, rizo de corriente permitido y frecuencia de conmutación. Esta relación se detalla en la ecuación (19).

$$L_2 = \frac{(V_{PV} - V_{Batt}) \cdot D}{\Delta i_{L_2} \cdot f_s} \quad (19)$$

Para el dimensionamiento del condensador C_2 , se emplea un procedimiento análogo, utilizando un criterio de rizo de voltaje, el cual se expresa como un porcentaje de la tensión promedio en el condensador, ecuación (20).

$$C_2 = \frac{\Delta i_{L_2}}{8 \cdot \Delta V_{C_2} \cdot f_s} \quad (20)$$

La corriente promedio que circula por el transistor Q_2 corresponde a la corriente de entrada del convertidor, cuya relación con el ciclo de trabajo se expresa mediante la siguiente ecuación (21):

$$I_{Q_2} = I_{Load} \cdot D \quad (21)$$

Finalmente, la corriente promedio a través del diodo D_{A3} está directamente relacionada con la corriente de salida del convertidor, tal como se define en la ecuación (22):

$$I_{D_{A3}} = I_{Load} (1 - D) \quad (22)$$

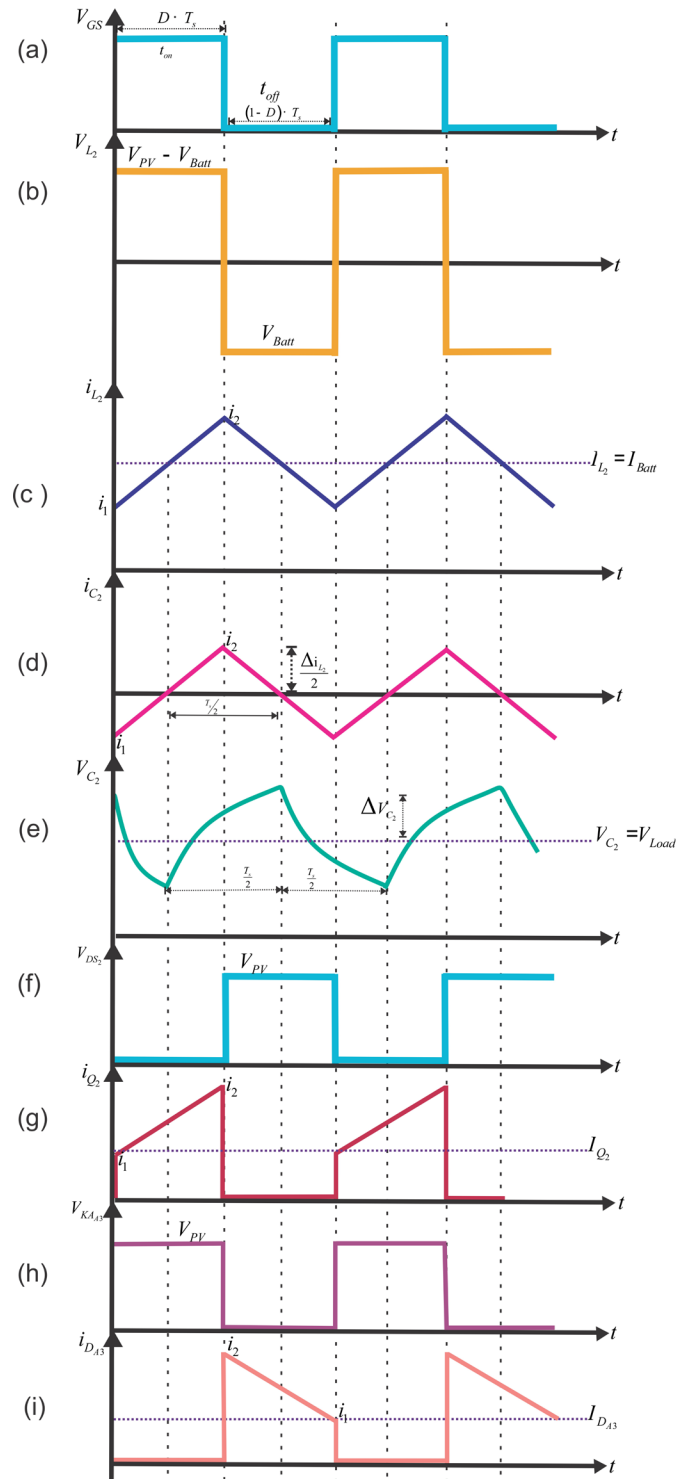


Fig.26 Formas de onda del convertidor Boost PV a Batería.

a) Disparo del i transistor, b) Tensión en el inductor, c) Corriente en el inductor, d) Corriente en el condensador, e) Tensión en el condensador, f) Tensión en el transistor, g) Corriente de transistor, h) Tensión en el diodo, i) Corriente en el diodo.

4.5 Modo PV a Batería y Carga

El modo de transmisión de energía desde el sistema fotovoltaico a la carga y la batería se activa cuando la energía generada por el sistema fotovoltaico excede la demanda de la carga. Durante este escenario como se ilustra en la Fig.27, el sistema fotovoltaico suministra energía simultáneamente a la batería y la carga, optimizando el aprovechamiento de la generación, así mismo opera con una combinación de dos topologías de conversión, una topología tipo Boost para la transferencia de energía hacia la carga y tipo Buck hacia la batería. Los elementos clave en esta configuración incluyen dos inductores (L_1 , L_2), dos condensadores (C_1 , C_2), dos diodos (D_1 , D_{A3}), dos transistores (Q_1 , Q_2), la PV, la resistencia de carga (R_{Load}) y una batería.

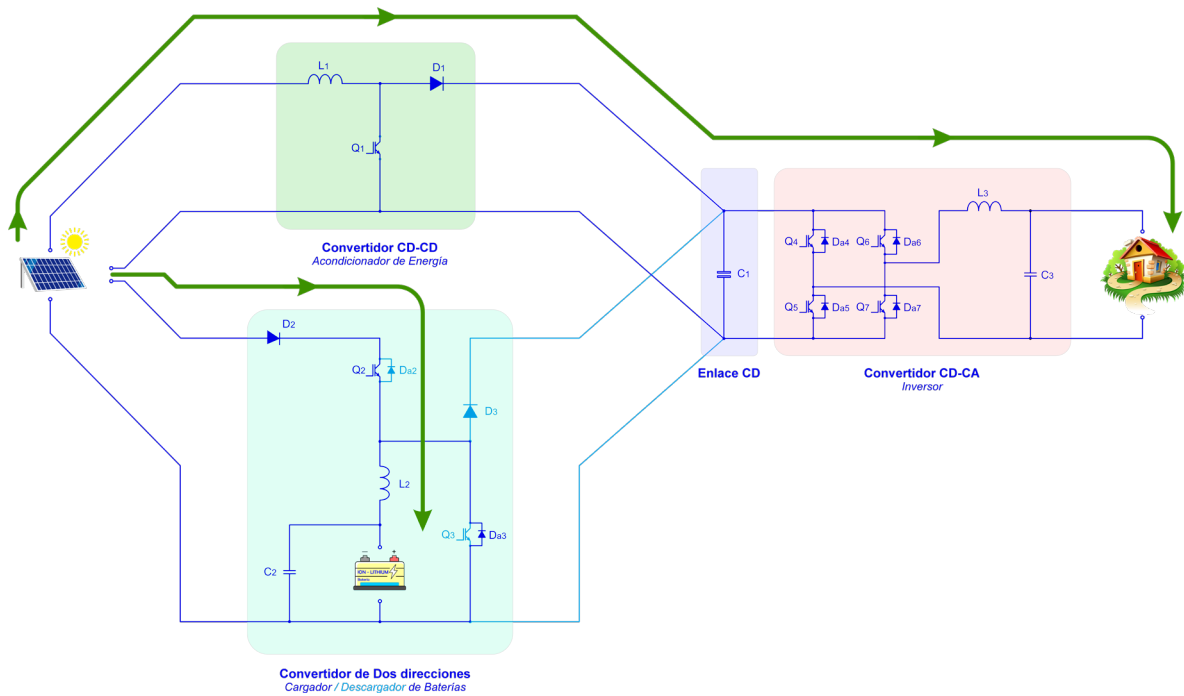


Fig.27 Circuito equivalente del esquema fotovoltaico autónomo integrado en modo PV a Batería y Carga.

4.5.1 Análisis eléctrico en CD

Durante el estado de conmutación, los transistores Q_1 y Q_2 están activados, lo que permite que la energía generada por el PV se distribuya simultáneamente a la carga y a la batería. El convertidor Boost (Q_1 , D_1 , L_1 , y C_1) suministra energía a la carga, mientras que el convertidor Buck (Q_2 , D_2 , L_2 , y C_2) dirige el exceso de energía hacia la batería, en este estado, el diodo D_1 permanece apagado, evitando la interferencia entre los dos circuitos de conversión. Este comportamiento se ilustra en la Fig.28.

Esta configuración asegura una distribución eficiente de la energía, maximizando el aprovechamiento del sistema fotovoltaico al satisfacer simultáneamente la demanda de la carga y la necesidad de almacenamiento en la batería, mediante los circuitos equivalentes presentados en la Fig.28 y Fig.29, se derivan las formas de onda características de los componentes, como se muestra en la Fig.30.

Dado que la energía solar permanece desconectada por la acción de los transistores Q_1 y Q_2 , el análisis se centra en los elementos C_1 y L_1 . Por otro lado, a partir de la Fig.30 se determina la ganancia en corriente directa, cuya expresión se obtiene aplicando el balance de energía en el inductor, resultando en la ecuación (23):

$$(D \cdot T_s)(V_{Batt}) = (1-D)(V_{Batt} - V_{Load})(T_s) \quad (23)$$

Mediante la aplicación de la condición de balance volt-segundo sobre el inductor L_2 , se deriva la ecuación de ganancia en función del ciclo de trabajo, mostrada en la ecuación (24):

$$M = \frac{1}{1-D} \quad (24)$$

Dado que la tensión en un inductor es proporcional a la variación de la corriente, se establece la relación tensión-corriente en la ecuación (25).

$$V_{L_1} = L_1 \cdot \frac{di_{L_1}}{dt} \quad (25)$$

A partir de esta ecuación (25) y de la Fig.30.b, se determina el valor óptimo del inductor L_1 como función de la tensión de la batería, el ciclo de trabajo, el rizo de corriente y la frecuencia de conmutación, según la ecuación (26)

$$L_1 = \frac{V_{PV} \cdot D}{\Delta i_{L_1} \cdot f_s} \quad (26)$$

El dimensionamiento del condensador se realiza de forma análoga, partiendo del análisis de la corriente que lo atraviesa, de esta manera se deduce la capacitancia necesaria, que depende de la tensión de salida, el ciclo de trabajo, el rizo de voltaje (como porcentaje de la tensión de salida), la resistencia de carga y la frecuencia de conmutación, como se presenta en la ecuación (27)

$$C_1 = \frac{V_{Load} \cdot D}{R_{Load} \cdot \Delta V_{C_1} \cdot f_s} \quad (27)$$

La corriente promedio que circula por el transistor Q_1 equivale a la corriente de entrada del convertidor, y su relación con el ciclo de trabajo se expresa en la ecuación (28).

$$I_{Q_1} = I_{Load} \cdot D \quad (28)$$

Finalmente, la corriente promedio que fluye a través del diodo D_1 está relacionada con la corriente de salida, tal como se describe en la ecuación (29).

$$I_{D_1} = I_{Load} (1-D) \quad (29)$$

Cuando entra en funcionamiento el convertidor Buck permite realizar una carga eficiente y regulada de la batería a partir de la fuente PV, optimizando la utilización de la energía generada aun en ausencia de carga activa, por lo tanto, se identifican los intervalos de

conducción y apagados asociados al inductor L_2 . Suponiendo régimen permanente, donde la tensión promedio en el inductor durante un ciclo de conmutación es nulo, se establece la siguiente ecuación (30):

$$(D \cdot T_s)(V_{Batt} - V_{Load}) = (1-D)(V_{Batt})(T_s) \quad (30)$$

Aplicando la ecuación (30) se obtiene la relación de ganancia en corriente directa del convertidor en función del ciclo de trabajo, expresada en la ecuación (31).

$$M = D = \frac{V_{Batt}}{V_{PV}} \quad (31)$$

Asimismo, considerando la tensión en el inductor L_2 durante el intervalo de conducción, se determina el valor del inductor en función de los parámetros del sistema: tensiones de entrada y salida, ciclo de trabajo, rizo de corriente permitido y frecuencia de conmutación. Esta relación se detalla en la ecuación (32).

$$L_2 = \frac{(V_{PV} - V_{Batt}) \cdot D}{\Delta i_{L_2} \cdot f_s} \quad (32)$$

Para el dimensionamiento del condensador C_2 , se emplea un procedimiento análogo, utilizando un criterio de rizo de voltaje, el cual se expresa como un porcentaje de la tensión promedio en el condensador, ecuación (33).

$$C_2 = \frac{\Delta i_{L_2}}{8 \cdot \Delta V_{C_2} \cdot f_s} \quad (33)$$

La corriente promedio que circula por el transistor Q_2 corresponde a la corriente de entrada del convertidor, cuya relación con el ciclo de trabajo se expresa mediante la siguiente ecuación (34):

$$I_{Q_2} = I_{Load} \cdot D \quad (34)$$

Finalmente, la corriente promedio a través del diodo D_{A3} está directamente relacionada con la corriente de salida del convertidor, tal como se define en la ecuación (35):

$$I_{D_{A3}} = I_{Load} (1-D) \quad (35)$$

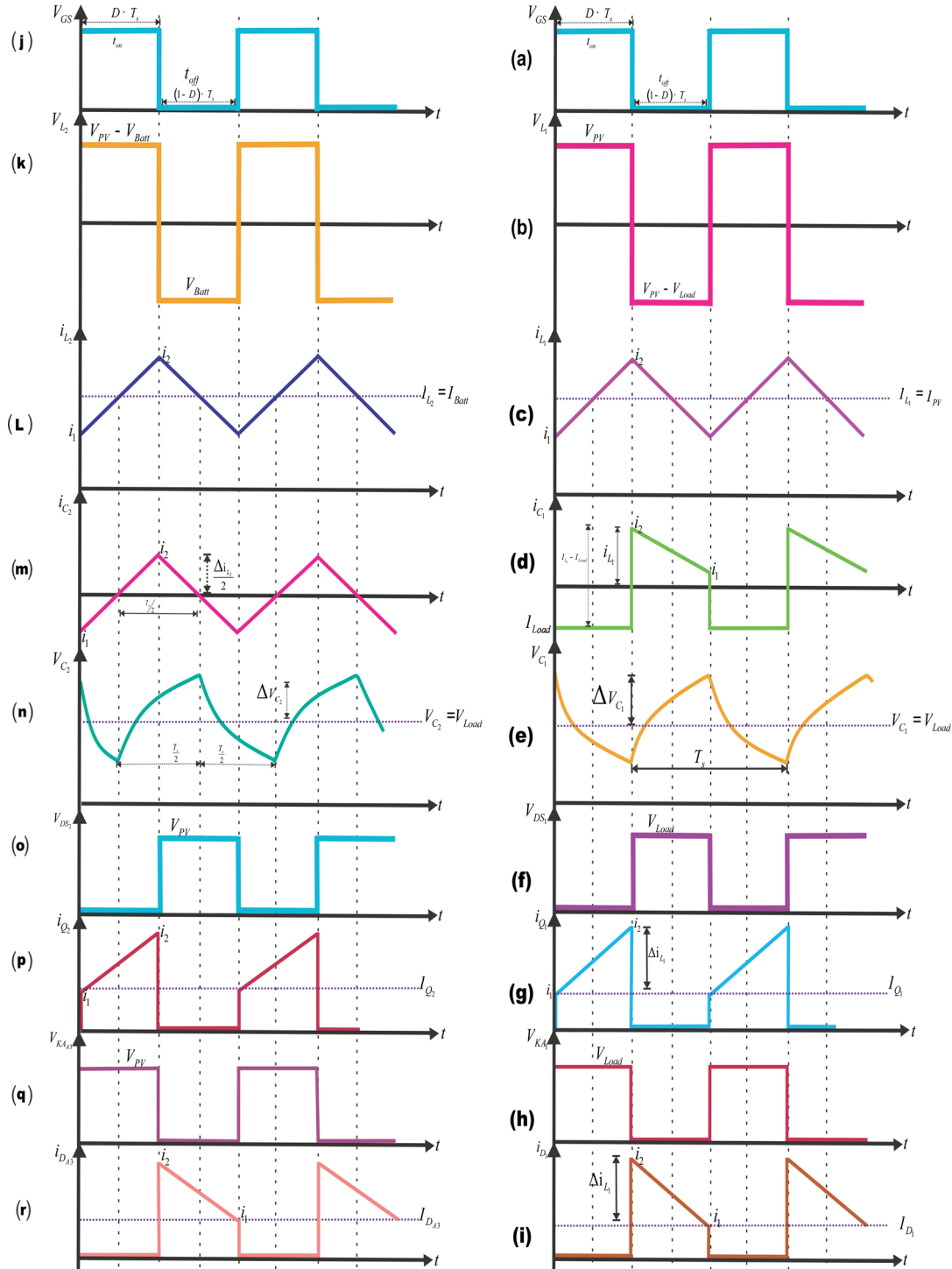


Fig.30 Formas de onda del convertidor Boost y Buck en modo PV a Batería y Carga

a) Disparo del transistor Q_1 , b) Tensión en el inductor 1, c) Corriente en el inductor 1, d) Corriente en el condensador 1, e) Tensión en el condensador 1, f) Tensión en el transistor Q_1 , g) Corriente de transistor Q_1 , h) Tensión en el diodo D_1 , i) Corriente en el diodo D_1 , j) Disparo del transistor Q_2 , k) Tensión en el inductor 2, l) Corriente en el inductor 2, m) Corriente en el condensador 2, n) Tensión en el condensador 2, o) Tensión en el transistor Q_2 , p) Corriente de transistor Q_2 , q) Tensión en el diodo D_{A3} , r) Corriente en el diodo D_{A3} .

4.6 Modo PV y Batería a Carga

Cuando la generación del PV es insuficiente, el suministro se realiza de forma conjunta entre el sistema fotovoltaico y la batería, asegurando la continuidad del servicio hacia la carga. En este escenario se ilustra en la Fig.31, este modo contempla el funcionamiento simultáneo de dos convertidores tipo Boost, los componentes primordiales de composición son dos inductores (L_1 , L_2), dos condensadores (C_1 , C_2), dos diodos (D_1 , D_3), dos transistores (Q_1 , Q_3), una fuente (PV), una resistencia de carga (R_{Load}) representada con una casa habitación y una batería (B_{att}).

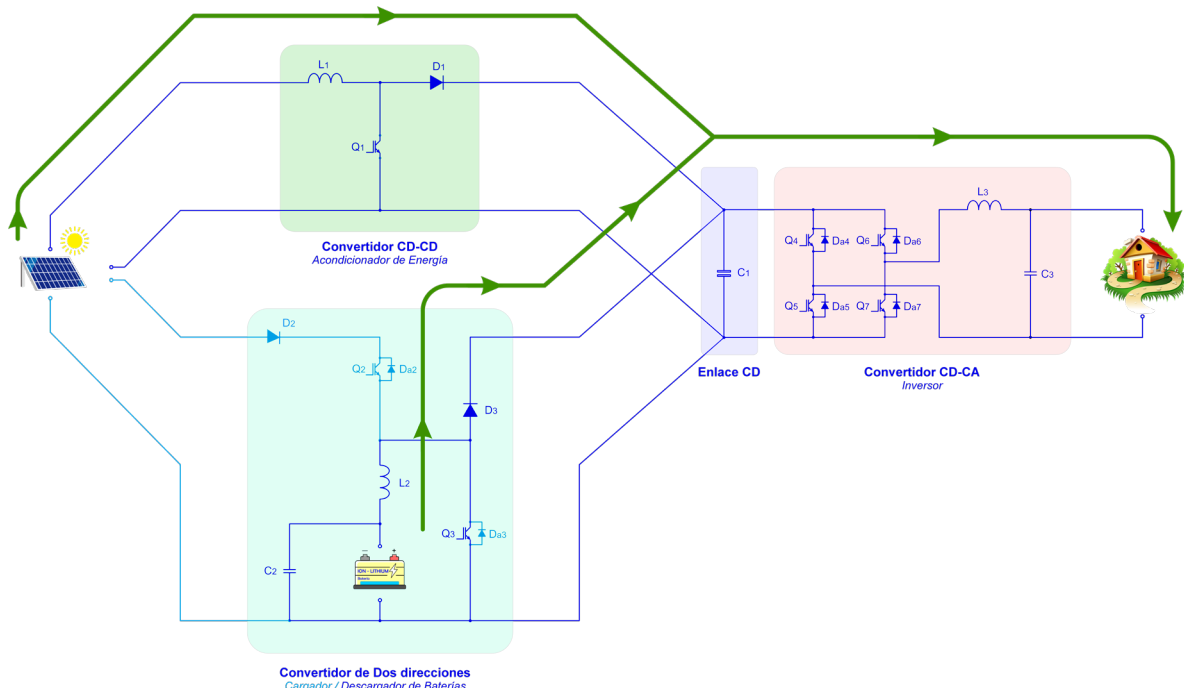


Fig.31 Circuito equivalente del esquema fotovoltaico autónomo integrado en modo PV y Batería a Carga.

4.6.1 Análisis eléctrico en CD

La configuración de panel solar y batería hacia carga los transistores Q_1 y Q_3 asumen el control del flujo energético, mientras que Q_2 permanece desactivado en todo momento. El modo de operación se describe mediante dos estados de conmutación, cuando Q_1 y Q_3 se encuentran en condición de conducción, esta configuración permite que la energía generada por el sistema fotovoltaico fluya hacia el inductor L_1 , iniciando su proceso de carga. Simultáneamente, la energía almacenada en la batería se transfiere al inductor L_2 , cabe destacar que los diodos D_1 y D_3 permanecen desactivados, impidiendo el flujo, este estado se ilustra en la Fig.32.

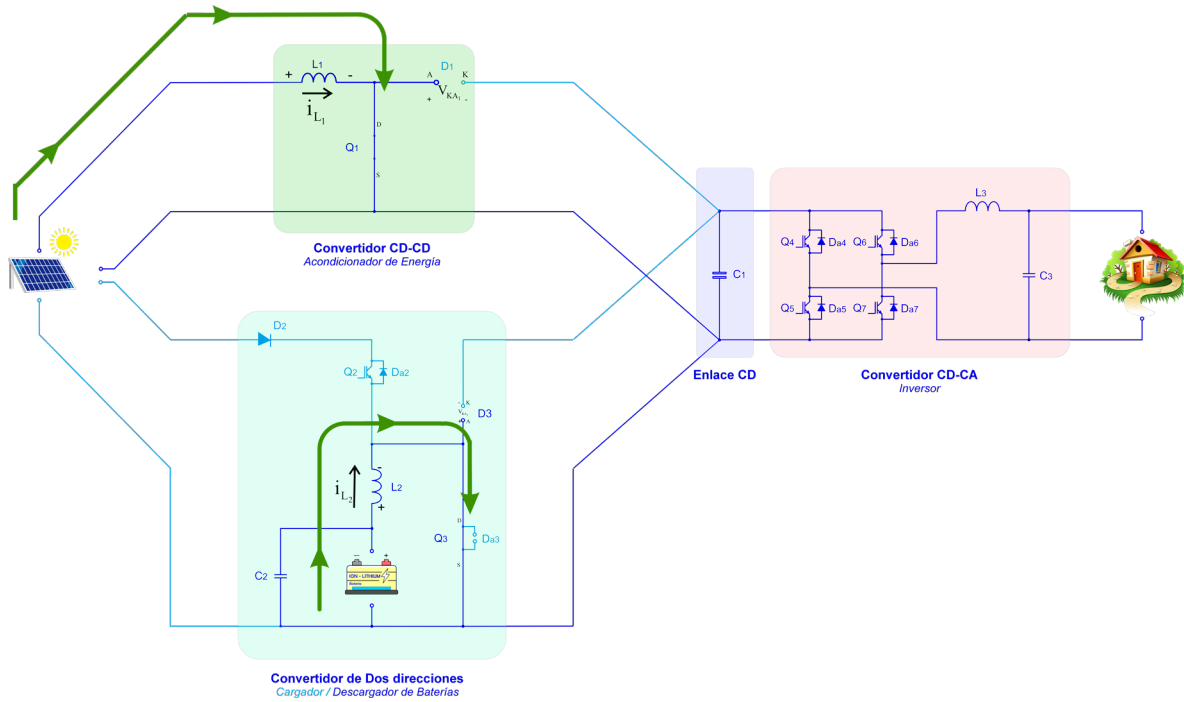


Fig.32 Circuito equivalente en tiempo de conducción en modo PV y Batería a Carga.

En el segundo estado Q_1 y Q_3 están apagados, mientras que diodo D_1 se encuentra activo, permitiendo que la energía generada por el PV fluya hacia la carga. Al mismo tiempo, el diodo D_3 permanece activo, asegurando que la batería suministre energía para completar la demanda de la carga, este comportamiento se muestra en la Fig.33.

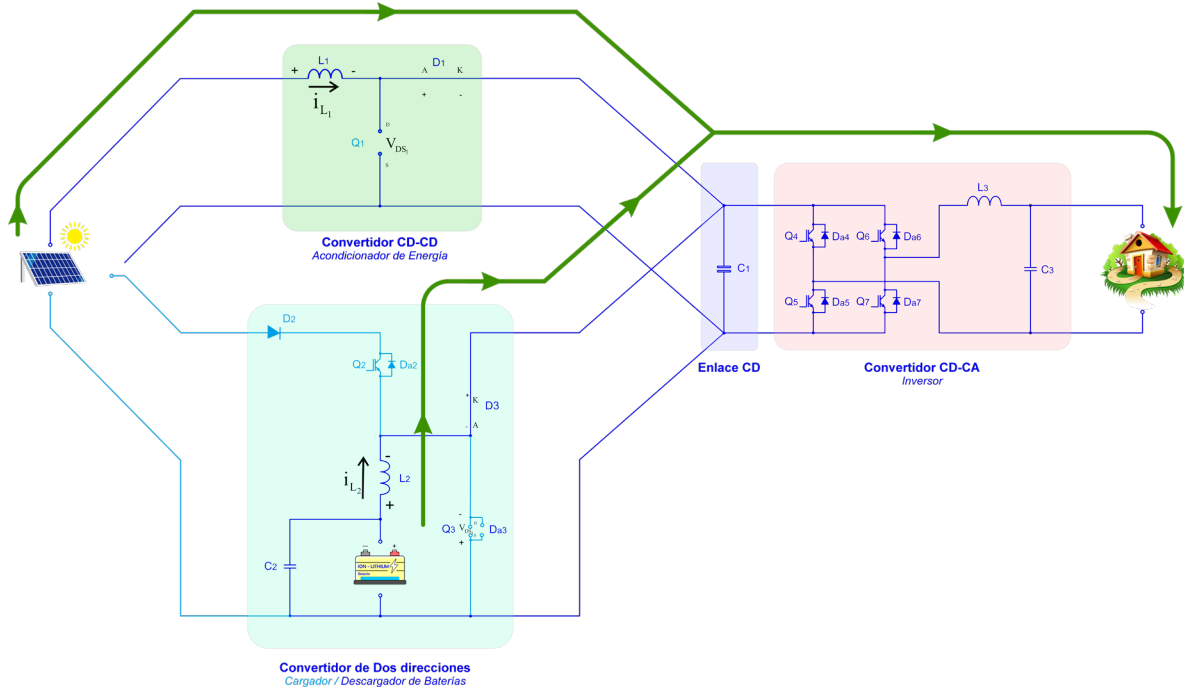


Fig.33 Circuito equivalente en tiempo de bloqueo en modo PV y Batería a Carga.

Esta configuración asegura que, incluso en condiciones de baja generación fotovoltaica, la carga reciba un suministro energético continuo y estable al combinar eficientemente las fuentes de energía disponibles, utilizando dos convertidores los cuales mediante los circuitos equivalentes se derivan las formas de onda características de los componentes, como se muestra en la Fig. 34.

El primer convertidor Boost encargado de suministrar energía del panel solar hacia la carga, sus formas de onda correspondientes se muestran la Fig. 34 (a-i), con base a sus formas se obtiene la ganancia en corriente directa, aplicando el balance de energía en el inductor, se deduce la siguiente ecuación (36).

$$(D \cdot T_s)(V_{Batt}) = (1-D)(V_{Batt} - V_{Load})(T_s) \quad (36)$$

Mediante la aplicación de la condición de balance volt-segundo sobre el inductor L_1 , se deriva la ecuación de ganancia en función del ciclo de trabajo, mostrada en la ecuación (37).

$$M = \frac{1}{1-D} \quad (37)$$

Dado que la tensión en un inductor es proporcional a la variación de la corriente, se establece la relación tensión-corriente en la ecuación:

$$V_{L_1} = L_1 \cdot \frac{di_{L_1}}{dt} \quad (38)$$

A partir de esta ecuación (38) y de la Fig. 34.b, se determina el valor óptimo del inductor L_1 como función de la tensión de la batería, el ciclo de trabajo, el rizo de corriente y la frecuencia de conmutación, según la ecuación

$$L_1 = \frac{V_{PV} \cdot D}{\Delta i_{L_1} \cdot f_s} \quad (39)$$

El dimensionamiento del condensador se realiza de forma análoga, partiendo del análisis de la corriente que lo atraviesa, de esta manera se deduce la capacitancia necesaria, que depende de la tensión de salida, el ciclo de trabajo, el rizo de voltaje (como porcentaje de la tensión de salida), la resistencia de carga y la frecuencia de conmutación, como se presenta en la ecuación (40).

$$C_1 = \frac{V_{Load} \cdot D}{R_{Load} \cdot \Delta V_{C_1} \cdot f_s} \quad (40)$$

La corriente promedio que circula por el transistor Q_1 equivale a la corriente de entrada del convertidor, y su relación con el ciclo de trabajo se expresa:

$$I_{Q_1} = I_{Load} \cdot D \quad (41)$$

Finalmente, la corriente promedio que fluye a través del diodo D_1 está relacionada con la corriente de salida, tal como se describe en la ecuación (42).

$$I_{D_1} = I_{Load} (1-D) \quad (42)$$

El segundo convertidor Boost se analiza dado que la energía solar permanece desconectada por la acción de los transistores Q_1 y Q_2 , el análisis se centra en los elementos C_1 y C_2 . Por otro lado, a partir de la Fig. 34 (j-r), se determina la ganancia en corriente directa, cuya expresión se obtiene aplicando el balance de energía en el inductor, resultando en la ecuación (43).

$$(D \cdot T_s)(V_{Batt}) = (1-D)(V_{Batt} - V_{Load})(T_s) \quad (43)$$

Mediante la aplicación de la condición de balance volt-segundo sobre el inductor L_2 , se deriva la ecuación de ganancia en función del ciclo de trabajo, mostrada en la ecuación (44):

$$M = \frac{1}{1-D} \quad (44)$$

Dado que la tensión en un inductor es proporcional a la variación de la corriente, se establece la relación tensión-corriente en la ecuación:

$$V_{L_2} = L_2 \cdot \frac{di_{L_2}}{dt} \quad (45)$$

A partir de esta ecuación (45) y de la Fig. 34.k), se determina el valor óptimo del inductor L_2 como función de la tensión de la batería, el ciclo de trabajo, el rizo de corriente y la frecuencia de conmutación, según la ecuación (46):

$$L_2 = \frac{V_{Batt} \cdot D}{\Delta i_{L_2} \cdot f_s} \quad (46)$$

El dimensionamiento del condensador se realiza de forma análoga, partiendo del análisis de la corriente que lo atraviesa, de esta manera se deduce la capacitancia necesaria, que depende de la tensión de salida, el ciclo de trabajo, el rizo de voltaje, la resistencia de carga y la frecuencia de conmutación, debido que es uno de los elementos que se comparten en el circuito como son diodo, tres expresan con las ecuaciones:

$$C_1 = \frac{V_{Load} \cdot D}{R_{Load} \cdot \Delta V_{C_1} \cdot f_s} \quad (47)$$

La corriente promedio que circula por el transistor Q_3 equivale a la corriente de entrada del convertidor, y su relación con el ciclo de trabajo se expresa en la ecuación (48).

$$I_{Q_3} = I_{Load} \cdot D \quad (48)$$

Finalmente, la corriente promedio que fluye a través del diodo D_3 está relacionada con la corriente de salida, tal como se describe en la ecuación.

$$I_{D_3} = I_{Load} (1-D) \quad (49)$$

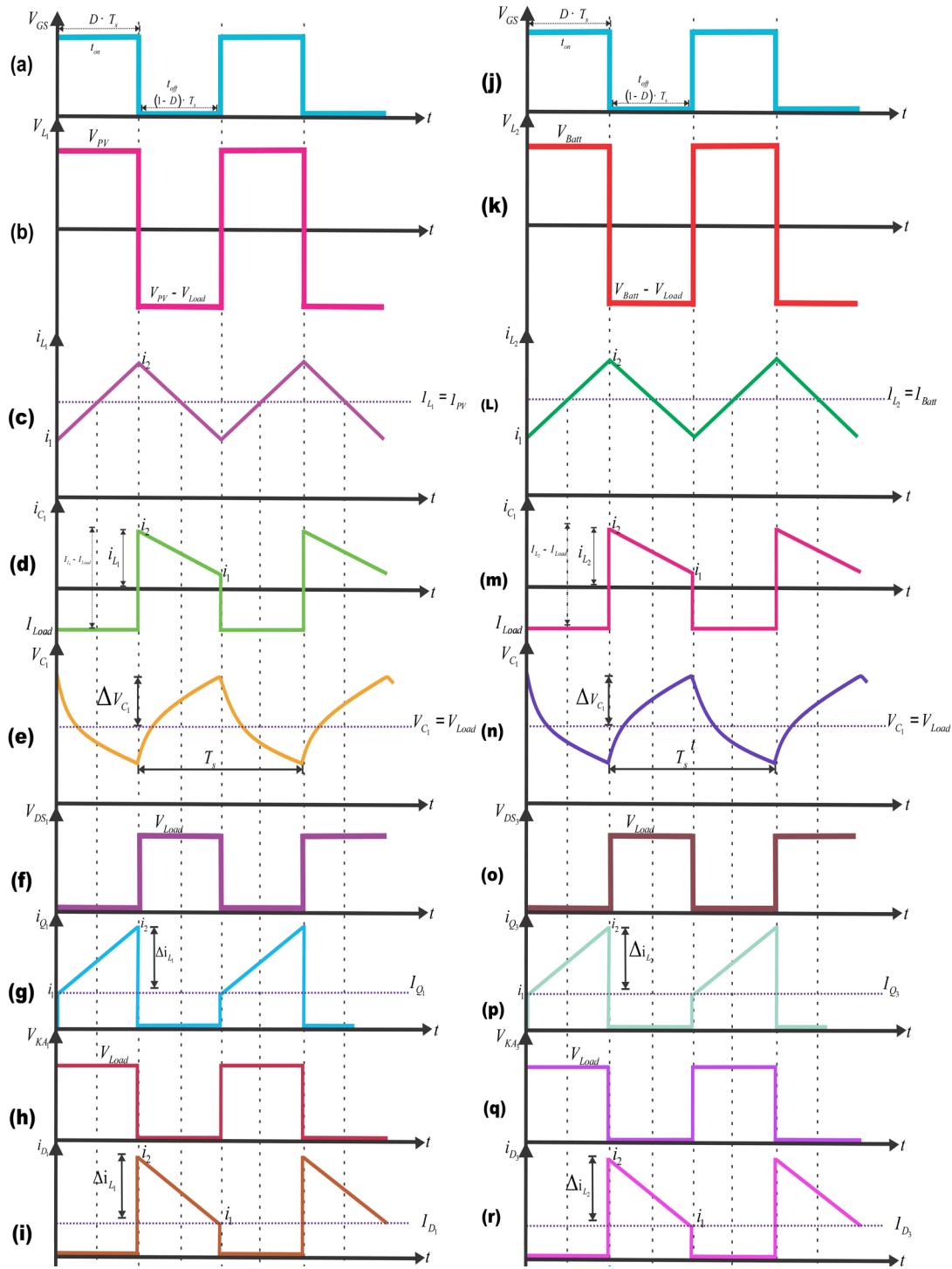


Fig. 34 Formas de onda de los convertidores Boost de PV a Batería y Carga.

a) Disparo del transistor Q_1 , b) Tensión en el inductor 1, c) Corriente en el inductor 1, d) Corriente en el condensador 1, e) Tensión en el condensador 1, f) Tensión en el transistor Q_1 , g) Corriente de transistor Q_1 , h) Tensión en el diodo D_1 , i) Corriente en el diodo D_1 , j) Disparo del transistor, k) Tensión en el inductor 2, l) Corriente en el inductor 2, m) Corriente en el condensador 1, n) Tensión en el condensador 1, o) Tensión en el transistor Q_3 , p) Corriente de transistor Q_3 , q) Tensión en el diodo D_3 , r) Corriente en el diodo D_3 .

4.7 Síntesis analítica y operacional del convertidor bidireccional

Tabla.2 Ecuaciones del análisis de circuitos para los modos de operación del convertidor bidireccional en esquema paralelo.

Modo de operación	PV a Carga	Batería a Carga	PV a Batería	PV a Carga y Batería		PV y Batería a Carga	
Señal de control	Q1	Q3	Q2	Q1, Q2		Q1, Q3	
Convertidor CD-CD	Boost	Boost	Buck	Boost	Buck	Boost	Boost
Ciclo de trabajo	$D = -\frac{V_{PV}}{V_{Load}} + 1$	$D = -\frac{V_{Batt}}{V_{Load}} + 1$	$D = \frac{V_{Batt}}{V_{PV}}$	$D = -\frac{V_{PV}}{V_{Load}} + 1$	$D = \frac{V_{Batt}}{V_{PV}}$	$D = -\frac{V_{PV}}{V_{Load}} + 1$	$D = -\frac{V_{Batt}}{V_{Load}} + 1$
Ganancia en CD	$M = \frac{1}{1-D}$	$M = \frac{1}{1-D}$	$M = D$	$M = \frac{1}{1-D}$	$M = D$	$M = \frac{1}{1-D}$	$M = \frac{1}{1-D}$
Inductor [H]	$L_1 = \frac{V_{PV} \cdot D}{\Delta i_{L1} \cdot f_s}$	$L_2 = \frac{V_{Batt} \cdot D}{\Delta i_{L2} \cdot f_s}$	$L_2 = \frac{(V_{PV} - V_{Batt}) \cdot D}{\Delta i_{L2} \cdot f_s}$	$L_1 = \frac{V_{PV} \cdot D}{\Delta i_{L1} \cdot f_s}$	$L_2 = \frac{(V_{PV} - V_{Batt}) \cdot D}{\Delta i_{L2} \cdot f_s}$	$L_1 = \frac{V_{PV} \cdot D}{\Delta i_{L1} \cdot f_s}$	$L_2 = \frac{V_{Batt} \cdot D}{\Delta i_{L2} \cdot f_s}$
Condensador [F]	$C_1 = \frac{V_{Load} \cdot D}{R_{Load} \cdot \Delta V_{C1} \cdot f_s}$	$C_1 = \frac{V_{Load} \cdot D}{R_{Load} \cdot \Delta V_{C1} \cdot f_s}$	$C_2 = \frac{\Delta i_{L2}}{8 \cdot \Delta V_{C2} \cdot f_s}$	$C_1 = \frac{V_{Load} \cdot D}{R_{Load} \cdot \Delta V_{C1} \cdot f_s}$	$C_2 = \frac{\Delta i_{L2}}{8 \cdot \Delta V_{C2} \cdot f_s}$	$C_1 = \frac{V_{Load} \cdot D}{R_{Load} \cdot \Delta V_{C1} \cdot f_s}$	$C_1 = \frac{V_{Load} \cdot D}{R_{Load} \cdot \Delta V_{C1} \cdot f_s}$
Corriente promedio en el transistor [A]	$I_{Q1} = I_{Load} \cdot D$	$I_{Q3} = I_{Load} \cdot D$	$I_{Q2} = I_{Batt} \cdot D$	$I_{Q1} = I_{Load} \cdot D$	$I_{Q2} = I_{Batt} \cdot D$	$I_{Q1} = I_{Load} \cdot D$	$I_{Q3} = I_{Load} \cdot D$
Tensión máxima del transistor [V]	$V_{DS1} = V_{Load}$	$V_{DS3} = V_{Load}$	$V_{DS2} = V_{PV}$	$V_{DS1} = V_{Load}$	$V_{DS2} = V_{PV}$	$V_{DS1} = V_{Load}$	$V_{DS3} = V_{Load}$
Corriente promedio en el diodo [A]	$I_{D1} = I_{Load} \cdot (1-D)$	$I_{D3} = I_{Load} \cdot (1-D)$	$I_{DA3} = I_{Batt} \cdot (1-D)$	$I_{D1} = I_{Load} \cdot (1-D)$	$I_{DA3} = I_{Batt} \cdot (1-D)$	$I_{D1} = I_{Load} \cdot (1-D)$	$I_{D3} = I_{Load} \cdot (1-D)$
Tensión máxima del diodo [V]	$V_{KA1} = V_{Load}$	$V_{KA3} = V_{Load}$	$V_{KA3} = V_{Batt} - V_{Load}$	$V_{KA1} = V_{Load}$	$V_{KA3} = V_{Batt} - V_{Load}$	$V_{KA1} = V_{Load}$	$V_{KA3} = V_{Load}$
Resistencia [Ω]	$R_{Load} = \frac{V_{Load}}{I_{Load}}$	$R_{Load} = \frac{V_{Load}}{I_{Load}}$	$R_{Batt} = \frac{V_{Batt}}{I_{Batt}}$	$R_{Load} = \frac{V_{Load}}{I_{Load}}$	$R_{Batt} = \frac{V_{Batt}}{I_{Batt}}$	$R_{Load} = \frac{V_{Load}}{I_{Load}}$	$R_{Load} = \frac{V_{Load}}{I_{Load}}$

Capítulo 5: Simulación y resultados

En este capítulo se presenta la evaluación integral, mediante simulación, del convertidor bidireccional en esquema paralelo, analizando su comportamiento bajo distintos modos y condiciones de operación. El capítulo se estructura en subsecciones que describen de forma ordenada cada etapa del proceso, desde el diseño del sistema hasta la comparación de arquitecturas de conversión energética.

La Sección 5.1 aborda el diseño del sistema a partir de la relación entre las tensiones de operación, incluyendo la selección de componentes y la consideración de pérdidas pasivas, así como la definición del panel fotovoltaico, la batería y la carga. En la Sección 5.2 se presenta el modelado y la emulación de paneles fotovoltaicos, evaluando un arreglo sometido a condiciones reales de irradiancia variable de la zona de Santa Fe, Ciudad de México, a partir de datos de la Red de Meteorología y Radiación Solar correspondientes a 25 días de los últimos cinco años. En la Sección 5.3 se describe el diseño y la evaluación del convertidor bidireccional en configuración paralela, considerando cinco modos de transferencia bajo escenarios de irradiancia constante y variable, incorporando las pérdidas del sistema y un análisis comparativo entre SIMetrix y PSpice. Finalmente, en la Sección 5.4 se compara el desempeño del sistema fotovoltaico tradicional y el esquema paralelo propuesto, evaluando la eficiencia global desde la captación solar hasta la entrega de potencia a la carga, identificando las ventajas operativas del convertidor bidireccional propuesto.

5.1 Parámetros y selección de componentes para la simulación

El proceso de diseño se basó en la relación establecida entre las tensiones del sistema, para garantizar el flujo adecuado de energía entre los subsistemas, donde la tensión de bus en corriente directa (V_{Bus}) debe ser mayor que la tensión del sistema fotovoltaico autónomo y ésta a su vez debe superar la tensión de la batería, de acuerdo con la siguiente relación:

$$V_{Bus} > V_{PV} > V_{Batt} \quad (50)$$

A partir de esta relación, se determinaron los parámetros eléctricos necesarios con el objetivo de evaluar el desempeño del convertidor bidireccional considerando los distintos modos de transmisión y control de potencia, bajo los escenarios de simulación.

En consecuencia, se seleccionó un sistema fotovoltaico, el sistema de almacenamiento y los parámetros de carga, incluyendo una tensión de salida en el bus CD de 200V y aproximadamente 500W. Basado en los datos de salida, se buscó un modelo de panel fotovoltaico capaz de suministrar aprox. 500W y una tensión menor a la salida, determinando el modelo RNG-100D-SS [67], con una tensión de operación de 17.9V y una corriente de 5.72A por modulo. Se propuso un arreglo en serie de cinco módulos solares, resultando una tensión total de 89.5V y una corriente constante de 5.72A. El sistema de almacenamiento se dimensionó bajo el supuesto donde la tensión de la batería debe ser inferior a la tensión del sistema fotovoltaico. Con base en la potencia de salida estimada del convertidor y un tiempo estimado de suministro de aproximadamente 13 horas hacia la carga, se obtiene una energía requerida de 6.655kWh, calculada mediante ecuación (51).

$$E_{req} = P_{out} \cdot t \quad (51)$$

Donde la energía requerida (E_{req}) es igual al producto de la potencia de salida (P_{out}) y el tiempo estimado (t) que la batería proporcionara energía. Posteriormente, a través de la ecuación (52), se determinó la capacidad necesaria de la batería, resultando en 92.43Ah. Considerando estos requerimientos y los criterios de diseño adoptados, se seleccionó una batería LiFePO4 [68] con una tensión nominal de 72V y una capacidad de 104Ah, la cual garantiza el suministro energético previsto por la carga.

$$C_{Ah} = \frac{E_{req}}{V_{Batt}} \quad (52)$$

Donde la capacidad de la batería (C_{Ah}) expresada en Amperes-Hora, es igual a la división entre la energía requerida (E_{req}) entre la tensión de la batería (V_{Batt}). Con la selección de los elementos del sistema fotovoltaico y el almacenamiento, se definieron parámetros de diseño del convertidor para sus distintos modos tales como una frecuencia de conmutación de 50kHz, un rizo de corriente en el inductor de 15% y un rizo de voltaje en el condensador de 5%.

Con base en las ecuaciones presentadas en la Sección 4.7, se determinaron las equivalencias de los elementos del circuito para ambos escenarios de operación, mismas que se recopilan en las Tabla.22 y Tabla.23 del Anexo A. Posteriormente, considerando los valores requeridos de inductancia, capacitancia, tensión máxima y corriente promedio, se seleccionaron los modelos comerciales de condensadores, inductores y transistores cuyas características eléctricas resultaron equivalentes o lo más cercanas a los valores calculados.

Es importante mencionar que, en dichas tablas, se realizaron ajustes a los valores de inductancia y capacitancia con respecto a los valores originalmente obtenidos, con el fin de adecuarlos a los modelos comerciales disponibles para cada uno de los escenarios. Finalmente, en la Tabla.3 se integran los modelos comerciales seleccionados, así como los parámetros eléctricos de la batería, el panel fotovoltaico, el diodo y los parámetros de diseño empleados en el análisis.

Tabla.3 Especificaciones eléctricas de los elementos considerados en el diseño del convertidor bidireccional en esquema paralelo.

Elemento	Modelo	Tensión de operación	Valor	Resistencia interna [mΩ]	Referencia
Condensador	B32656A3335	250 V	3300 nF	5.9	[69]
	B32653A3105		1000 nF	6.5	
Elemento	Modelo	Tensión de operación	Valor	Resistencia interna [mΩ]	Referencia
Inductor	MSS1210H-125KED	400 V	1200 μH	830	[70]
	MSS1210H-105KED		1000 μH	630	
Elemento	Modelo	Tensión de operación	Corriente máxima	Resistencia interna [mΩ]	Referencia
Transistor	IRFB4137	300 V	38 A	56	[71]
Elemento	Modelo	Corriente directa (I _F)	Tensión máxima inversa (V _{RRM})	Tiempo de recuperación inversa (t _{rr})	Referencia
Diodo	MUR840	8 A	400 V	50 ns	[72]
Parámetros de diseño					
Frecuencia	Porcentaje de rizo de voltaje en el condensador			Porcentaje de rizo de corriente en el inductor	
50 kHz	5%			15%	
Características eléctricas del panel solar					
	Modelo			RGN-100D-SS	
	Marca			REGONY	
	Tipo de celda solar			Monocristalina	
	Potencia máxima			100 W	
	Voltaje óptimo de operación			17.9 V	
	Corriente optima de operación			5.72 A	
	Temperatura de operación			−40° ± −80°C	
Características eléctricas de la batería					
	Modelo			LiFeP04	
	Marca			BSLBATT	
	Tipo de batería			De iones de Litio	
	Capacidad nominal			104 Ah	
	Voltaje nominal			72 V	
	Energía máxima			7897 Wh	
	Rango de temperatura de operación			−20° – 60° C	

5.2 Modelado y simulación del sistema fotovoltaico en PSIM

5.2.1 Adquisición y preparación de datos de entrada

Con el propósito de observar el comportamiento de un sistema fotovoltaico ante condiciones de irradiancia en el software PSIM, se utilizó la base de datos de la Red de Meteorología y Radiación Solar (REDMET) [73] encargada de registrar de forma continua los niveles de irradiancia en múltiples ubicaciones de la Ciudad de México y Estado de México desde el año 2004. Para este estudio, se seleccionaron los datos correspondientes a la estación de monitoreo ubicada en Santa Fe, aplicando dos filtros específicos: el primer filtro consistió en la selección de un periodo de análisis comprendido entre 2020 y 2024, considerando el incremento en los niveles de irradiancia durante los últimos años [74]-[78]. El segundo filtro se centró en determinar cinco días representativos de cada año, seleccionados dentro de los periodos de canícula indicados en la Tabla.4 debido a ser una etapa climática característica del verano en México, durante la cual se registran los niveles más altos de irradiancia solar y temperatura ambiente, siendo particularmente relevante para evaluar el desempeño de sistemas fotovoltaicos, de esta manera se seleccionaron cinco registros diarios de forma aleatoria en la Tabla.5.

Es importante destacar que la canícula constituye un periodo estacional caracterizado por máximas temperaturas y menor pluviosidad en regiones tropicales que agrava la ocurrencia de olas de calor y reduce la disponibilidad hídrica, afectando agricultura y salud pública [79]. A escala global, las olas de calor han aumentado en frecuencia, duración e intensidad en las últimas décadas, tendencia ligada al calentamiento antropogénico y esperada a intensificarse con más calentamiento global [80]-[81]. Por ende, la gestión de riesgos ante canícula requiere medidas de adaptación como sistemas de alerta, protección de poblaciones vulnerables, infraestructura verde y mitigación de emisiones para limitar incrementos futuros.

Tabla.4 Periodos de canícula en México de 2020-2024.

Año	Inicio	Finalización
2020	12 de julio	20 de agosto
2021	12 de julio	20 de agosto
2022	15 de julio	23 de agosto
2023	25 de julio	03 de septiembre
2024	03 de julio	11 de agosto

Tabla.5 Selección de registros diarios representativos de la canícula en México (2020–2024).

2020	2021	2022	2023	2024
25/07/2020	20/07/2021	15/07/2022	26/07/2023	13/01/2024
03/08/2020	30/07/2021	25/07/2022	03/08/2023	01/02/2024
08/08/2020	05/08/2021	29/07/2022	18/08/2023	19/03/2024
10/08/2020	17/08/2021	13/08/2022	30/08/2023	26/04/2024
20/08/2020	20/08/2021	16/08/2022	03/09/2023	15/05/2024

Posteriormente, se seleccionaron de la base REDMET los registros del periodo 2020-2024, considerando únicamente los días representativos de la canícula para analizar el comportamiento de la irradiancia solar en intervalos de 24 horas. Los datos provinieron de la

estación de monitoreo de Santa Fe, cuyo comportamiento típico se presenta en la Fig.35- Fig.39.

25/07/2020	03/08/2020	08/08/2020	10/08/2020	20/08/2020
1 , 0	1 , 0	1 , 0	1 , 0	1 , 0
2 , 0	2 , 0	2 , 0	2 , 0	2 , 0
3 , 0	3 , 0	3 , 0	3 , 0	3 , 0
4 , 0	4 , 0	4 , 0	4 , 0	4 , 0
5 , 0	5 , 0	5 , 0	5 , 0	5 , 0
6 , 0	6 , 1	6 , 0	6 , 0	6 , 0
7 , 147	7 , 73	7 , 64	7 , 48	7 , 48
8 , 960	8 , 336	8 , 520	8 , 889	8 , 277
9 , 1017	9 , 1132	9 , 645	9 , 1867	9 , 607
10 , 1245	10 , 1675	10 , 1711	10 , 1326	10 , 1723
11 , 1312	11 , 1356	11 , 1467	11 , 1667	11 , 1917
12 , 1662	12 , 1080	12 , 1643	12 , 1013	12 , 1008
13 , 1194	13 , 1407	13 , 1311	13 , 1336	13 , 1617
14 , 1483	14 , 1397	14 , 1503	14 , 1707	14 , 1006
15 , 1124	15 , 995	15 , 1659	15 , 1939	15 , 1803
16 , 1717	16 , 305	16 , 634	16 , 615	16 , 1237
17 , 370	17 , 811	17 , 408	17 , 491	17 , 1605
18 , 274	18 , 827	18 , 197	18 , 867	18 , 675
19 , 244	19 , 372	19 , 92	19 , 161	19 , 35
20 , 0	20 , 16	20 , 3	20 , 3	20 , 1
21 , 0	21 , 0	21 , 0	21 , 0	21 , 0
22 , 0	22 , 0	22 , 0	22 , 0	22 , 0
23 , 0	23 , 0	23 , 0	23 , 0	23 , 0
24 , 0	24 , 0	24 , 0	24 , 0	24 , 0

Fig.35 Registros de irradiancia en fechas representativas del año 2020, obtenido de la REDMET.

20/07/2021	30/07/2021	05/08/2021	17/08/2021	20/08/2021
1 , 0	1 , 0	1 , 0	1 , 0	1 , 0
2 , 0	2 , 0	2 , 0	2 , 0	2 , 0
3 , 0	3 , 0	3 , 0	3 , 0	3 , 0
4 , 0	4 , 0	4 , 0	4 , 0	4 , 0
5 , 0	5 , 0	5 , 0	5 , 0	5 , 0
6 , 0	6 , 0	6 , 3	6 , 1	6 , 1
7 , 169	7 , 59	7 , 44	7 , 87	7 , 99
8 , 1001	8 , 503	8 , 161	8 , 674	8 , 862
9 , 1942	9 , 1195	9 , 460	9 , 1097	9 , 1196
10 , 1559	10 , 1348	10 , 1431	10 , 1161	10 , 1403
11 , 1576	11 , 1068	11 , 1675	11 , 1321	11 , 1467
12 , 1346	12 , 1913	12 , 1516	12 , 1028	12 , 1180
13 , 1289	13 , 1679	13 , 1528	13 , 1112	13 , 1103
14 , 1603	14 , 1962	14 , 1510	14 , 1070	14 , 1291
15 , 1925	15 , 1150	15 , 1839	15 , 692	15 , 1302
16 , 1987	16 , 715	16 , 1748	16 , 633	16 , 1150
17 , 150	17 , 438	17 , 1885	17 , 518	17 , 1161
18 , 171	18 , 226	18 , 708	18 , 144	18 , 694
19 , 75	19 , 198	19 , 167	19 , 125	19 , 53
20 , 6	20 , 6	20 , 1	20 , 5	20 , 1
21 , 0	21 , 0	21 , 0	21 , 0	21 , 0
22 , 0	22 , 0	22 , 0	22 , 0	22 , 0
23 , 0	23 , 0	23 , 0	23 , 0	23 , 0
24 , 0	24 , 0	24 , 0	24 , 0	24 , 0

Fig.36 Registros de irradiancia en fechas representativas del año 2021, obtenido de la REDMET.

15/07/2022	25/07/2022	29/07/2022	13/08/2022	16/08/2022
1 , 0	1 , 0	1 , 0	1 , 0	1 , 0
2 , 0	2 , 0	2 , 0	2 , 0	2 , 0
3 , 0	3 , 0	3 , 0	3 , 0	3 , 0
4 , 0	4 , 0	4 , 0	4 , 0	4 , 0
5 , 0	5 , 0	5 , 0	5 , 0	5 , 0
6 , 0	6 , 2	6 , 0	6 , 0	6 , 10
7 , 77	7 , 137	7 , 92	7 , 92	7 , 51
8 , 373	8 , 912	8 , 473	8 , 473	8 , 346
9 , 956	9 , 1227	9 , 1453	9 , 1453	9 , 1069
10 , 1361	10 , 1446	10 , 1773	10 , 1173	10 , 1291
11 , 1255	11 , 1351	11 , 1223	11 , 223	11 , 1479
12 , 901	12 , 632	12 , 1395	12 , 1395	12 , 1220
13 , 1315	13 , 990	13 , 888	13 , 888	13 , 1616
14 , 1457	14 , 1298	14 , 1092	14 , 1092	14 , 1427
15 , 1080	15 , 435	15 , 477	15 , 477	15 , 709
16 , 1360	16 , 1689	16 , 474	16 , 474	16 , 299
17 , 1283	17 , 752	17 , 572	17 , 572	17 , 200
18 , 1109	18 , 269	18 , 806	18 , 806	18 , 150
19 , 218	19 , 57	19 , 292	19 , 292	19 , 69
20 , 6	20 , 0	20 , 25	20 , 25	20 , 4
21 , 0	21 , 0	21 , 0	21 , 0	21 , 0
22 , 0	22 , 0	22 , 0	22 , 0	22 , 0
23 , 0	23 , 0	23 , 0	23 , 0	23 , 0
24 , 0	24 , 0	24 , 0	24 , 0	24 , 0

Fig.37 Registros de irradiancia en fechas representativas del año 2022, obtenido de la REDMET.

26/07/2023	03/08/2023	18/08/2023	30/08/2023	03/09/2023
1 , 0	1 , 0	1 , 0	1 , 0	1 , 0
2 , 0	2 , 0	2 , 0	2 , 0	2 , 0
3 , 0	3 , 0	3 , 0	3 , 0	3 , 0
4 , 0	4 , 0	4 , 0	4 , 0	4 , 0
5 , 0	5 , 0	5 , 0	5 , 0	5 , 0
6 , 4	6 , 3	6 , 4	6 , 0	6 , 1
7 , 68	7 , 16	7 , 31	7 , 6	7 , 7
8 , 112	8 , 172	8 , 142	8 , 170	8 , 70
9 , 331	9 , 706	9 , 280	9 , 869	9 , 635
10 , 1480	10 , 1289	10 , 1031	10 , 993	10 , 969
11 , 1160	11 , 1318	11 , 1204	11 , 1262	11 , 1050
12 , 1228	12 , 1014	12 , 1087	12 , 1162	12 , 1164
13 , 1035	13 , 1085	13 , 1271	13 , 1041	13 , 1136
14 , 1937	14 , 1381	14 , 1063	14 , 1061	14 , 1040
15 , 1149	15 , 1152	15 , 1379	15 , 1058	15 , 1103
16 , 1372	16 , 213	16 , 1258	16 , 961	16 , 839
17 , 928	17 , 252	17 , 18	17 , 1301	17 , 464
18 , 47	18 , 22	18 , 17	18 , 364	18 , 10
19 , 6	19 , 57	19 , 8	19 , 30	19 , 5
20 , 0	20 , 0	20 , 0	20 , 0	20 , 3
21 , 0	21 , 0	21 , 0	21 , 0	21 , 0
22 , 0	22 , 0	22 , 0	22 , 0	22 , 0
23 , 0	23 , 0	23 , 0	23 , 0	23 , 0
24 , 0	24 , 0	24 , 0	24 , 0	24 , 0

Fig.38 Registros de irradiancia en fechas representativas del año 2023, obtenido de la REDMET.

13/01/2024	01/02/2024	19/03/2024	26/04/2024	15/05/2024
1 , 0	1 , 0	1 , 0	1 , 0	1 , 0
2 , 0	2 , 0	2 , 0	2 , 0	2 , 0
3 , 0	3 , 0	3 , 0	3 , 0	3 , 0
4 , 0	4 , 0	4 , 0	4 , 0	4 , 0
5 , 0	5 , 0	5 , 0	5 , 0	5 , 0
6 , 0	6 , 0	6 , 0	6 , 0	6 , 0
7 , 0	7 , 0	7 , 0	7 , 5	7 , 12
8 , 6	8 , 10	8 , 79	8 , 198	8 , 198
9 , 228	9 , 232	9 , 679	9 , 775	9 , 655
10 , 902	10 , 872	10 , 778	10 , 955	10 , 1127
11 , 1359	11 , 1122	11 , 1087	11 , 1030	11 , 1398
12 , 1265	12 , 1140	12 , 1150	12 , 1156	12 , 1072
13 , 1120	13 , 1092	13 , 1365	13 , 1301	13 , 1079
14 , 1098	14 , 977	14 , 1146	14 , 1100	14 , 1088
15 , 1202	15 , 962	15 , 1556	15 , 889	15 , 1092
16 , 984	16 , 690	16 , 861	16 , 154	16 , 1201
17 , 360	17 , 315	17 , 347	17 , 126	17 , 402
18 , 80	18 , 47	18 , 198	18 , 130	18 , 90
19 , 3	19 , 3	19 , 12	19 , 23	19 , 18
20 , 0	20 , 0	20 , 0	20 , 0	20 , 1
21 , 0	21 , 0	21 , 0	21 , 0	21 , 0
22 , 0	22 , 0	22 , 0	22 , 0	22 , 0
23 , 0	23 , 0	23 , 0	23 , 0	23 , 0
24 , 0	24 , 0	24 , 0	24 , 0	24 , 0

Fig.39 Registros de irradiancia en fechas representativas del año 2024, obtenido de la REDMET.

Con base en los registros de irradiancia mostrados anteriormente, se generaron archivos en formato TBL, integrados al entorno de simulación en PSIM mediante el uso de una 'Table' como fuente de entrada.

5.2.2 Modelado eléctrico del panel fotovoltaico RGN-100D-SS

El modelo físico de un panel fotovoltaico tiene como objetivo principal captar la energía proveniente de la irradiancia solar y transformarla en energía eléctrica. No obstante, cada PV cuenta con una hoja de especificaciones técnicas en la que se detallan sus características eléctricas, parámetros mecánicos y térmicos, así como las curvas de comportamiento proporcionadas por el fabricante. Sin embargo, para simular de manera adecuada el comportamiento de un modelo específico, es necesario realizar el modelado de sus características eléctricas dentro de un software especializado que permita la caracterización precisa de paneles fotovoltaicos.

Para este propósito, se utilizó el software PSIM, el cual constituye una herramienta de simulación que permite la modelación y caracterización eléctrica de paneles solares a partir de los parámetros proporcionados por el fabricante. En particular, se realizó la caracterización del panel solar RGN-100D-SS mediante la herramienta Physical Model, la cual se presenta en la Fig.40.

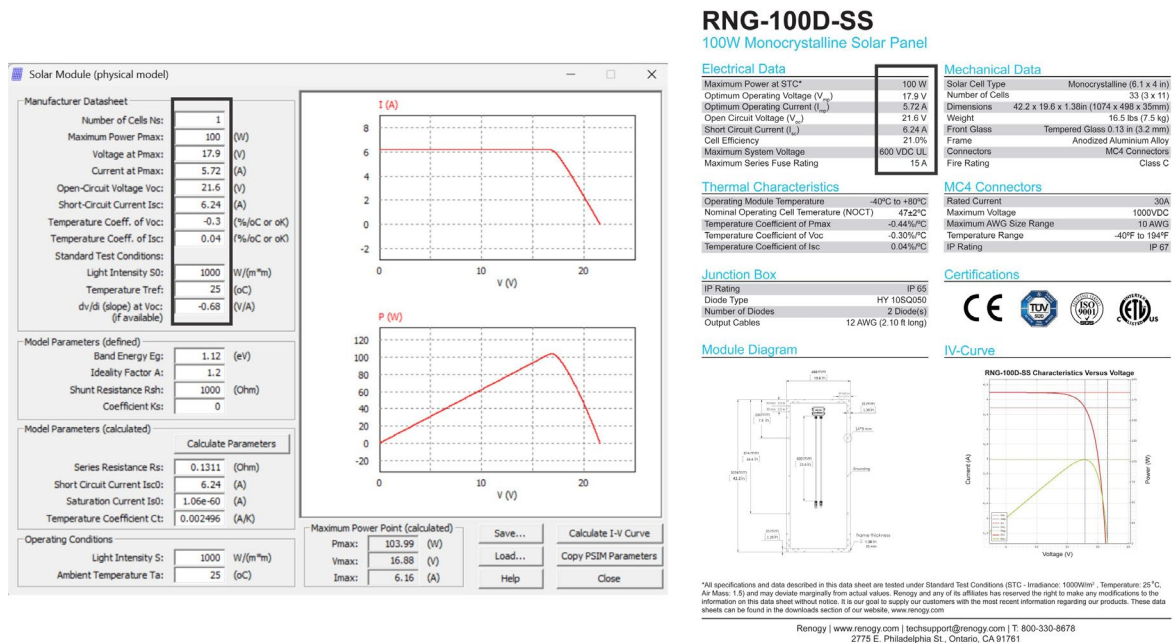


Fig.40 Modelado de panel solar mediante la herramienta Physical Model en el entorno de simulación PSIM.

Con base en la hoja de datos del panel fotovoltaico modelo RGN-100D-SS [67], se ingresaron en la herramienta de modelado los principales parámetros eléctricos proporcionados por el fabricante, tales como el número de celdas, la tensión y corriente en el punto de máxima potencia, la tensión de circuito abierto y la corriente de cortocircuito, todos ellos definidos bajo condiciones estándar de prueba. Dichas condiciones consideran una temperatura ambiente de 25°C y una irradiancia máxima de 1000W/m², lo que permite establecer un marco de referencia para la caracterización del módulo.

A partir de estos parámetros, mediante la función Calculate I-V Curve, se generaron las curvas características de corriente-tensión (I-V) y potencia-tensión (P-V), obteniéndose los parámetros del modelo eléctrico equivalente del panel fotovoltaico. Posteriormente, dichos

parámetros fueron utilizados para configurar un arreglo de paneles solares en el entorno de simulación, preservando las propiedades eléctricas del módulo RGN-100D-SS. De esta manera, el modelo implementado en PSIM permite analizar el comportamiento del sistema fotovoltaico bajo distintas condiciones de irradiancia, manteniendo coherencia con las especificaciones reales del fabricante.

5.2.3 Simulación de arreglo fotovoltaico bajo condiciones de irradiancia constante

Mediante el modelo generado en la sección 5.2.2, se realizó la simulación del arreglo fotovoltaico autónomo de cinco paneles fotovoltaicos bajo condiciones ambientales variables de irradiancia y temperatura durante un periodo de 24 horas, con el fin de analizar su comportamiento dinámico ante distintos escenarios climáticos.

Para la simulación del sistema fotovoltaico, se consideró como señal de entrada el archivo TBL descrito en la Sección 5.2.1, el cual contiene los perfiles de irradiancia empleados en el análisis, manteniendo una temperatura ambiente constante de 25°C. Esta configuración se muestra en el inciso (a) de la Fig.41. Asimismo, el modelo incluye en el inciso (b) el arreglo de paneles solares configurado con los parámetros eléctricos correspondientes al módulo fotovoltaico caracterizado, garantizando la representación fiel de su comportamiento eléctrico dentro del entorno de simulación.

Por otra parte, el inciso (c) de la misma figura presenta el esquema de control de la simulación, el cual fue ejecutado con un tiempo total de simulación de 25ms y un time step de 1ms. Esta elección permitió capturar adecuadamente las variaciones dinámicas rápidas del sistema, asegurando la estabilidad numérica del modelo y una resolución temporal suficiente para el análisis. Adicionalmente, el registro de datos se limitó a un total de 256 muestras, las cuales resultaron necesarias para su posterior procesamiento y análisis en un segundo entorno de simulación.

La implementación descrita permitió realizar un análisis detallado del comportamiento eléctrico del arreglo fotovoltaico para cada uno de los 25 días seleccionados, evaluando de manera sistemática las variables de tensión, corriente y potencia generadas. Estos resultados constituyen la base para la validación del modelo y el estudio del desempeño del sistema bajo condiciones de irradiancia variable.

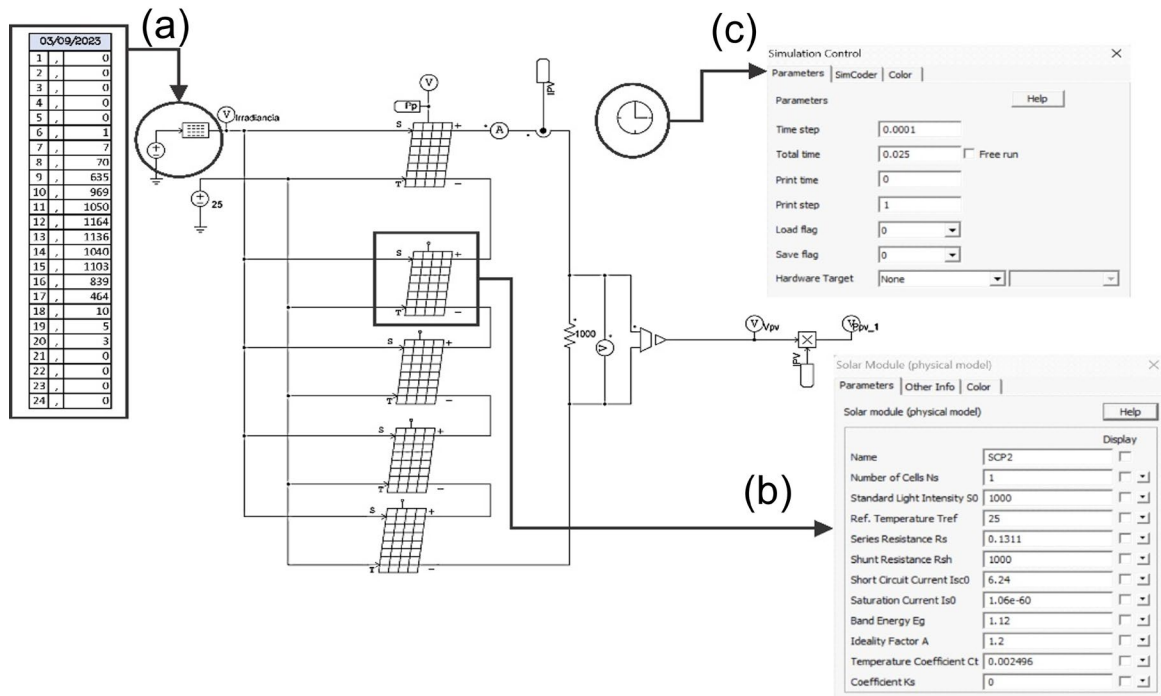


Fig.41 Elementos principales del esquema de simulación de un arreglo en serie de paneles solares modelo RGN-100D-SS: (a)Irradiancia, (b) Control de simulación, (c) Modelo de panel solar.

Como ejemplo representativo, en la Fig.42 se presentan los resultados correspondientes al 3 de septiembre de 2023, fecha en la cual se registró una irradiancia máxima de 1164W/m^2 y una tensión máxima de 89.83V en el arreglo fotovoltaico. Asimismo, se incluyen las gráficas que ilustran el comportamiento transitorio de la tensión y la potencia generadas, observándose una potencia máxima alcanzada de 407.66W .

Una vez obtenidas las gráficas de comportamiento mediante la herramienta Data Simulation de PSIM, se procedió a exportar los registros de tensión, irradiancia y potencia generados por el arreglo fotovoltaico, almacenados en una hoja de cálculo de Microsoft Excel (véase Fig.43), lo que permitió facilitar su análisis posterior y la comparación de resultados bajo diferentes condiciones de irradiancia.

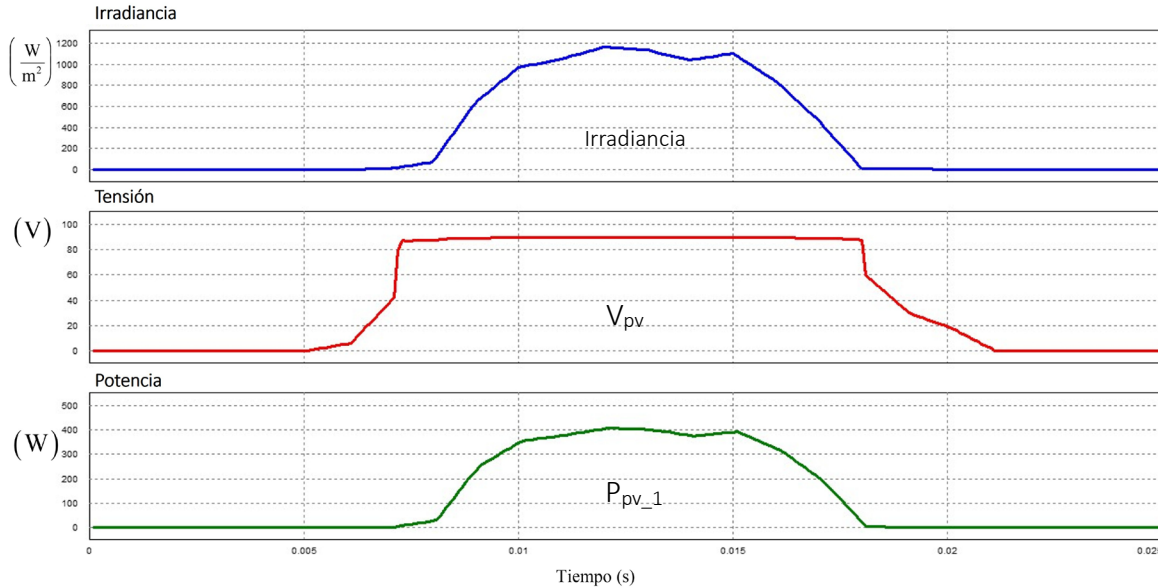


Fig.42 comportamiento de irradiancia, tensión y potencia del arreglo fotovoltaico el día 3 de septiembre de 2023.

26/07/2023				03/08/2023				18/08/2023				30/08/2023				03/09/2023			
0.0103	89.82756696	1384	465.9391152	0.0103	89.78962175	1297	439.3463472	0.0103	89.64324526	1082.9	381.9889299	0.0103	89.63168218	1073.7	376.897375	0.0103	89.59228177	999.3	359.7958862
0.0104	89.81276995	1352	459.1314841	0.0104	89.77107124	1300.6	439.9137827	0.0104	89.65770445	1100.2	386.6212438	0.0104	89.64816364	1080.6	384.1641123	0.0104	89.59753594	1001.4	362.0795705
0.0105	89.79762298	1320	452.1181812	0.0105	89.75251746	1303.3	440.5900718	0.0105	89.64999158	1117.5	391.2027762	0.0105	89.64231161	1127.5	395.3978966	0.0105	89.60386422	1009.7	364.3542883
0.0106	89.78210099	1288	444.9999398	0.0106	89.73960412	1306.1	441.2448803	0.0106	89.67413396	1134.9	395.7335444	0.0106	89.67990631	1154.4	398.5292722	0.0106	89.60810333	1017.6	366.6178394
0.0107	89.76621006	1256	437.5752518	0.0107	89.72460014	1309.1	441.9082089	0.0107	89.68409467	1152.1	400.2155671	0.0107	89.69520653	1181.3	405.2279489	0.0107	89.61329795	1025.7	368.8702246
0.0108	89.74999628	1224	430.1783884	0.0108	89.70856652	1312.2	442.5700581	0.0108	89.69399253	1169.4	404.6428641	0.0108	89.701498	1208.2	412.0030241	0.0108	89.61845979	1033.8	371.1141474
0.0109	89.73317661	1192	425.1083113	0.0109	89.69369699	1315.1	443.2304284	0.0109	89.70558216	1186	409.0214381	0.0109	89.72475323	1235.1	418.6575009	0.0109	89.62516257	1041.9	375.3415059
0.011	89.7199819	1160	414.651535	0.011	89.67969977	1318	443.8804083	0.011	89.71301797	1204	413.3495713	0.011	89.73902933	1262	425.1881459	0.011	89.62861373	1050	375.568023
0.0111	89.69814651	1168.8	406.6486503	0.0111	89.7812685	1287.6	444.5471808	0.0111	89.72549418	1192.3	417.6386729	0.0111	89.752599	1252	431.5972736	0.0111	89.63565153	1061.4	377.7881379
0.0112	89.7021282	1173.6	408.566175	0.0112	89.7660888	1257.7	427.5829394	0.0112	89.74616156	1180.6	414.7391857	0.0112	89.7428378	1242	428.2399912	0.0112	89.6469366	1072.8	380.566625
0.0113	89.7090793	1180.4	410.675269	0.0113	89.75052521	1226.8	430.4636941	0.0113	89.7097653	1168.9	411.8290295	0.0113	89.74264072	1232	428.8440242	0.0113	89.64761899	1084.2	383.9227638
0.0114	89.70965541	1187.2	411.7789902	0.0114	89.73465802	1196.4	423.1862993	0.0114	89.70330472	1157.2	408.8956374	0.0114	89.73740014	1222	424.4420609	0.0114	89.65448354	1095.6	386.9672007
0.0115	89.7158118	1194	413.475229	0.0115	89.7182872	1186	415.236275	0.0115	89.69677831	1145.2	405.9389725	0.0115	89.7211631	1212	422.0231805	0.0115	89.661275	1107	389.8949434
0.0116	89.71708541	1200.8	415.160556	0.0116	89.70169239	1159.6	408.164441	0.0116	89.69818472	1133.8	402.9598935	0.0116	89.7267854	1202	418.9571222	0.0116	89.6679918	1118.4	392.8986919
0.0117	89.72974833	1207.6	416.5828777	0.0117	89.68452304	1105.5	400.4194963	0.0117	89.68525253	1122.1	399.9558251	0.0117	89.72114607	1192	417.1348977	0.0117	89.67464851	1128.8	395.9678638
0.0118	89.7244302	1214.4	418.103701	0.0118	89.66993939	1074.8	392.5174769	0.0118	89.67679031	1110.4	396.6295999	0.0118	89.71599815	1182	414.6651333	0.0118	89.68122887	1141.2	398.9238201
0.0119	89.73807125	1221.2	420.1746053	0.0119	89.6482368	1044.4	384.4586919	0.0119	89.6999858	1098.7	393.8802292	0.0119	89.71051401	1172	412.1783355	0.0119	89.68774427	1123.6	401.5381051
0.012	89.73149172	1228	421.8389956	0.012	89.63019091	1014	376.2430564	0.012	89.6611098	1087	390.807565	0.012	89.70502386	1162	409.6751499	0.012	89.69419405	1104	404.7699746
0.0121	89.7359183	1208.7	423.4765434	0.0121	89.61099449	1021.1	367.870495	0.0121	89.6561838	1105.4	387.7116027	0.0121	89.69946387	1149.9	407.1546482	0.0121	89.70057953	1181.2	407.6601933
0.0122	89.7350206	1189.4	418.7789804	0.0122	89.61575977	1038	369.8394411	0.0122	89.66707682	1131.8	395.5699913	0.0122	89.69267733	1171.8	404.0823546	0.0122	89.69901706	1178.4	406.9524175
0.0123	89.74181394	1170.1	414.002417	0.0123	89.62081381	1053.5	371.800925	0.0123	89.67777791	1142.2	397.3788943	0.0123	89.68189801	1125.7	400.9851181	0.0123	89.69745746	1157.6	406.245329
0.0124	89.70397036	1150.8	409.1975119	0.0124	89.62450465	1042.4	373.7532031	0.0124	89.68831265	1160.4	403.1145599	0.0124	89.67886931	1113.6	397.8632001	0.0124	89.69580362	1152.8	405.5328105
0.0125	89.6931798	1131.5	404.311779	0.0125	89.62894546	1049.5	375.6989237	0.0125	89.6988175	1179	406.8003983	0.0125	89.67185463	1101.5	394.7165756	0.0125	89.69430666	1150	404.820979
0.0126	89.6820269	1112.2	399.3629318	0.0126	89.63325589	1056.6	377.6320262	0.0126	89.7083585	1197.4	411.4291681	0.0126	89.66416226	1089.4	391.5420599	0.0126	89.69272875	1147.2	404.1077954
0.0127	89.67103803	1092.9	394.5108621	0.0127	89.63735746	1063.7	379.5188	0.0127	89.71892925	1215.8	416.0007966	0.0127	89.65759048	1077.8	388.1480011	0.0127	89.69114698	1144.4	403.2925292
0.0128	89.65967323	1073.6	389.756092	0.0128	89.6420869	1070.8	381.4789723	0.0128	89.7281832	1234.2	420.519581	0.0128	89.65033747	1065.2	385.1273294	0.0128	89.6895813	1124.6	402.6775695
0.0129	89.64810212	1054.3	384.1737505	0.0129	89.64640705	1077.9	383.3866516	0.0129	89.73825675	1252.4	424.9719952	0.0129	89.64300104	1053.1	381.8818777	0.0129	89.68797168	1128.8	401.8605247
0.013	89.63630215	1035	378.9359895	0.013	89.65099077	1085	385.2875222	0.013	89.74819533	1271	429.3745368	0.013	89.63550323	1043	378.6095706	0.013	89.6865781	1156	402.522671
0.0131	89.62431634	1122.3	373.7090063	0.0131	89.65496251	1114.4	387.1800103	0.0131	89.7570035	1290.2	433.7139996	0.0131	89.62907234	1043	375.5142729	0.0131	89.68470555	1126.4	400.522671
0.0132	89.6758097	1215.4	397.7387391	0.0132	89.67243732	1144.2	394.97782	0.0132	89.74692624	1294.2	428.801084	0.0132	89.62931933	1045	375.8609586	0.0132	89.67922778	1116.8	398.0446456
0.0133	89.72860496	1305.6	420.417487	0.0133	89.6944795	1173.8	402.6264987	0.0133	89.7480354	1298.8	425.8147538	0.0133	89.630564	1047	374.408575	0.0133	89.67371723	1107.2	395.5510843
0.0134	89.7750013	1395.8	441.731754	0.0134	89.70601841	1209.4	410.1280534	0.0134	89.72496664	1317.8	418.755448	0.0134	89.61180657	1049	374.9515754	0.0134	89.68511168	1097.6	393.5419919
0.0135	89.72217086	1486	461.6617815	0.0135	89.72317086	1333	417.4791217	0.0135	89.7137089	1367	413.6238907	0.0135	89.630461	1051	377.4861262	0.0135	89.68243645	1088	390.5174749
0.0136	89.85879072	1756.2	480.2348317	0.0136	89.73792616	1262.6	424.6810813	0.0136	89.7021494	1346.2	408.4169733	0.0136	89.63423536	1053	378.040495	0.0136	89.6767547	1078.4	387.9771624
0.0137	89.86960296	1664.4	487.2451739	0.0137	89.75330017	1262.2	423.138846	0.0137	89.69991813	1324.2	413.79727	0.0137	89.61551465	1055	378.582778	0.0137	89.67100624	1068.8	385.4211189
0.0138	89.93737401	1756.6	513.3093994	0.0138	89.76831944	1231.8	438.646597	0.0138	89.74969633	1304.9	397.7834803	0.0138	89.63671131	1057	379.1255101	0.0138	89.64519283	1059.2	382.8393533
0.0139	89.86891182	1846.8	527.346982	0.0139	89.78299179	1251.4	443.4066497	0.0139	89.66651682	1083.3	395.3997259	0.0139	89.63798164	1059	379.667113	0.0139	89.63932327	1048.6	380.262979
0.014	89.9992709	1927.1	541.0430036	0.014	89.79735522	1381	452.0192592	0.014	89.65421393	1063.1	385.890814	0.014	89.6392096	1061	380.2082943	0.014	89.63341759	1040	377.6309073

Fig.43 Base de datos del comportamiento eléctrico del arreglo en serie de paneles solares.

La base de datos recolectada a partir del comportamiento obtenido en las 25 pruebas de simulación fue almacenada en un repositorio digital (<https://docs.google.com/spreadsheets/d/1aoy3aAi4K7D4BfEdry4Y5I5wUGlv7u0S/edit?usp=sharing&ouid=105341608622410324985&rtpof=true&sd=true>), el cual contiene los registros completos de irradiancia, tensión y potencia generados por el arreglo fotovoltaico. En particular, la Fig.43 presenta un ejemplo representativo de dichos datos, los cuales fueron posteriormente empleados como fuente de entrada variable en nuevas simulaciones realizadas en el entorno SIMetrix. La incorporación de esta base de datos permitió analizar con mayor detalle la respuesta dinámica del sistema ante perfiles de irradiancia realistas,

facilitando la evaluación del desempeño tanto del convertidor bidireccional como del arreglo fotovoltaico bajo condiciones de operación más cercanas a escenarios climáticos variables. Este enfoque contribuye a una validación más robusta del modelo propuesto y de su comportamiento ante variaciones del recurso solar.

5.2.4 Simulación de arreglo fotovoltaico bajo condiciones de irradiancia variable

Se llevo a cabo la evaluación de sistema fotovoltaico mediante condiciones de barrido paramétrico, mediante el software PSIM utilizando un arreglo compuesto por cinco paneles solares, considerando los parámetros eléctricos del modelo del panel RGN-100D-S. El esquema general de la simulación (Fig.44), se integraron los elementos de modelado y las condiciones de barrido paramétrico (Parameter Sweep) para analizar la respuesta del sistema ante diferentes niveles de irradiancia.

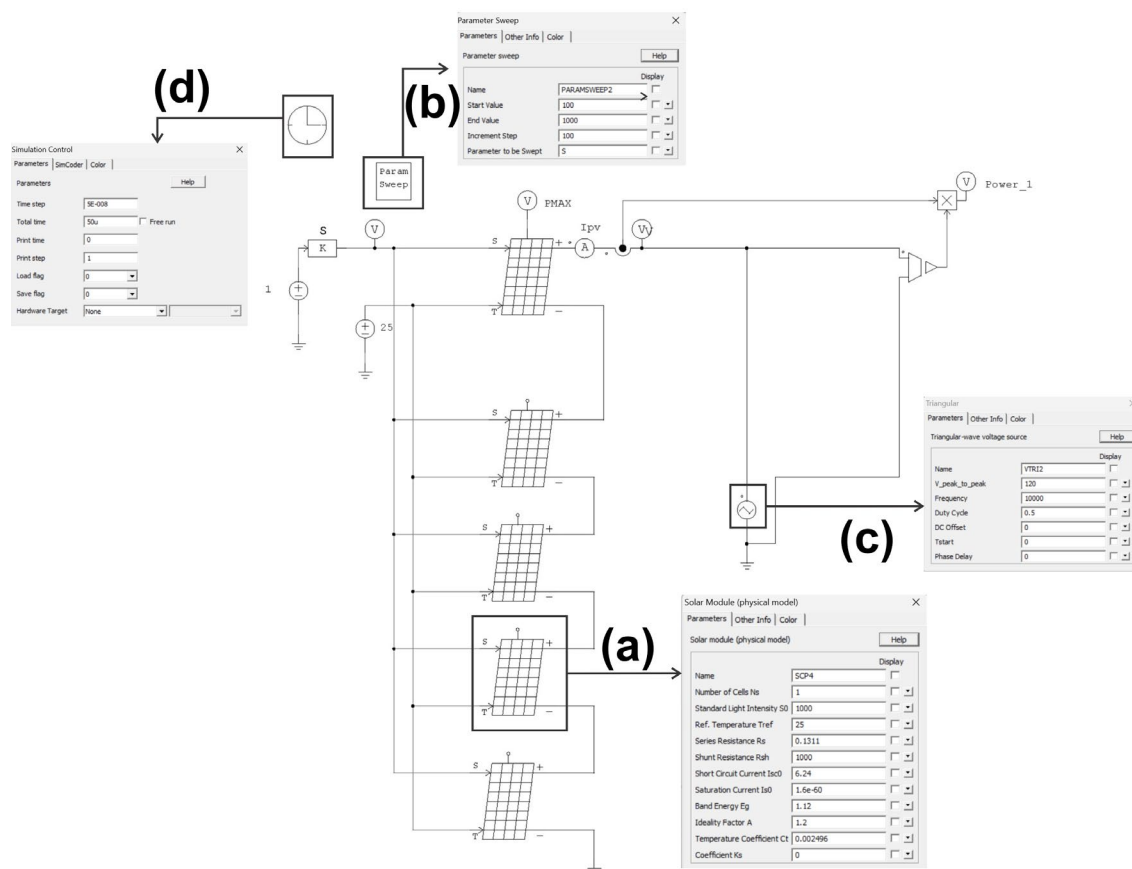


Fig.44 Esquema de simulación de un arreglo en serie de paneles solares RGN-100D-SS en condiciones de barrido paramétrico.

A continuación, se describen los incisos de composición del esquema de simulación:

(a) Se presenta el modelo equivalente del arreglo fotovoltaico, reproduciendo el comportamiento de las curvas características de (I-V) y (P-V) del conjunto de paneles en función de la irradiancia y temperatura, considerando los parámetros eléctricos del modelo seleccionado.

(b) Mediante la herramienta Parameter Sweep se realizó un barrido automático de la irradiancia configurado desde 100W/m^2 hasta 1000W/m^2 en incrementos de 100W/m^2 . Esta

herramienta permitió generar automáticamente las formas de onda de tensión, corriente y potencia en cada iteración.

(c) Se incluye el bloque comparador PWM, encargado de generar una señal de control a partir de la comparación entre la señal de salida del arreglo fotovoltaico y una onda triangular de 120V pico, 10kHz y 50% de ciclo de trabajo.

(d) Se ajustó el control de simulación a un paso de tiempo de 50us, valor que garantiza una resolución temporal suficiente para capturar los transitorios rápidos del sistema sin comprometer el tiempo total de simulación. La modulación por ancho de pulso, permitió evaluar el efecto de la irradiancia sobre la tensión de referencia del sistema. Los resultados obtenidos permitieron identificar el comportamiento del arreglo fotovoltaico ante diferentes condiciones de irradiancia, generando curvas características de Corriente-Tensión y Potencia-Tensión del sistema. Cabe destacar al panel solar alcanza su capacidad máxima con una irradiancia de 1000W/m^2 (100% nominal), mientras que 800W/m^2 y 200W/m^2 representan el 80% y 20% de dicha capacidad, respectivamente.

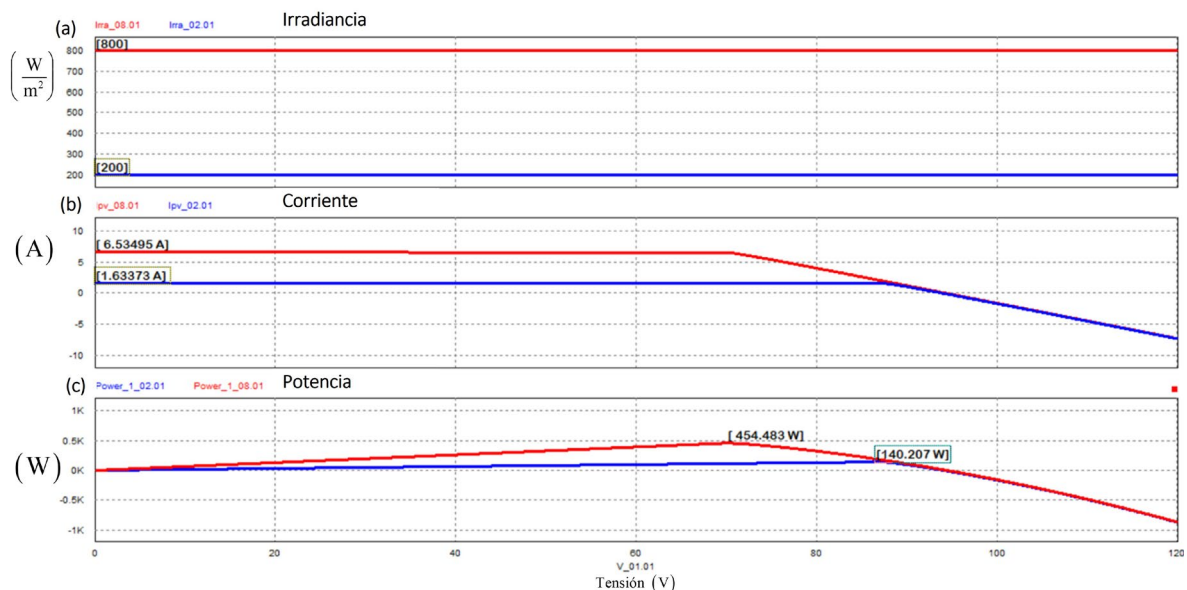


Fig.45 Curvas características del panel RGN-100D-SS bajo irradiancias de 800 W/m^2 y 200 W/m^2 , (a) Irradiancia, (b) Curva de Corriente-Tensión (I-V), (c) Curva de Potencia-Tensión (P-V).

En la figura anterior se presentan las curvas características de (I-V) y (P-V) del panel RGN-100D-SS bajo diferentes niveles de irradiancia. Las gráficas en color rojo corresponden a una irradiancia de 800W/m^2 registrando una corriente de 6.53A y una potencia máxima de 454.483W. Por su parte, las curvas en color azul representan el comportamiento ante una irradiancia de 200W/m^2 con una corriente de 1.6337A y una potencia de 140.207W. A partir de los resultados obtenidos en la simulación, se determinó la tensión presente en el arreglo fotovoltaico mediante la relación de potencia, la cual será empleada posteriormente en el modo PV y Batería a Carga correspondiente a la sección 5.3.3.

5.3 Escenarios de simulación

Los escenarios de simulación de esta sección se basan en la evaluación de un sistema fotovoltaico en esquema paralelo mediante un convertidor bidireccional. El análisis se realiza con herramientas de simulación especializadas, donde en la Sección 5.3.1 se presenta una comparación entre SIMetrix y PSpice para identificar el entorno con mayor precisión y consistencia en la representación del comportamiento dinámico del sistema. Asimismo, se describe el procedimiento de diseño y evaluación del convertidor bidireccional operando en configuración paralela bajo cinco modos de transferencia y control de potencia, los cuales se analizan en dos condiciones de operación: irradiancia constante e irradiancia variable, considerando en ambos casos las pérdidas pasivas del sistema. Posteriormente, se evalúa el comportamiento de los cinco modos de operación bajo ambos escenarios.

Es importante destacar que los modos de operación PV a Batería y Carga y PV y Batería a Carga requieren el funcionamiento simultáneo de dos convertidores, asignando porcentajes específicos de potencia a cada uno. En este estudio, se emplearon relaciones de distribución de potencia de 80%-20% en una primera prueba y de 20%-80% en una segunda. Como consecuencia, fue necesario realizar ajustes en los valores de los componentes electrónicos para asegurar una adecuada repartición de potencia. En particular, en el primer caso se modificaron la resistencia de carga y la resistencia interna de la batería, mientras que en el segundo se ajustaron las tensiones de entrada correspondientes a ambas fuentes.

5.3.1 Comparación entre SIMetrix y PSpice

Las herramientas de simulación presentan características distintivas, en el cual PSpice se destaca por su precisión en el estudio de circuitos analógicos y transitorios, lo que permite realizar validaciones detalladas de los componentes. Por su parte, SIMetrix sobresale por su rapidez y estabilidad en la simulación de convertidores conmutados, facilitando el análisis dinámico y de control.

En este contexto, se realizó la simulación del primer modo de operación (PV a Carga) del convertidor bidireccional en esquema paralelo, bajo el escenario I utilizando ambos softwares. Se emplearon los parámetros y los elementos seleccionados de diseño presentados en la sección 4.1, junto con el análisis de circuitos descrito en la Tabla.2 de la sección 4.7, a partir del cual se determinaron los valores de los componentes electrónicos especificados en la Tabla.3 de la sección 5.1. En ambas herramientas, la simulación se realizó en un tiempo de 25ms, consideraron las pérdidas pasivas en los modelos comerciales mediante la inclusión de resistencias en serie asociadas a cada componente, el esquema de simulación se conformó con los modelos siguientes: el inductor MSS1210H-125KED [70], el condensador B32656A3335 [69], el transistor IRFB4137 [71] y diodo MUR840 [72]. (Ver Tabla.3).

La comparación se inició con la simulación efectuada en SIMetrix, ilustrada en la Fig.46 a) se empleó una fuente de tensión fija de 89.5V y un ciclo de trabajo de 0.5525, obteniéndose una tensión promedio en la carga de 187.94V y una corriente de 2.41A, obteniéndose una eficiencia del sistema de 91.99%. Posteriormente, se realizó la simulación en PSpice,

mostrada en la misma figura en el inciso b), utilizando igualmente una fuente de tensión de 89.5V, la señal de control se generó mediante una fuente de pulsos con un periodo de 20us y un ancho de pulso de 11.05us, determinado por el producto del ciclo de trabajo y el periodo. En este caso, se obtuvo una tensión promedio en la carga de 187.63V y una corriente de 2.39A, alcanzando una eficiencia del 91.78%.

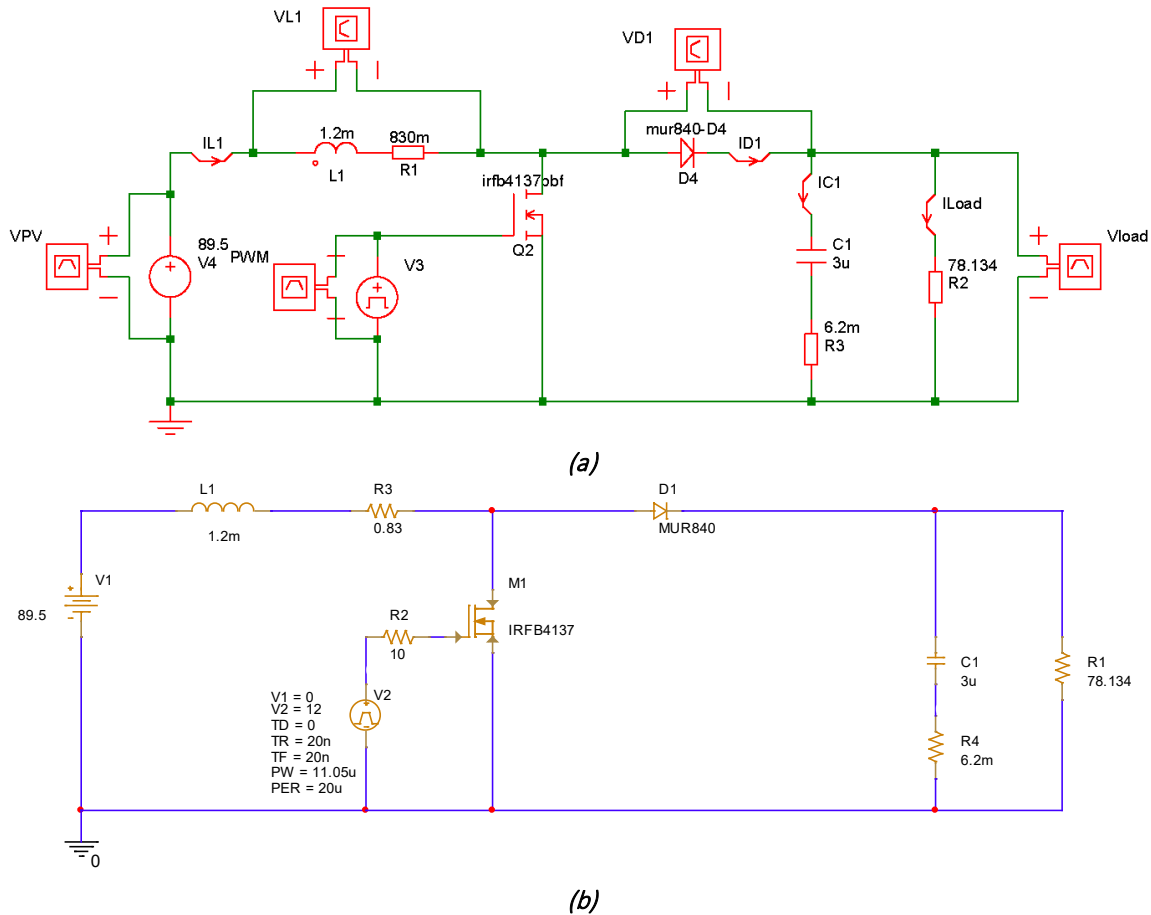


Fig.46 Esquema de simulación del convertidor Boost en modo PV–Carga en condiciones constantes de irradiancia, correspondiente al Escenario I: a) SIMetrix, b) PSpice.

Los resultados promedio de tensión y corriente, tanto en la entrada como en la salida, obtenidos a partir de las simulaciones, se presentan en la Tabla.6.

Tabla.6 Resultados eléctricos promedio del convertidor en modo PV a Carga bajo condiciones constantes de irradiancia: comparación entre SIMetrix y PSpice.

Modo PV a Carga	Software	Tensión de entrada promedio [V]	Corriente de entrada promedio [A]	Tensión de salida promedio [V]	Corriente de salida promedio [A]	Eficiencia [%]
	SIMetrix	89.5	5.4905872	187.93825	2.4053325	91.99
	PSpice	89.5	5.47958	187.63399	2.39891	91.78

Como se observa, los resultados obtenidos con ambas simulaciones son muy similares, particularmente los de eficiencia, solo que la simulación en SIMetrix es más rápida. Como la idea fundamental es comparar eficiencia, se decidió utilizar al simulador SIMetrix en todas las simulaciones posteriores.

5.3.2 Escenario I: Simulación considerando pérdidas pasivas bajo condiciones constantes de irradiancia

En este escenario, se simuló el convertidor bidireccional en esquema paralelo utilizando una fuente de tensión constante, con el fin de analizar el comportamiento bajo condiciones fijas de operación. Se consideraron las pérdidas a partir de modelos comerciales de condensadores, inductores y transistores cuyas características eléctricas resultan equivalentes o próximas a los valores obtenidos en el análisis de circuitos mostrado en la Tabla.2 de la sección 4.7. Con base en ello, se determinaron los valores de los componentes electrónicos presentados en la Tabla.22 del Anexo A y se seleccionaron los dispositivos indicados en la Tabla.3 de la sección 5.1. Los esquemas de simulación se presentan en la Tabla.7, junto con los resultados de eficiencia (Ver Tabla.8) obtenidos para cada modo de operación, los cuales se recopilan y analizan en la Sección 5.3.2.6. En este escenario, los distintos modos de operación se diferencian por el uso de una fuente de tensión constante cuyo valor se ajusta en función del modo de funcionamiento del convertidor.

5.3.2.1 Modo PV a Carga

El modo de operación incorporó las resistencias internas de los componentes pasivos seleccionados: inductor MSS1210H-125KED de 1200uH con una resistencia interna (DCR) de 830mΩ [70], el condensador B32656A3335 de 3300nF con una resistencia serie equivalente (ESR) de 5.9mΩ [69], y el transistor IRFB4137 con una resistencia de conducción interna de 56mΩ [71], así mismo se utilizó una fuente de tensión fija de 89.5V. Como resultado, se obtuvo una tensión promedio en la carga de 187.94V y una corriente de 2.41A, obteniendo una eficiencia del sistema del 91.99%.

5.3.2.2 Modo Batería a Carga

La simulación contempló resistencia serie asociada a los componentes pasivos: inductor MSS1210H-105KED de 1000uH con una DCR de 630mΩ [70], el condensador B32656A3335 de 3300nF con una ESR de 5.9mΩ [69] y el transistor IRFB4137. Se utilizó una fuente de tensión fija de 72V, un ciclo de trabajo de 0.64, obteniendo una tensión promedio en la carga de 188.76V y una corriente de 2.387A, alcanzando una eficiencia en el convertidor de 91.91%.

5.3.2.3 Modo PV a Batería

En el modelo de la simulación se integró una fuente de alimentación fija de 89.5V en la entrada, mientras la batería se modeló mediante una resistencia equivalente. El modo de operación considera las resistencias internas de los componentes pasivos: inductor MSS1210H-105KED de 1000uH con una DCR de 630mΩ [70], el condensador B32653A3105

de 1000nF con una ESR de 6.5m Ω [69], y el transistor IRFB4137. Como resultado, se obtuvo una tensión de salida promedio de 69.91V y una eficiencia global de 97.94%.

5.3.2.4 Modo PV a Batería y Carga

Este modo de operación se analizó con comportamiento del panel fotovoltaico bajo condiciones constantes de irradiancia mediante una fuente de alimentación de 89.5V, considerando las resistencias internas de los componentes pasivos de los convertidores involucrados: Boost (PV a Carga) y Buck (PV a Batería). Para el convertidor de PV a carga se definieron el inductor MSS1210H-125KED y el condensador B32656A3335, mientras que para el convertidor de PV a batería se determinó el inductor MSS1210H-105KED y el condensador B32653A3105, para ambos casos se utilizó el IRFB4137 con una resistencia de conducción interna de 56m Ω [71]. La simulación incluyó dos pruebas de funcionamiento: en la primera, el convertidor PV a carga operó con un ciclo de trabajo de 0.5525 y en la segunda el convertidor PV a Batería operó con 0.8045.

La primera prueba se dirigió el 80% de la potencia del arreglo de paneles solares hacia la carga, mientras el 20% hacia la batería. Debido a la distribución de potencia del PV, se recalculó la resistencia de carga y la resistencia encargada de emular la batería, determinando una resistencia de carga de 97.6677 Ω y una resistencia de 50.6309 Ω en la batería. Se registró tensiones promedio de 190.25V hacia la carga y 70.65V a la batería, generando una eficiencia total entre los convertidores de 85.62%

En otra simulación, se evaluó el caso en el que el PV suministra el 20% de la potencia hacia la carga y el 80% hacia la batería, se recalcularon las resistencias, derivando a una resistencia de carga de 390.6708 Ω y resistencia de la batería de 12.6577 Ω . Con base en lo anterior, se obtuvieron tensiones promedio de 198.20V en la carga y de 68.50V en la batería, alcanzando una eficiencia total del convertidor del 91.24%.

5.3.2.5 Modo PV y Batería a Carga

El suministro de energía proveniente del PV y la batería hacia la carga, se evaluó mediante dos pruebas de funcionamiento, considerando las pérdidas asociadas a los de los convertidores. Para ello, se seleccionaron los modelos comerciales más cercanos a los valores de diseño: en el convertidor PV a carga se empleó un inductor MSS1210H-125KED de 1200uH [70] y un condensador B32656A3335 de 3300nF [69], mientras que, en el convertidor de Batería a carga, se utilizó un inductor MSS1210H-105KED de 1000uH y un condensador B32656A3335 de 3300nF. En ambos convertidores se integró el transistor IRFB4137 [71] y el diodo MUR840 [72], las pruebas se realizaron considerando diferentes porcentajes de potencia suministrada por el PV y la batería hacia una carga de 78.134 Ω .

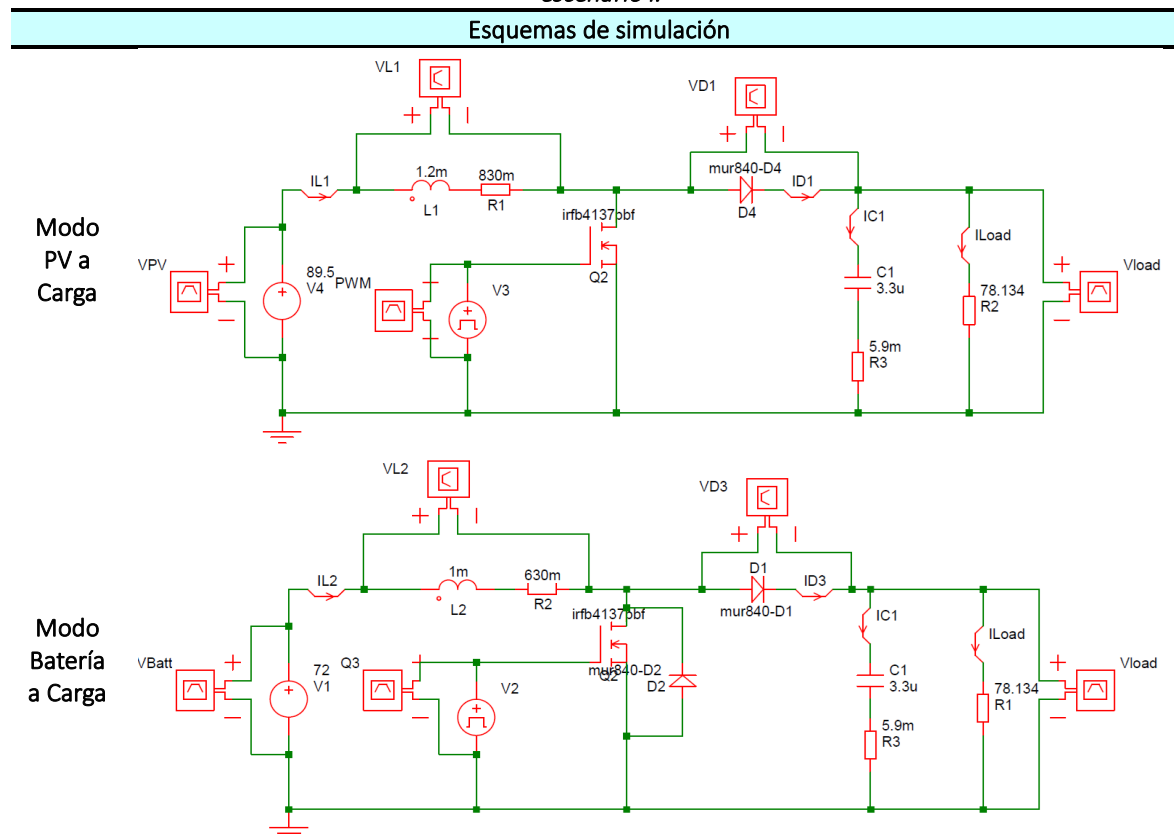
Para la primera condición de prueba, se estableció un suministro del 80% de la potencia del arreglo de paneles bajo el primer convertidor Boost con una tensión de entrada resultante de 80.05V, un ciclo de trabajo del 0.5997. El 20% restante de la potencia fue aportada por la batería mediante el segundo convertidor, operando con una tensión de entrada de 32.19V,

un ciclo de trabajo de 0.8390. Como resultado, se obtuvo una tensión promedio de 187.69V, una corriente promedio de 2.40A y una eficiencia total del 91.32%.

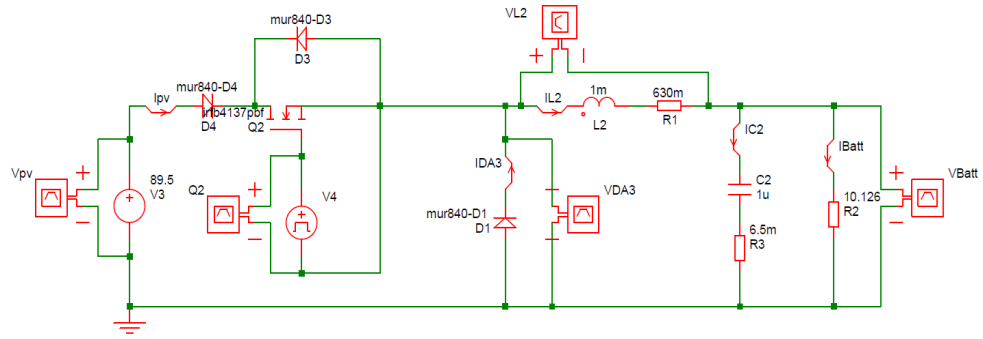
En la prueba posterior, se contempló un suministro del 20% de potencia del PV hacia la carga, con una tensión de entrada de 40.02V, un ciclo de trabajo del 0.5997. El 80% provino del almacenamiento en la batería, con una tensión de 64.39V y un ciclo de trabajo de 0.8390, obteniendo una tensión promedio de 186.28V una corriente de 2.38A hacia la carga, estimando una eficiencia de 90.30%.

5.3.2.6 Síntesis operativa y resultados del escenario con irradiancia constante

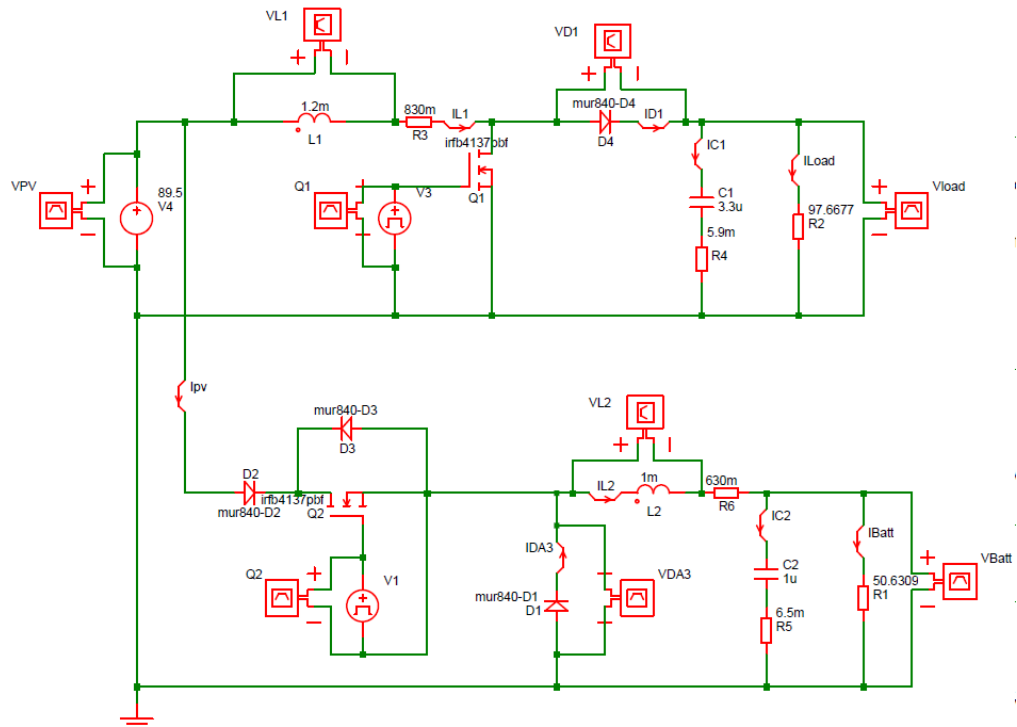
Tabla.7 Esquemas de simulación del convertidor bidireccional en esquema paralelo correspondientes al escenario I.



Modo
PV a
Batería



Modo
PV a
Batería
y Carga



Modo
PV y
Batería
a Carga

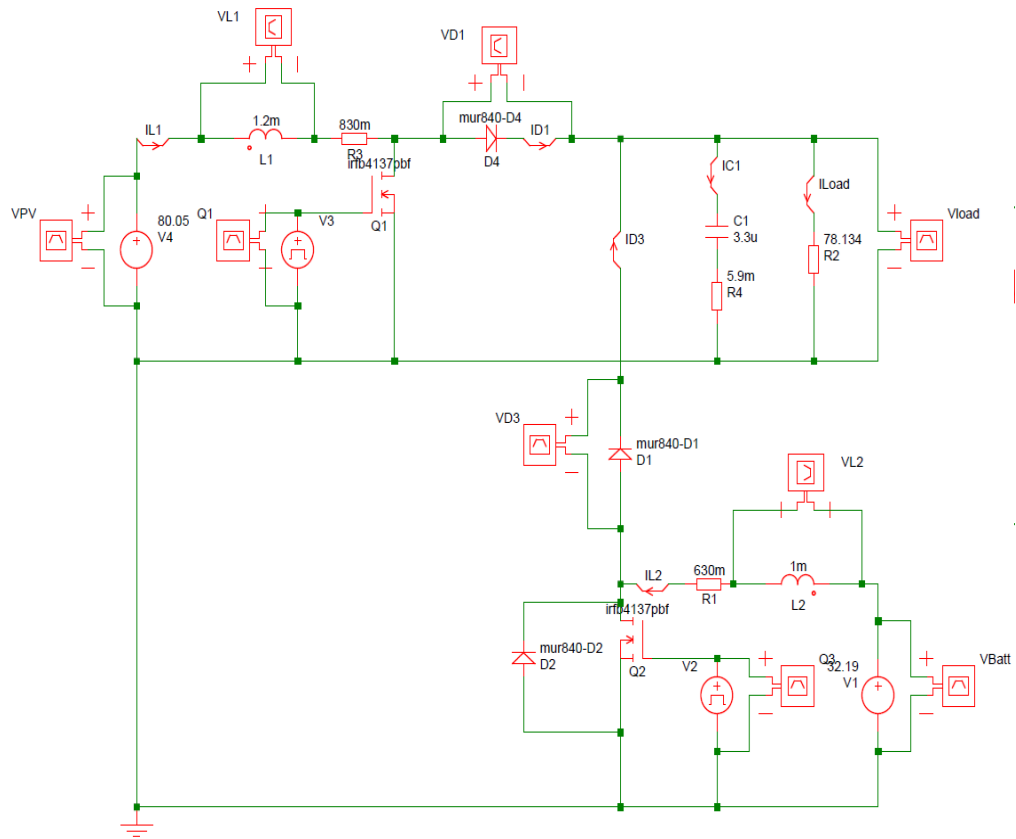


Tabla.8 Resultados eléctricos promedio del convertidor bidireccional en esquema paralelo bajo escenario I.

Escenario	Modos de operación	%	Tensión de entrada promedio [V]	Corriente de entrada promedio [A]	Tensión de salida promedio [V]	Corriente de salida promedio [A]	Eficiencia [%]
I	PV a Carga	100	89.5	5.4905872	187.93825	2.4053325	91.99
	Batería a Carga	100	72	6.7819021	188.76551	2.3775247	91.91
	PV a Batería	100	89.5	5.4245392	69.919761	6.8010187	97.94
		80		4.4459722	190.25071	1.9479388	85.62
	PV a Batería y Carga	20		1.1984285	70.65847	1.3955602	
		20	89.5	1.1821939	198.20523	0.50734591	91.24
		80		4.3146015	68.501276	5.4118265	
		80	80.05	5.2420062			
	PV y Batería a Carga	20	32.19	2.3010683	187.69238	2.4021857	91.32
		20	40.02	2.5940347			
		80	64.39	6.0259176	186.28659	2.3841937	90.30

5.3.3 Escenario II: Simulación considerando pérdidas pasivas bajo condiciones variables de irradiancia

Este escenario representa una simulación integral que incorpora las variaciones de irradiancia solar, obtenidas a partir de la Red de Meteorología y Radiación Solar [73], junto con las pérdidas eléctricas asociadas a los componentes pasivos del sistema, incluyendo la resistencia interna de conducción del transistor. La variabilidad del arreglo fotovoltaico se modeló en el software PSIM, conforme a lo descrito en la sección 5.2. Los datos presentados en el repositorio digital de acceso en la misma sección se emplearon posteriormente en el entorno SIMetrix como fuente de tensión variable conformada por 256 puntos de datos, con el objetivo de realizar simulaciones dinámicas de los diferentes modos de operación durante 25 días preseleccionados. A partir de estas simulaciones se obtuvieron tablas de resultados con los valores promedio de tensión y corriente de entrada y salida, así como la eficiencia global del sistema, determinándose además los componentes electrónicos indicados en la Tabla.23 del Anexo A.

Finalmente, en la Tabla.9 de la Sección 5.3.3.5 se presentan los esquemas de simulación, en particular, el escenario II se caracteriza por utilizar una fuente de tensión variable. No obstante, en el modo V de operación, se establece un porcentaje específico de potencia suministrada por cada fuente, utilizando fuentes de tensión fija para representar dicha condición.

En síntesis, para el convertidor bidireccional en esquema paralelo correspondiente al escenario II, se recopilaban los resultados eléctricos promedio considerando pérdidas pasivas y condiciones de irradiancia constante y variable. Dichos resultados se presentan en la Tabla.10 de la Sección 5.3.3.5.

5.3.3.1 Modo PV a Carga

El modelo de simulación consideró las pérdidas internas de los componentes pasivos seleccionados incluyendo el inductor MSS1210H-125KED [70], el condensador B32656A3335 [69] y el IRFB4137 con una resistencia interna de 56m Ω [71]. La alimentación del convertidor se implementó como una fuente de tensión variable, basada en los datos de generación de la sección 5.2, a partir de las 25 pruebas realizadas con distintos comportamientos del sistema fotovoltaico, se determinaron los valores promedio de tensión y corriente mostrados en la Tabla.24 y se ilustra un ejemplo del comportamiento del convertidor en la Fig.52 del Anexo A del día 3 de septiembre de 2023. Se registraron las tensiones promedio del convertidor, obteniéndose 48.25V en la entrada y en la salida 102.94V, con una eficiencia de operación estimada del 93.49%.

5.3.3.2 Modo PV a Batería

La simulación contempló una fuente de tensión variable definida por 25 pruebas expresadas en la sección 5.2, mientras la batería se representó mediante una resistencia equivalente de 10.126 Ω . El modo de operación simulado incorporó las pérdidas internas de los componentes pasivos correspondientes a los elementos pasivos utilizados: inductor MSS1210H-105KED [70], el condensador B32653A3105 de 1000nF [69] y el transistor

IRFB4137 [71]. El convertidor Buck opera con un ciclo de trabajo de 0.8044, asimismo se generó en el Anexo A un registro de resultados promedio mostrado en la Tabla.25 y en la Fig.53 se ilustra un ejemplo del comportamiento del convertidor. Se obtuvo una tensión de batería promedio de 36.84V y una eficiencia del sistema de 93.97%.

5.3.3.3 Modo PV a Batería y Carga

En el modelo de simulación se examinó el comportamiento del sistema fotovoltaico bajo condiciones variables de irradiancia (en la sección 5.2), considerando las resistencias internas de los componentes pasivos de los convertidores involucrados: Boost (PV a Carga) y Buck (PV a Batería), definidas previamente en el escenario I. La simulación incluyó dos pruebas de funcionamiento: en la primera, el convertidor PV a carga operó con un ciclo de trabajo de 0.5525 y en la segunda el convertidor PV a batería operó con 0.8045.

En la primera prueba se evaluó el 80% de la potencia proveniente del arreglo de paneles solares hacia la carga y hacia la batería su complemento. Debido a esta distribución, se recalcularon la resistencia de carga y la resistencia de la batería, obteniendo los valores de 97.6677 Ω y 50.6309 Ω respectivamente. A partir de las tensiones variables de 25 días preseleccionados en la sección 5.2, se registró los resultados de simulación representados en la Tabla.26 Anexo A, además de generar las formas de onda de tensión y corriente para cada uno de los días seleccionados, sin embargo, se muestra en la Fig.54 un ejemplo del comportamiento del convertidor del día 03 de septiembre de 2023. Los resultados revelan una tensión promedio de 103.58V en la carga y 48.06V en la batería, con una eficiencia estimada de 92.03%, y una tensión promedio de entrada de 48.25V.

Para la segunda condición de prueba, se consideró un suministro de 20% de la potencia en el PV hacia la carga y el 80% hacia la batería, se recalculó las resistencias, derivando a una resistencia de carga de 390.6708 Ω y resistencia de la batería de 12.6577 Ω . Los resultados de simulación se presentan en la Tabla.27 del Anexo A, con un ejemplo de comportamiento mostrado en la Fig.55. En este escenario, la tensión promedio de salida alcanzó 114.31V en la carga y 37.08V en la batería, estimándose una eficiencia del convertidor del 92.80%.

5.3.3.4 Modo PV y Batería a Carga

El suministro de energía desde el sistema fotovoltaico y la batería hacia la carga se evaluó considerando dos fuentes de alimentación bajo condiciones variables, así como las pérdidas eléctricas en los elementos pasivos de los convertidores. Para el análisis del funcionamiento del sistema se definieron dos pruebas: en la primera, el 80% de la potencia fue suministrada por el PV y el 20% por la batería; en la segunda, se invirtieron los porcentajes de aporte, manteniendo una carga resistiva de 78.134 Ω

Para evaluar el funcionamiento del convertidor bidireccional se definieron dos pruebas basadas en suministrar el 80% de la potencia producida por el PV, el 20% de la potencia almacenada en la batería y viceversa, con la potencia dirigida a una carga resistiva de 78.134 Ω . Se definieron los modelos comerciales más cercano al diseño: el convertidor de PV a carga el inductor MSS1210H-125KED, el condensador B32656A3335, para el convertidor de

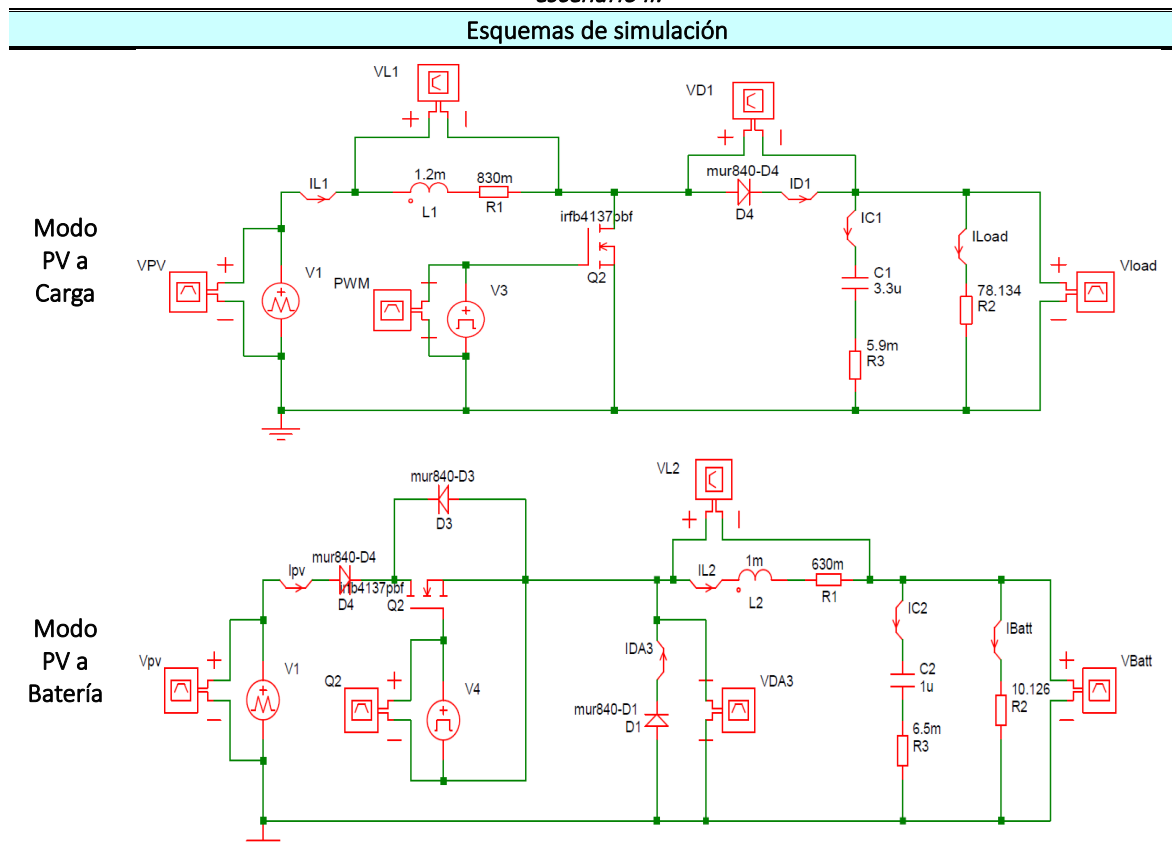
Batería a carga el inductor MSS1210H-105KED, el condensador B32656A3335, para ambos convertidores se definió el transistor IRFB4137 [71].

Durante la primera prueba preliminar, se suministró el 80% de la irradiancia máxima al sistema, operando el primer convertidor Boost con una tensión de entrada de 79.45V y un ciclo de trabajo del 0.8774, el restante de la potencia fue suministrado por la batería mediante el segundo convertidor Boost, el cual presentó una tensión de entrada de 7.65V y un ciclo de trabajo de 0.7385. Como resultado, se obtuvo en la carga una tensión de 185.40V, una corriente de 2.37A y una eficiencia del 89.91%, el comportamiento de sus formas de onda correspondientes se muestra en la Fig.56 del Anexo A.

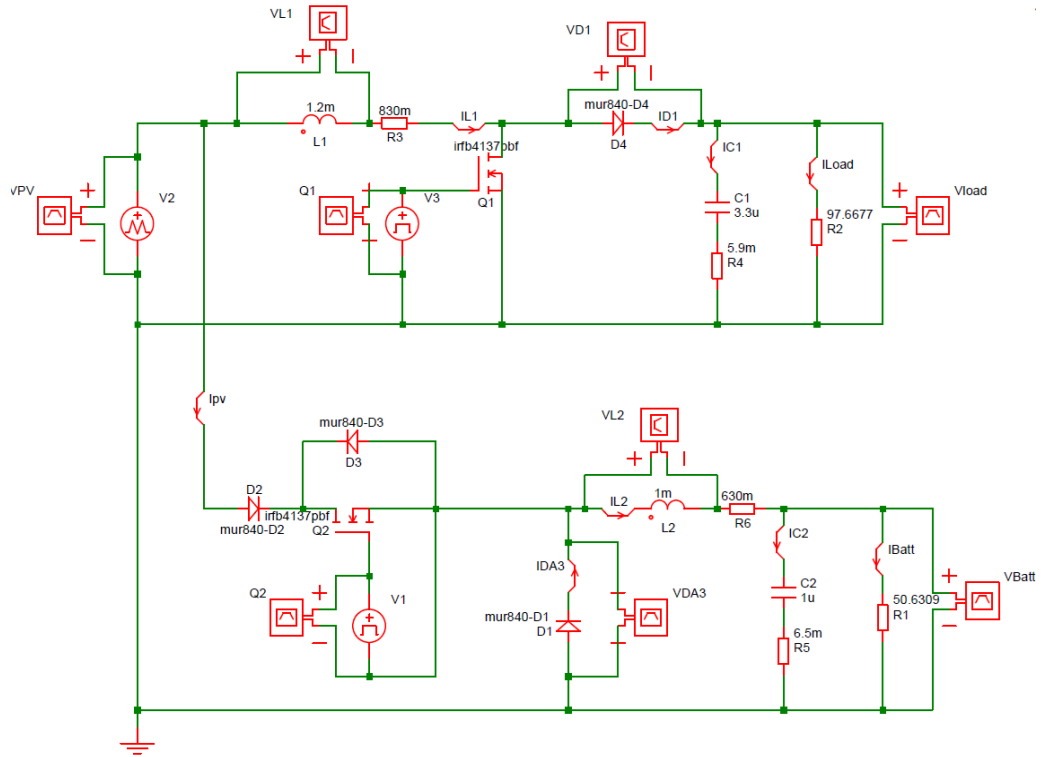
En la segunda prueba se suministró la potencia del sistema fotovoltaico al recibir el 20% de la irradiancia con una tensión de entrada resultante de 24.51V y un ciclo de trabajo del 0.8774, mientras el 80% es proveniente del almacenamiento en la batería con una tensión de 52.28V y un ciclo de trabajo de 0.7385. Generando las formas de onda correspondientes en la Fig.57 del Anexo A y alcanzando un suministro hacia la carga con tensión promedio de 178.05V, una corriente de 2.27A y una eficiencia del 85.68%.

5.3.3.5 Síntesis operativa y resultados del escenario con irradiancia variable

Tabla.9 Esquemas de simulación del convertidor bidireccional en esquema paralelo correspondientes al escenario II.



Modo
PV a
Batería
y Carga



Modo
PV y
Batería
a Carga

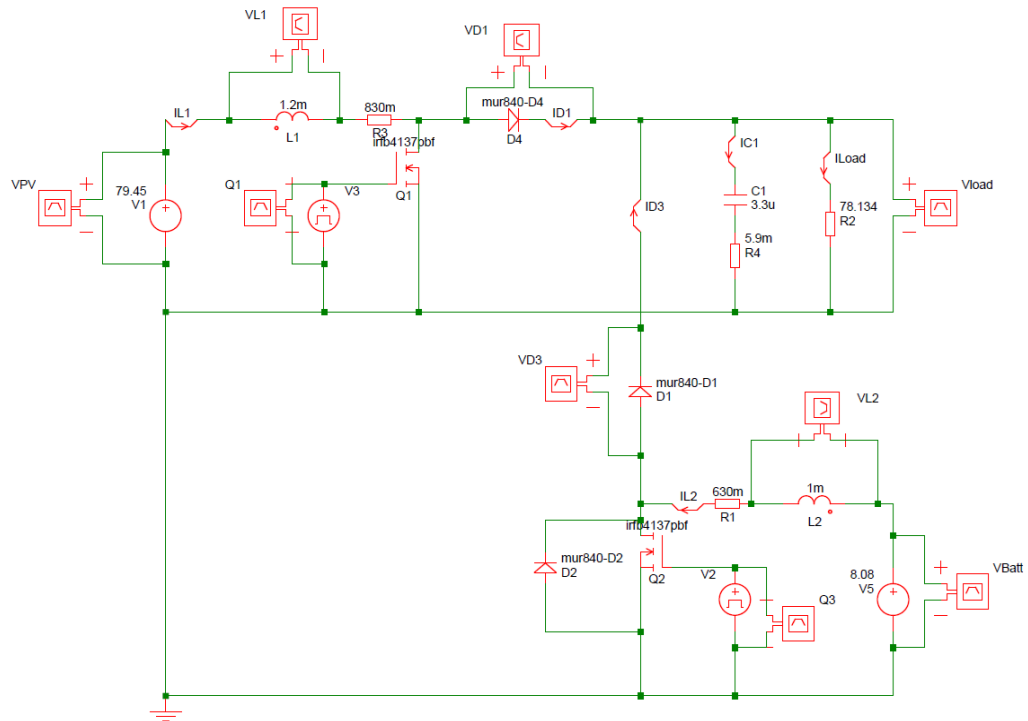


Tabla.10 Resultados eléctricos promedio del convertidor bidireccional en esquema paralelo bajo escenario II.

Escenario	Modos de operación	%	Tensión de entrada promedio [V]	Corriente de entrada promedio [A]	Tensión de salida promedio [V]	Corriente de salida promedio [A]	Eficiencia [%]
II	PV a Carga	100	48.25330876	2.966702382	102.9485637	1.3000814	93.49
	Batería a Carga	100	72	6.7819021	188.76551	2.3775247	91.91
	PV a Batería	100	48.25330876	2.929437364	36.84080436	3.605877025	93.97
	PV a Batería y Carga	80	48.25330876	2.40630488	103.5806211	1.060170771	92.03
		20		0.609663445	48.06716452	0.752072878	
		20		0.705310334	114.3142771	0.292610202	92.80
		80		2.373694408	37.08041096	2.9168341	
		80		79.45	6.0279138	185.40006	89.91
		20		7.65	1.35511		
	PV y Batería a Carga	20	24.51	2.6141195	178.0551	2.2788427	85.68
		20	24.51	2.6141195			
		80	52.28	7.8321028			

5.3.4 Análisis de eficiencia del convertidor bidireccional en esquema paralelo

El análisis de la eficiencia del convertidor bidireccional se centra en evaluar su desempeño energético bajo distintos modos de operación y condiciones de irradiancia. Para ello, se consideran dos escenarios de simulación: uno con irradiancia constante y otro con irradiancia variable, incorporando en ambos casos las pérdidas pasivas asociadas a los elementos del sistema. La eficiencia se analiza a partir del flujo de potencia entre las diferentes fuentes y la carga, lo que permite identificar el impacto del esquema paralelo en el procesamiento de energía. Asimismo, se comparan los niveles de eficiencia alcanzados en cada modo de operación, este análisis contribuye a validar la eficiencia del convertidor propuesto en ambos escenarios, cuyos resultados se recopilan en la Tabla.11.

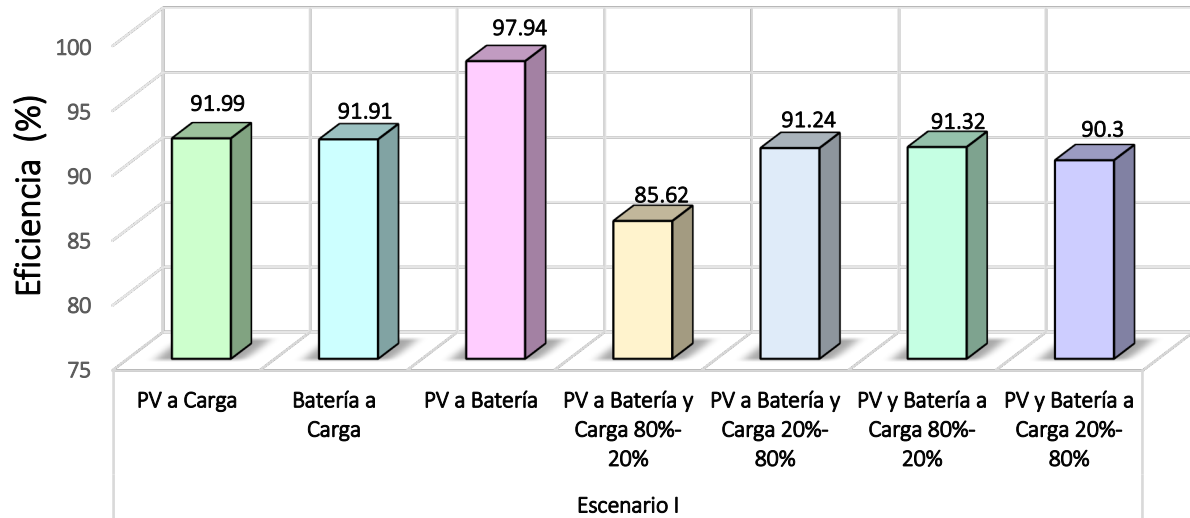
Adicionalmente, se consideran dos rutas principales de procesamiento de energía. La primera corresponde al suministro directo de potencia a la carga a través del convertidor CD-CD con MPPT, cuando la generación solar es suficiente. En este caso, el modo de operación PV a Carga presenta una eficiencia de 91.99% bajo irradiancia constante y de 93.49% bajo condiciones de irradiancia variable. La segunda ruta está asociada al almacenamiento de energía en la batería mediante el convertidor bidireccional para su uso posterior, abarcando los modos PV a Batería y Batería a Carga, los cuales alcanzan una eficiencia de 90.02% en el escenario de irradiancia constante y de 86.36% en el escenario de irradiancia variable.

Tabla.11 Resultados eléctricos promedio del convertidor bidireccional en esquema paralelo bajo los escenarios de simulación (SIMetrix).

Escenario	Modos de operación	%	Tensión de entrada promedio [V]	Corriente de entrada promedio [A]	Tensión de salida promedio [V]	Corriente de salida promedio [A]	Eficiencia [%]
I	PV a Carga	100	89.5	5.4905872	187.93825	2.4053325	91.99
	Batería a Carga	100	72	6.7819021	188.76551	2.3775247	91.91
	PV a Batería	100	89.5	5.4245392	69.919761	6.8010187	97.94
		80		4.4459722	190.25071	1.9479388	85.62
	PV a Carga	20		1.1984285	70.65847	1.3955602	
	Batería y Carga	20	89.5	1.1821939	198.20523	0.50734591	91.24
		80		4.3146015	68.501276	5.4118265	
		80	80.05	5.2420062			91.32
	PV y Batería a Carga	20	32.19	2.3010683	187.69238	2.4021857	
		80	40.02	2.5940347			90.30
II	PV a Carga	100	48.25330876	2.966702382	102.9485637	1.3000814	93.49
	Batería a Carga	100	72	6.7819021	188.76551	2.3775247	91.91
	PV a Batería	100	48.25330876	2.929437364	36.84080436	3.605877025	93.97
		80		2.40630488	103.5806211	1.060170771	92.03
	PV a Carga	20		0.609663445	48.06716452	0.752072878	
	Batería y Carga	20	48.25330876	0.705310334	114.3142771	0.292610202	92.80
		80		2.373694408	37.08041096	2.9168341	
		80	79.45	6.0279138	185.40006	2.3728475	89.91
	PV y Batería a Carga	20	7.65	1.35511			
		80	24.51	2.6141195	178.0551	2.2788427	85.68

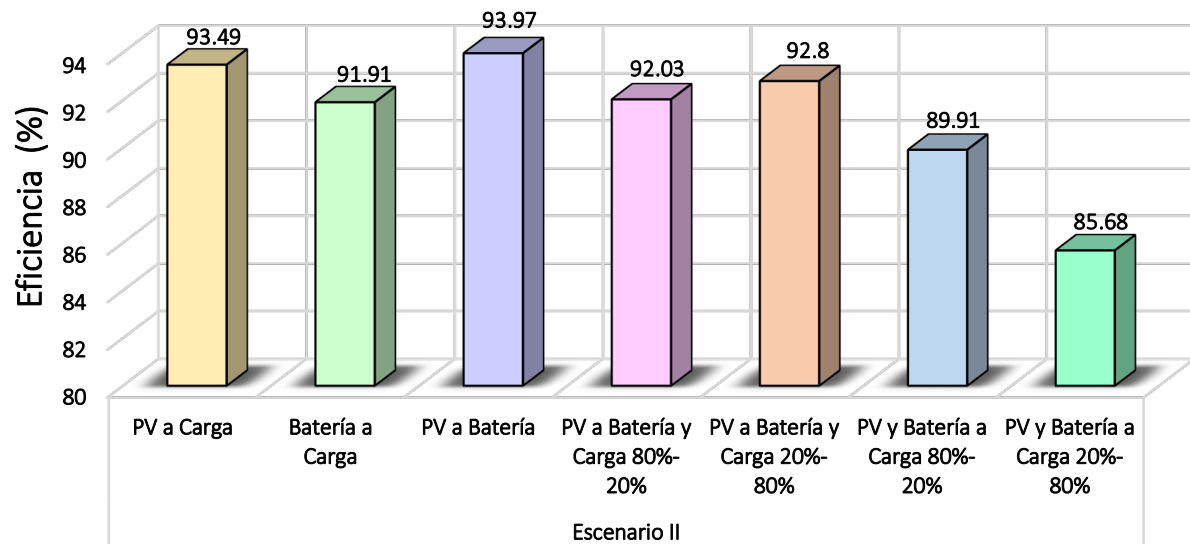
Es importante señalar que el símbolo (%) hace referencia al porcentaje de potencia procesada por cada convertidor. En particular, en el modo PV a Batería y Carga, al operar simultáneamente dos convertidores, la potencia total de salida se distribuye entre ambos de manera que, en conjunto, representan el 100% de la potencia suministrada a la carga, tal como se ilustra en la Fig.47.

Escenario I: Eficiencia del sistema fotovoltaico autónomo en esquema paralelo.



(a)

Escenario II: Eficiencia del sistema fotovoltaico autónomo en esquema paralelo.



(b)

Fig.47 Eficiencia del sistema fotovoltaico autónomo en esquema paralelo: (a) escenario I y (b) escenario II.

5.4 Análisis comparativo del sistema fotovoltaico autónomo en esquema tradicional y paralelo

5.4.1 Introducción

Los sistemas fotovoltaicos autónomos suelen implementarse bajo un esquema tradicional de conexión que comprende diversas etapas de conversión, las cuales garantizan el adecuado flujo de energía desde la captación solar hasta el consumo final del usuario. No obstante, el esquema paralelo surge como una alternativa que permite un flujo de energía bidireccional, adaptándose de manera más flexible a la disponibilidad del recurso solar, a la demanda de la carga y a las estrategias de control, lo que posibilita la reducción del número de etapas de conversión y, potencialmente, una mejora en la eficiencia global del sistema. En este contexto, se realiza un análisis comparativo entre ambos esquemas de conexión.

En la Sección 5.4.2 se presenta la simulación del sistema bajo el esquema tradicional, evaluado en dos escenarios de operación: irradiancia constante e irradiancia variable, considerando tres procesos de conversión de energía desde la captación solar hasta la carga. Posteriormente, en la Sección 5.4.3 se recopilan los resultados obtenidos en la Sección 5.3, donde se evalúa únicamente la segunda ruta de procesamiento del convertidor bidireccional, enfocada en el almacenamiento de energía en baterías y su posterior suministro a la carga, empleando dos procesos de conversión de energía.

Finalmente, en la Sección 5.4.4 se presenta una síntesis comparativa de las simulaciones correspondientes a los esquemas tradicional y paralelo, analizando la eficiencia asociada a cada uno de los procesos de conversión. Asimismo, en la Sección 5.5 se integra el análisis comparativo general de ambos esquemas de conexión, con el objetivo de identificar la configuración con mayor eficiencia en un sistema fotovoltaico autónomo bajo condiciones de irradiancia constante y variable, a partir de datos de irradiancia obtenidos de la REDMET.

5.4.2 Simulación del sistema fotovoltaico autónomo en esquema tradicional

El esquema tradicional se presenta en la Fig.48, el cual contempla un procesamiento de energía continuo desde la captación de la energía solar hasta el suministro final, sin considerar la conversión a corriente alterna. En este esquema, el flujo de energía se lleva a cabo a través de los procesos PV a Bus CD, Bus CD a Batería y Batería a Carga, los cuales permiten evaluar el desempeño global del sistema fotovoltaico autónomo.

La simulación del sistema se realizó bajo dos escenarios de operación: irradiancia constante e irradiancia variable, considerando las mismas características eléctricas del sistema fotovoltaico y del sistema de almacenamiento previamente definidas en la Sección 5.1. Asimismo, se estableció un tiempo de simulación de 25ms y se emplearon los dispositivos electrónicos MUR840 [72] e IRFB4137 [71], seleccionados a partir del análisis de circuitos cuyos resultados se presentan en Tabla.28 del Anexo A. Con base en los valores obtenidos, se determinó el uso de dichos componentes, los cuales se recopilan en la Tabla.3 de la Sección 5.1.

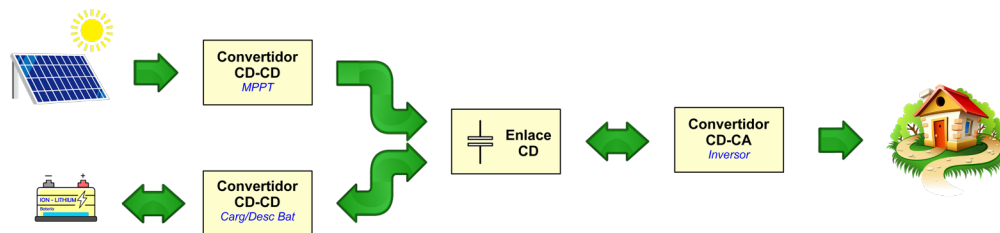


Fig.48 Representación a bloques de un sistema fotovoltaico autónomo en esquema tradicional.

5.4.2.1 Escenario I: Condiciones constantes de irradiancia

Se simularon las tres etapas de un esquema tradicional considerando pérdidas pasivas y de conducción, con modelos comerciales de los componentes (Tabla.3, sección 5.1). Los parámetros de operación se obtuvieron del análisis de circuitos los valores finales de los componentes del Anexo A (Tabla.28). Los modelos y resultados de simulación del escenario se presentan en la Sección 5.4.2.1.4, empleando una fuente de tensión fija para emular la tensión constante.

5.4.2.1.1 Modo PV a Bus CD

La etapa representada PV a Bus CD incorporó las resistencias internas de los componentes seleccionados tales como: el inductor MSS1210H-125KED con DCR de 830mΩ [70], el condensador B32656A3335 con ESR de 5.9mΩ [69], y el transistor IRFB4137 con una resistencia de conducción interna de 56mΩ, se utilizó una fuente de tensión fija de 89.5V. Como resultado, se obtuvo una tensión promedio en el Bus CD de 188.05V y una corriente de 2.40A, generando una eficiencia del sistema del 92.16%.

5.4.2.1.2 Modo Bus CD a Batería

Durante el suministro de energía hacia la batería se consideró las resistencias internas de los componentes pasivos: inductor MSS1210H-105KED de 1000uH con DCR de 630mΩ [70], el condensador B32653A3105 de 1000nF con ESR de 6.5mΩ [69], y el transistor IRFB4137. Se contempló una fuente de tensión fija de 200V y un ciclo de trabajo de 0.36, obteniendo una tensión promedio en la batería de 66.57V y una corriente de 6.57A, estimando una eficiencia del sistema de 86.57%.

5.4.2.1.3 Modo Batería a Carga

La transmisión de energía hacia la carga como etapa final incluyó las resistencias internas los modelos comerciales utilizados: inductor MSS1210H-105KED de 1000uH [70], el condensador B32656A3335 [69], y el transistor IRFB4137. Se utilizó una fuente de tensión fija de 72V y un ciclo de trabajo de 0.64, alcanzando una tensión promedio en la carga de 185.84V y una corriente de 2.38A, alcanzando una eficiencia del sistema del 83.37%.

5.4.2.1.4 Síntesis operativa y resultados del Escenario I

Tabla.12 Modelos de simulación del sistema fotovoltaico autónomo en esquema tradicional bajo Escenario I.

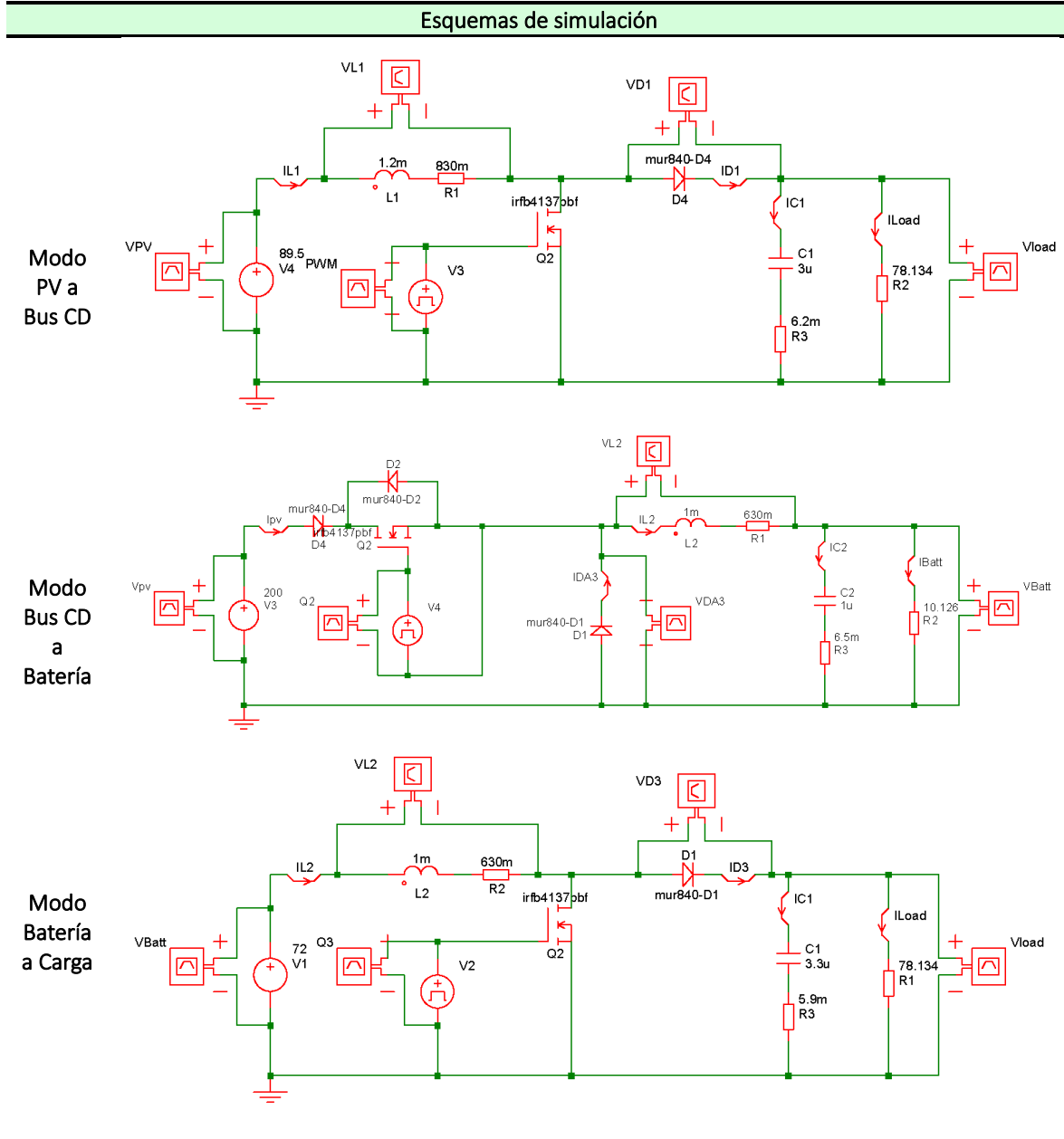


Tabla. 13 Resultados eléctricos promedio de convertidor en esquema tradicional bajo escenario I.

Escenario	Modo de operación	Tensión de entrada promedio [V]	Corriente de entrada promedio [A]	Tensión de salida promedio [V]	Corriente de salida promedio [A]	Eficiencia [%]
I	PV a Bus CD	89.5	5.4871021	188.05734	2.4068567	92.16
	Bus CD a Batería	200	2.4128839	66.578523	6.2750073	86.57
	Batería a Carga	72	6.7755204	185.84093	2.1884899	83.37

5.4.2.2 Escenario II: Condiciones variables de irradiancia

Se simuló el comportamiento del sistema fotovoltaico autónomo considerando la variabilidad del arreglo, obtenida mediante PSIM en la sección 5.2. Los datos obtenidos se emplearon en SIMetrix como fuente de tensión variable, con el fin de realizar simulaciones de análisis dinámico, además de determinar los valores de los componentes electrónicos especificados en la Tabla.28 del Anexo A. Los modelos de simulación correspondientes a este escenario se presentan en la Sección 5.4.2.2.2. Es importante destacar que, dado que los modos Bus CD a Batería y Batería a Bus CD no dependen de la irradiancia variable, se emplean los mismos datos de simulación utilizados en la Sección 5.4.2.1.

5.4.2.2.1 Modo PV a Bus CD

La etapa integró las pérdidas internas de los modelos comerciales seleccionados: inductor MSS1210H-125KED de 1200uH [70], el condensador B32656A3335 de 3300nF [69] y el IRFB4137 [71]. Se implementó una fuente de tensión variable, dependiente de los datos de generación de la sección 5.2, obteniéndose un valor promedio de tensión de 48.25 en el sistema PV y 102.94V en el bus CD, estimando una eficiencia de operación del 93.49%..

5.4.2.2.2 Síntesis operativa y resultados del Escenario II

Tabla. 14 Modelos de simulación del sistema fotovoltaico autónomo en esquema tradicional bajo Escenario II.

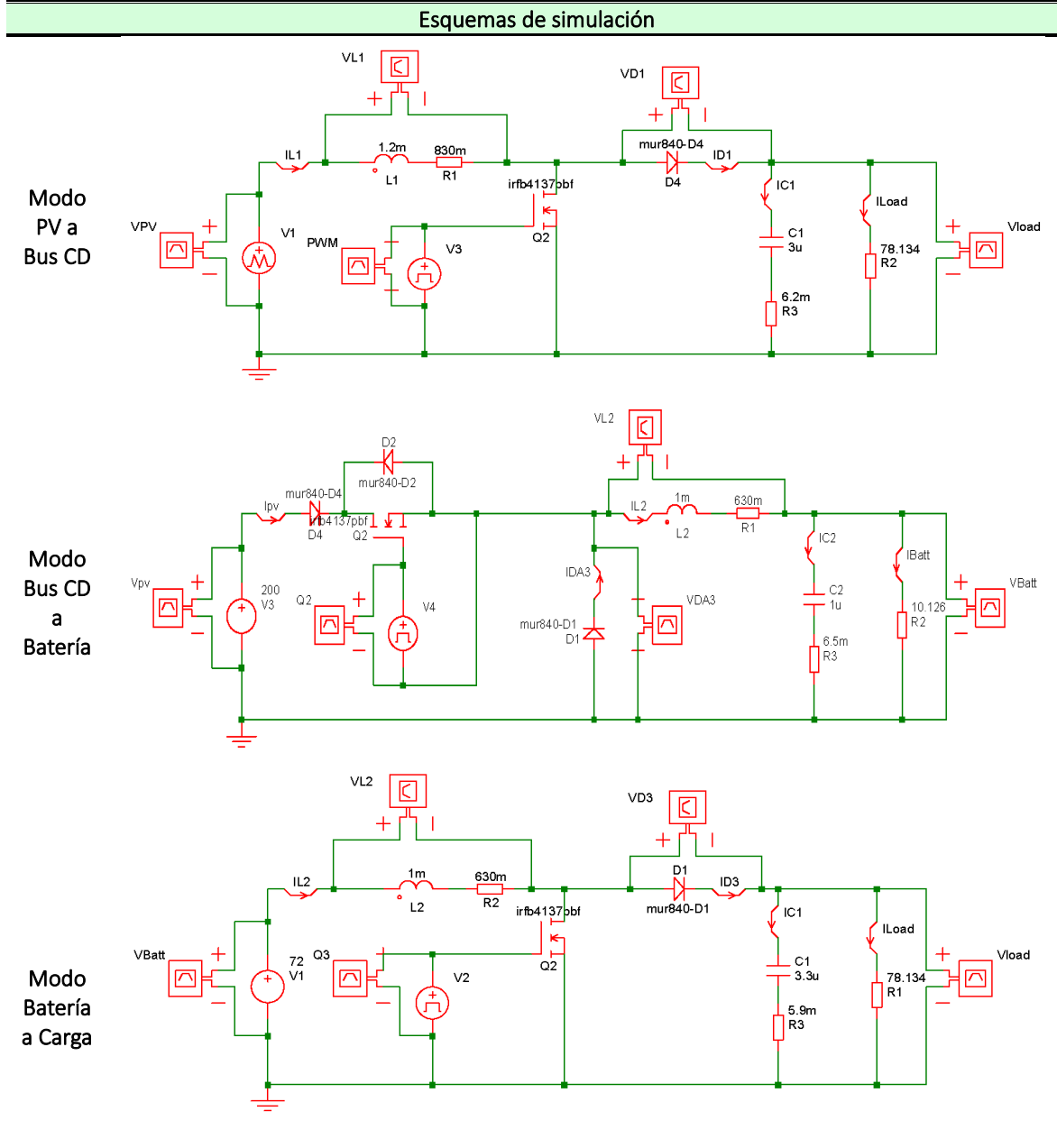


Tabla. 15 Resultados eléctricos promedio de convertidor en esquema tradicional bajo escenario II.

Escenario	Modo de operación	Tensión de entrada promedio [V]	Corriente de entrada promedio [A]	Tensión de salida promedio [V]	Corriente de salida promedio [A]	Eficiencia [%]
II	PV a Bus CD	48.25330876	2.96670238	102.948563	1.3000814	93.49
	Bus CD a Batería	200	2.4128839	66.578523	6.2750073	86.57
	Batería a Carga	72	6.7755204	185.84093	2.1884899	83.37

5.4.2.3 Análisis de eficiencia del sistema fotovoltaico autónomo en esquema tradicional

El procesamiento de energía del esquema tradicional se compone de tres etapas, desde la captación de la energía solar hasta el consumo final por el usuario, sin considerar la etapa de conversión a corriente alterna. Los resultados de simulación obtenidos para los dos escenarios de operación se recopilan en la Tabla. 16.

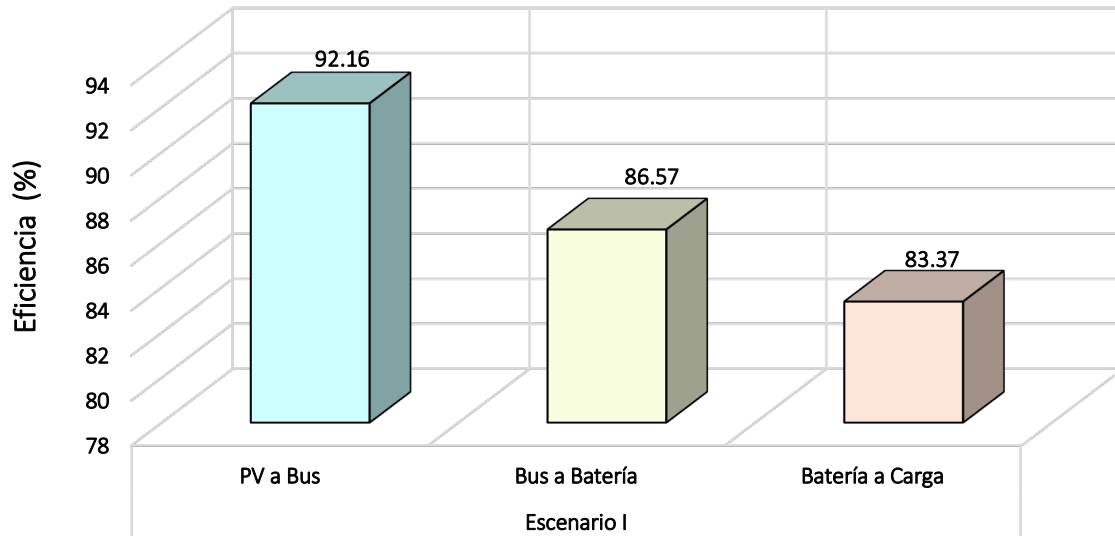
Tabla. 16 Resultados eléctricos promedio del sistema fotovoltaico autónomo en esquema tradicional bajo los escenarios de simulación (SIMetrix).

Escenario	Modo de operación	Tensión de entrada promedio [V]	Corriente de entrada promedio [A]	Tensión de salida promedio [V]	Corriente de salida promedio [A]	Eficiencia [%]
I	PV a Bus CD	89.5	5.4871021	188.05734	2.4068567	92.16
	Bus CD a Batería	200	2.4128839	66.578523	6.2750073	86.57
	Batería a Carga	72	6.7755204	185.84093	2.1884899	83.37
II	PV a Bus CD	48.25330876	2.96670238	102.948563	1.3000814	93.49
	Bus CD a Batería	200	2.4128839	66.578523	6.2750073	86.57
	Batería a Carga	72	6.7755204	185.84093	2.1884899	83.37

En el Escenario I, correspondiente a condiciones de irradiancia constante, el sistema presenta una eficiencia inicial del 92.16%, la cual disminuye progresivamente a lo largo de las etapas de procesamiento hasta alcanzar una eficiencia final de 83.37% en la carga, lo que representa una pérdida total de 8.79%. Por su parte, en el Escenario II, bajo condiciones de irradiancia variable obtenidas de la REDMET, se observa una pérdida acumulada de 10.12% desde la primera hasta la tercera etapa de conversión de energía.

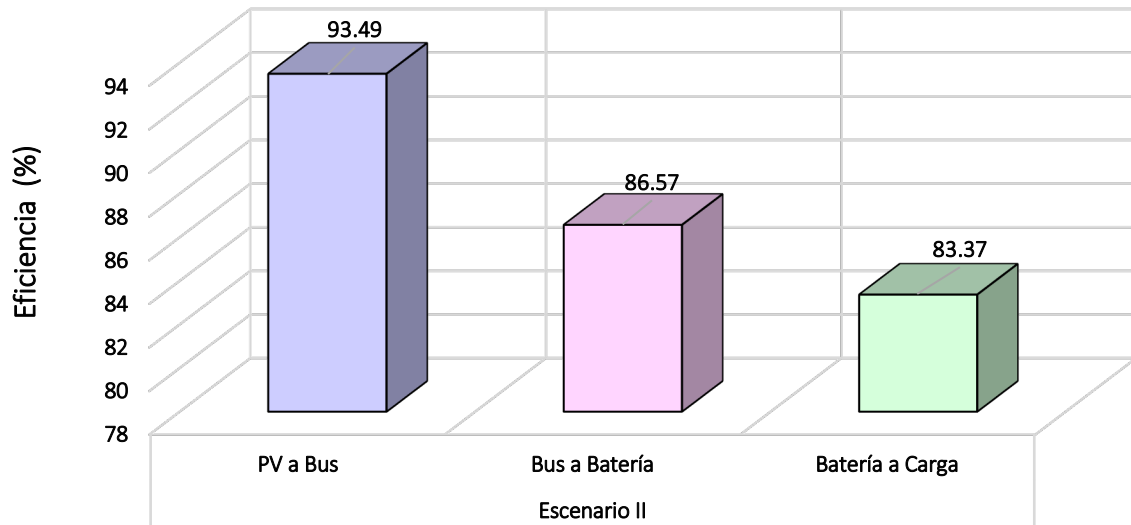
En la Fig.49 se muestran las eficiencias correspondientes a cada escenario de simulación, donde se aprecia de manera visual la disminución progresiva de la eficiencia a medida que la energía atraviesa las distintas etapas de procesamiento.

Escenario I: Eficiencia del sistema fotovoltaico autónomo en esquema tradicional.



(a)

Escenario II: Eficiencia del sistema fotovoltaico autónomo en esquema tradicional.



(b)

Fig.49 Eficiencia del sistema fotovoltaico autónomo en esquema tradicional: (a) escenario I y (b) escenario II.

5.4.3 Simulación del sistema fotovoltaico autónomo en esquema paralelo

Se simuló un sistema fotovoltaico autónomo en esquema paralelo, el cual permite dos rutas de transferencia de energía, en la cual el flujo de energía desde el PV hacia la carga, se realizó a través de un convertidor CD-CD bidireccional, considerando los modos de operación PV a Batería y Batería a Carga, descritos en detalladamente en la sección 5.3.

5.4.3.1 Escenario I: Condiciones constantes de irradiancia

Se simuló el convertidor bidireccional en esquema paralelo empleando una fuente de tensión constante, incluyendo las pérdidas pasivas basadas en modelos comerciales de condensadores, inductores y transistores, descritos en la sección 5.3.2.

5.4.3.1.1 Modo PV a Batería

Se verificó mediante simulación el funcionamiento del convertidor de PV a batería debido a la ausencia de carga, operando bajo comportamiento de un convertidor tipo Buck controlado por Q_2 , descrito en la sección 5.3.2.3. Los resultados obtenidos permitieron evaluar la eficiencia del sistema, alcanzando un valor de 97.94%.

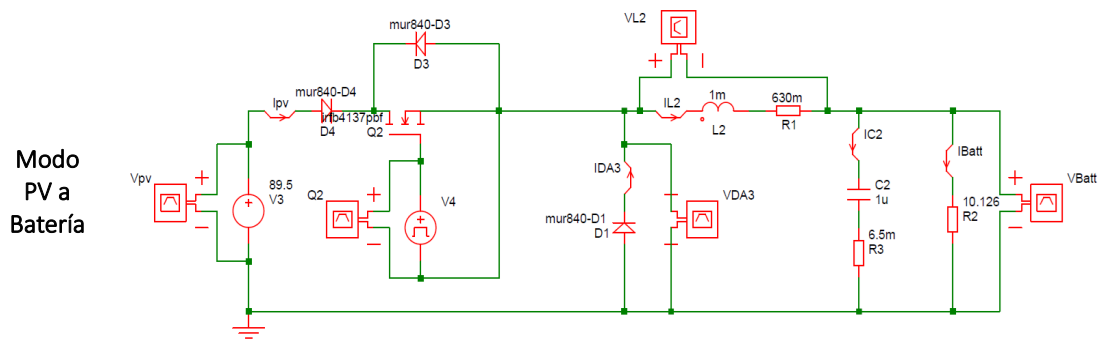
5.4.3.1.2 Modo Batería a Carga

Se tomó en cuenta la simulación de la sección 5.3.2.2, donde ante la ausencia de generación fotovoltaica, la batería alimenta a la carga operando como convertidor Boost bajo el control del transistor Q_3 . Se evaluó la eficiencia del sistema, obteniéndose un valor de 91.91%.

5.4.3.1.3 Síntesis operativa y resultados del Escenario I

Tabla.17 Modelos de simulación del sistema fotovoltaico autónomo en esquema paralelo bajo Escenario I.

Esquemas de simulación



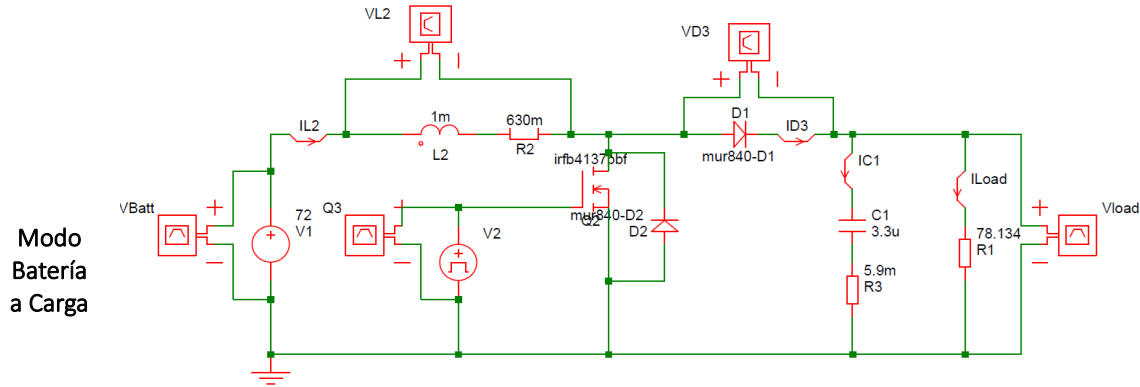


Tabla.18 Resultados promedio del convertidor bidireccional en paralelo en los Escenarios I (PV-Batería y Batería-Carga).

Escenario	Modos de operación	Tensión de entrada promedio [V]	Corriente de entrada promedio [A]	Tensión de salida promedio [V]	Corriente de salida promedio [A]	Eficiencia por etapa [%]
I	PV a Batería	89.5	5.4245392	69.919761	6.8010187	97.94
	Batería a Carga	72	6.7819021	188.76551	2.3775247	91.91

5.5.3.2 Escenario II: Condiciones variables de irradiancia

Se simuló el convertidor bidireccional bajo condiciones variables de irradiancia, otorgando una aproximación más precisa al comportamiento un sistema fotovoltaico autónomo bajo condiciones dinámicas y no ideales, además de considerar las pérdidas eléctricas asociadas a los componentes pasivos del sistema. Es importante señalar los datos mostrados pertenecen a la sección 5.3.3 descritos de manera más detallada.

5.5.3.2.1 Modo PV a Batería

Se obtuvo una eficiencia del sistema de 93.97%, derivada del análisis de simulación realizado bajo la condición de ausencia de carga, donde el convertidor operó con el comportamiento de un convertidor tipo Buck controlado por Q_2 , descrito en la sección 5.3.3.2.

5.5.3.2.2 Modo Batería a Carga

Se tomó en cuenta la simulación descrita de la sección 5.3.2.2, bajo condiciones variables de irradiancia, la batería no presentó afectación significativa; por lo tanto, se mantuvo el mismo valor que en el escenario I. Con base en los resultados obtenidos, la eficiencia del sistema se estimó en 91.91%.

5.5.3.2.3 Síntesis operativa y resultados del Escenario II

Tabla.19 Modelos de simulación del sistema fotovoltaico autónomo en esquema paralelo bajo Escenario II.

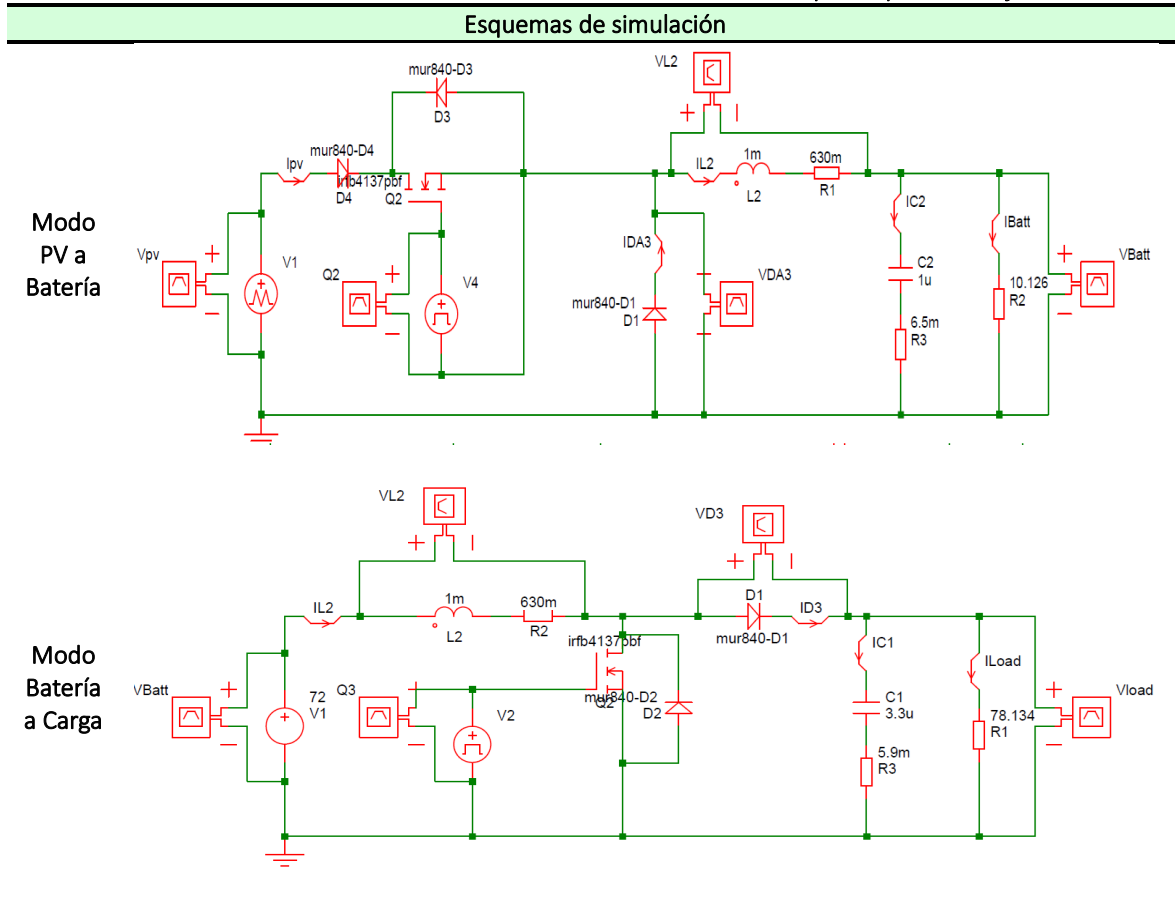


Tabla.20 Resultados promedio del convertidor bidireccional en paralelo bajo Escenario I, (PV-Batería y Batería-Carga).

Escenario	Modos de operación	Tensión de entrada promedio [V]	Corriente de entrada promedio [A]	Tensión de salida promedio [V]	Corriente de salida promedio [A]	Eficiencia por etapa [%]
II	PV a Batería	48.25330876	2.92943736	36.8408043	3.605877025	93.97
	Batería a Carga	72	6.7819021	188.76551	2.3775247	91.91

5.4.4 Síntesis comparativa del sistema fotovoltaico autónomo en esquema paralelo y tradicional

Tabla. 21 Comparativa de un sistema fotovoltaico autónomo con conexión en esquema paralelo y esquema tradicional bajo los escenarios de simulación (SIMetrix).

Escenario	Esquema	Modos de operación	Tensión de entrada promedio [V]	Corriente de entrada promedio [A]	Tensión de salida promedio [V]	Corriente de salida promedio [A]	Eficiencia por etapa [%]	Eficiencia total [%]
I	Paralelo	PV a Batería	89.5	5.4245392	69.919761	6.8010187	97.94	90.02
		Batería a Carga	72	6.7819021	188.76551	2.3775247	91.91	
	Tradicional	PV a Bus	89.5	5.4871021	188.05734	2.4068567	92.16	
		Bus a Batería	200	2.4128839	66.578523	6.2750073	86.57	
		Batería a Carga	72	6.7755204	185.84093	2.1884899	83.37	
II	Paralelo	PV a Batería	48.25330876	2.92943736	36.8408043	3.60587702	93.97	86.37
		Batería a Carga	72	6.7819021	188.76551	2.3775247	91.91	
	Tradicional	PV a Bus	48.25330876	2.96670238	102.948563	1.3000814	93.49	
		Bus a Batería	200	2.4128839	66.578523	6.2750073	86.57	
		Batería a Carga	72	6.7755204	185.84093	2.1884899	83.37	

5.5 Análisis comparativo global de desempeño

Se analizó el esquema tradicional de sistemas fotovoltaicos autónomos compuesto por cinco etapas secuenciales, garantizando estabilidad, pero con mayores pérdidas por múltiples conversiones. En contraste, el esquema paralelo ofrece una arquitectura más eficiente al permitir rutas directas de energía desde los paneles hacia la carga o el almacenamiento, reduciendo etapas y mejorando la respuesta ante variaciones de irradiancia. En relación a la disminución de etapas, al comparar ambos esquemas sin considerar la conversión CD-CA, se observa que el sistema tradicional utiliza tres etapas de procesamiento secuenciales iniciando su proceso de conversión desde el PV a Bus CD, de Bus CD a Batería y Batería a Carga, mientras el esquema paralelo opera en dos etapas de PV a Batería y Batería a Carga. En la Fig.50 se representa en diagrama de bloques las etapas.

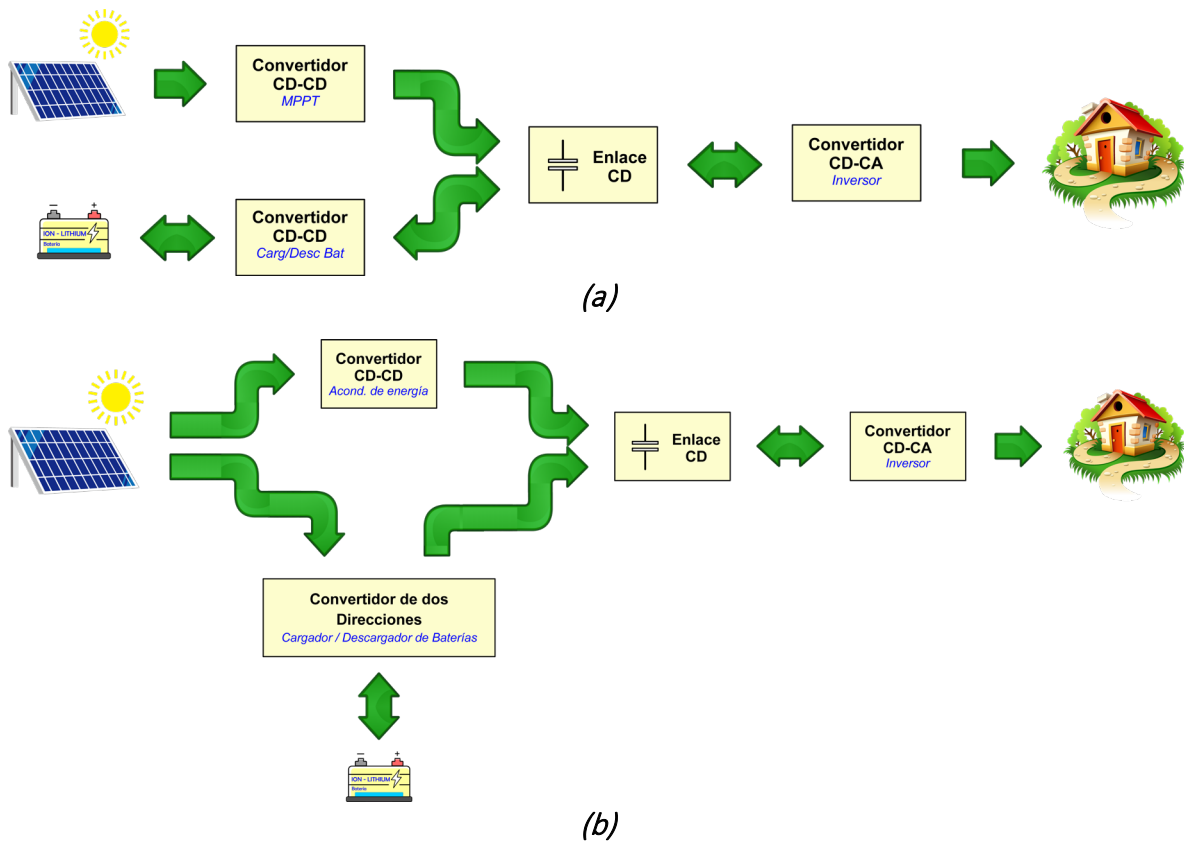
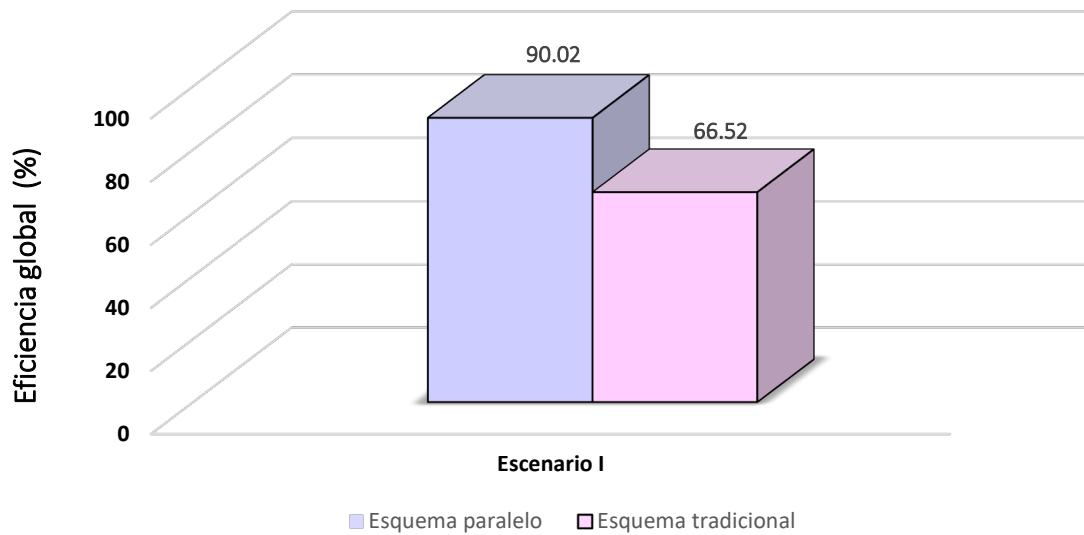


Fig.50 Representación de diagrama a bloques del procesamiento de energía de PV hacia la Carga bajo esquemas de conexión: a) Esquema tradicional, b) Esquema paralelo.

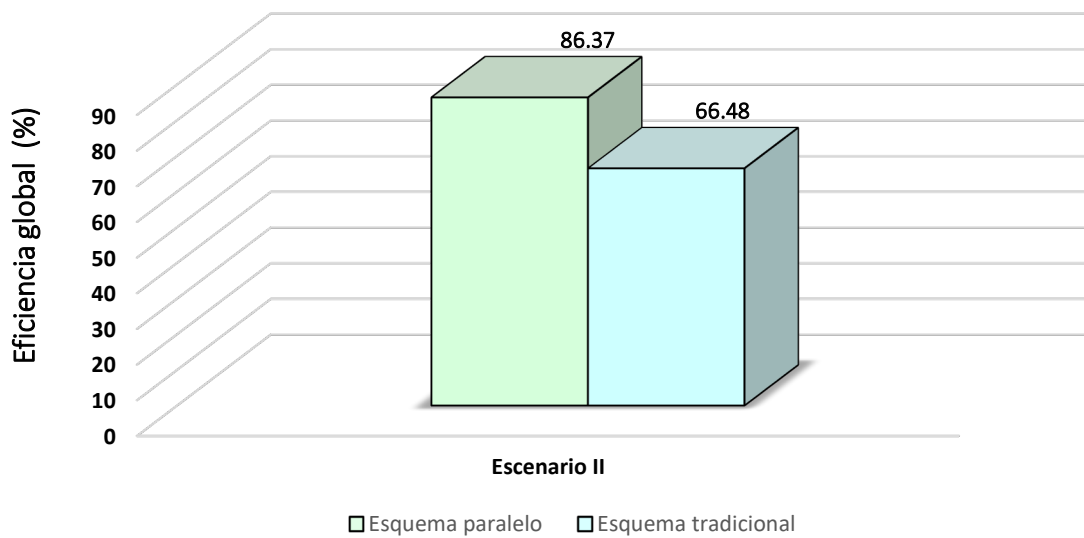
Se comparó los escenarios de simulación bajo condiciones de irradiancia constante y variable, considerando los modos de operación de PV hacia la carga en ambos esquemas de conexión, con el objetivo de estimar la eficiencia global del sistema fotovoltaico autónomo. Los resultados obtenidos se recopilan en la sección 5.4.4, mientras la presenta una representación gráfica de la eficiencia estimando en el esquema paralelo una mayor eficiencia global que el esquema tradicional. Esto se atribuye a la reducción de etapas de conversión y a la optimización de las rutas de energía, permitiendo un suministro más directo desde el PV hacia la carga y el sistema de almacenamiento.

Eficiencia energética de los esquemas tradicional y paralelo (Escenario I)



(a)

Eficiencia energética de los esquemas tradicional y paralelo (Escenario II)



(b)

Fig.51 Eficiencia del sistema fotovoltaico autónomo en esquema tradicional y paralelo: (a) escenario I y (b) escenario II.

Capítulo 6:

Conclusiones

En el presente capítulo se presenta la conclusión general derivada del análisis comparativo de los resultados obtenidos mediante simulación de la topología del convertidor bidireccional en esquema paralelo y del esquema tradicional aplicado a un sistema fotovoltaico autónomo. A partir de esta comparación, se sintetizan los principales hallazgos relacionados con la eficiencia global y el comportamiento operativo de ambos esquemas.

Finalmente, el capítulo plantea las líneas de trabajo futuro que permitirán profundizar y ampliar el alcance de la presente investigación, considerando posibles mejoras en el diseño, la implementación experimental y la aplicación del convertidor bidireccional en escenarios operativos más complejos.

6.1 Conclusión general

El desarrollo de esta investigación demostró que es posible la optimización en la gestión de carga y descarga de baterías en sistemas fotovoltaicos autónomos; al incorporar la técnica de procesamiento de energía en esquema paralelo permite superar las limitaciones asociadas a la conexión en esquema tradicional de cinco etapas, donde la gestión energética suele ser ineficiente y dependiente de múltiples conversiones sucesivas. En contraste, el esquema paralelo posibilita un flujo de energía bidireccional adaptado a la disponibilidad de la fuente solar, a la demanda de la carga y a las estrategias de control, reduciendo el número de etapas de conversión y mejorando de manera sustancial la eficiencia global del sistema.

La configuración propuesta contempla dos rutas principales de transferencia de energía: una orientada al suministro directo de potencia hacia la carga cuando la generación fotovoltaica es suficiente, y otra destinada al almacenamiento energético en baterías mediante un convertidor bidireccional para su aprovechamiento posterior. En este contexto, el convertidor bidireccional diseñado opera bajo cinco modos de transferencia y control de potencia, lo que permitió analizar de forma detallada el comportamiento del flujo energético en los distintos convertidores y etapas de operación, obteniendo valores de eficiencia comprendidos entre el 85.62% a 99.57%.

Desde un análisis comparativo, el esquema paralelo propuesto evidenció una variación de eficiencia del 16.35% entre los escenarios de irradiancia constante y variable, mientras que el esquema tradicional presentó una diferencia notablemente menor del 1.03% entre dichos escenarios. No obstante, al comparar directamente ambos esquemas de conexión, el sistema en esquema paralelo mostró una mejora de eficiencia del 23.5% bajo irradiancia constante y del 21.89% bajo condiciones de irradiancia variable. Estos resultados confirman que el esquema paralelo ofrece un mejor aprovechamiento energético, una reducción significativa de las pérdidas asociadas a conversiones sucesivas y una respuesta más eficiente ante variaciones de irradiancia.

Finalmente, los resultados obtenidos validan al esquema paralelo con convertidor bidireccional como una alternativa confiable y eficiente para sistemas fotovoltaicos autónomos, particularmente en zonas rurales o entornos con suministro energético intermitente. La implementación de rutas de procesamiento energético directas y optimizadas representa un alto potencial para aplicaciones futuras, contribuyendo al desarrollo de sistemas más eficientes, flexibles y adaptables a condiciones climáticas variables.

6.2 Trabajos futuros

Con el fin de dar continuidad y ampliar el alcance de la presente investigación, se proponen las siguientes líneas de trabajo futuro orientadas a validar y mejorar el desempeño del convertidor bidireccional en esquema paralelo.

- a) Implementar físicamente el convertidor bidireccional en esquema paralelo, con el propósito de validar de manera experimental el desempeño del sistema, contrastar los resultados obtenidos en simulación y evaluar su operación bajo condiciones reales de carga y variaciones del recurso solar.
- b) Evaluar e implementar el convertidor utilizando dispositivos electrónicos de potencia de última generación, tales como transistores basados en nitruro de galio (GaN) y carburo de silicio (SiC), con el objetivo de analizar mejoras en la eficiencia, reducción de pérdidas por conmutación y aumento en la densidad de potencia del convertidor.

Referencias

En este capítulo se presentan las referencias bibliográficas consultadas y empleadas en el desarrollo de la presente investigación. Dichas referencias se fundamentan en literatura científica especializada que abarca temas relacionados con las energías renovables, los sistemas fotovoltaicos autónomos, los convertidores de corriente directa a corriente directa, los convertidores multipuerto, las técnicas de procesamiento y gestión de energía, así como la irradiancia solar.

- [1] SENER, "Programa de desarrollo del sistema electrónico nacional," México2023.
- [2] S. Amara, "Optimization sizing of an autonomous photovoltaic-battery system used for isolated sites," *Proc. IMechE, Part A: J. Power and Energy*, vol. 237, no. 1, 2023.
- [3] M. Awad, "Design and Analysis of an Efficient Photovoltaic Energy System," *Frontiers in Energy Research*, vol. 10, Art. no. 969482, 2022.
- [4] W. Jan, A. D. Khan, and M. Z. Abbasi, "A Comprehensive Review of Hybrid Photovoltaic-Battery Systems: Evaluating Progress, Identifying Key Issues, and Exploring Future Prospects in Sustainable Energy Integration," *Applied Photovoltaic Technology*, vol. 1, no. 1, Jun. 2024.
- [5] O. S. H. Saleh, K. S. H. Saleh y I. I. Abdallah, "An Overview on Photovoltaic System", *IRASD Journal of Energy & Environment*, vol. 5, num. 2, pp. 76-100, 2024, doi: 10.52131/jee.2024.0502.0046.
- [6] A review of photovoltaic systems: Design, operation and maintenance", *Renewable and Sustainable Energy Reviews (ScienceDirect)*, 2019.
- [7] S. N. Vodapally y M. H. Ali, "A Comprehensive Review of Solar Photovoltaic (PV) Technologies, Architecture, and Its Applications to Improved Efficiency", *Energies*, vol. 16, num. 1, p. 319, 2023, doi: 10.3390/en16010319.
- [8] U. U. Aliyu et al., "Design and Implementation of a Photovoltaic Energy System," *IEEE Access*, vol. 8, pp. 11968–11979, 2020.
- [9] K. D. Singh and S. Kumar, "Performance Evaluation of a Solar Photovoltaic System: Modeling and Simulation," *Solar Energy*, vol. 199, pp. 411–420, 2020.
- [10] H. A. Kazem and M. T. Chaichan, "Review of Photovoltaic Systems Components," *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 100, pp. 10–26, 2019.
- [11] S. Suatunce Chiliquinga, D. F. Trujillo Ronquillo & Y. Morales Tamayo, "Revisión de sistemas de almacenamiento de energía para redes aisladas OFF-GRID provenientes de fuentes renovables," *Dominio de las Ciencias*, vol. 10, no. 3, 2024, pp. 671–687, doi:10.23857/dc.v10i3.3947.
- [12] Leiva, A. & Rivas, G., "Sistemas solares DC en aplicaciones off-grid: estudio técnico-económico con relación a sistemas solares AC", *EASI: Ingeniería y Ciencias Aplicadas en la Industria*, vol. 2, no. 2, pp. 24-28, 2023.
- [13] Cuenca, A., Oña, C., Suquillo, I. & Miniguano, H., "Metodología de Diseño de Sistemas Aislados de Energía Solar Fotovoltaica para Áreas Rurales en Ecuador", *Revista Técnica "energía"*, vol. 20, no. 1, pp. 43-51, 2023.
- [14] H. Ramírez-Murillo, C. A. Torres-Pinzón, F. Salazar-Cáceres, V. Vera-Saldaña y C. J. Mojica-Casallas, "Design and Control of a Photovoltaic Distribution System Based on Modular Buck-Boost Converters," *Ingeniería e Investigación*, vol. 43, no. 3, 06, 2023, doi: 10.15446/ing.investig.99972.
- [15] T. Esmar and P. L. Chapman, "Comparison of Photovoltaic Array Maximum Power Point Tracking Techniques," *IEEE Transactions on Energy Conversion*, vol. 22, no. 2, pp. 439–449, Jun. 2007.

- [16] H. Mahmood, D. Michaelson and J. Jiang, "Control and Energy Management of a Grid-Connected Photovoltaic System with Residential Energy Storage," *IEEE Transactions on Smart Grid*, vol. 5, no. 2, pp. 992–1001, Mar. 2014.
- [17] P. Sharma, M. Kolhe, and A. Sharma, "Economic Performance Assessment of Building Integrated Photovoltaic System with Battery Energy Storage Under Grid Constraints," *Renewable Energy*, vol. 145, pp. 1901–1909, 2020.
- [18] H. Mahmood, D. Michaelson, and J. Jiang, "A power management strategy for PV/battery hybrid systems in Islanded microgrids," *IEEE Journal of Emerging and Selected Topics in Power Electronics*, vol. 2, pp. 870-882, 2014.
- [19] B. Wang, M. Sechilariu, and F. Locment, "Intelligent DC microgrid with smart grid communications: Control strategy consideration and design," *IEEE Transactions on Smart Grid*, vol. 3, pp. 2148-2156, 2012.
- [20] X. Wu, Z. Tang, D. I. Stroe, and T. Kerekes, "Overview and Comparative Study of Energy Management Strategies for Residential PV Systems with Battery Storage," *Batteries*, vol. 8, 2022.
- [21] J. Dhillon, A. Unni, and N. Singh, "Design and Simulation of a PV System with Battery Storage Using Bidirectional DC-DC Converter Using Matlab Simulink," *SRINAGAR, India*, 2022, pp. 1-5.
- [22] F. Lofranco et al., "Efficiency Comparison of DC and AC Coupling Solutions for Large-Scale PV+BESS Power Plants," *Energy*, vol. 276, pp. 1–13, 2025.
- [23] O. M. Akeyo, V. Rallabandi, N. Jewell, and D. M. Ionel, "The Design and Analysis of Large Solar PV Farm Configurations with DC-Connected Battery Systems," *IEEE Transactions on Industry Applications*, vol. 56, pp. 2903-2912, 2020.
- [24] J. He, Y. Yang, and D. Vinnikov, "Energy storage for 1500 V photovoltaic systems: A comparative reliability analysis of DC- And AC-coupling," *Energies (Basel)*, vol. 13, 2020.
- [25] S. Jain, S. Dhara, and V. Agarwal, "A Voltage-Zone Based Power Management Scheme with Seamless Power Transfer between PV-Battery for OFF-Grid Stand-Alone System," *IEEE Transactions on Industry Applications*, vol. 57, pp. 754-763, 2021.
- [26] D. Rekioua, T. Rekioua, A. Elsanabary and S. Mekhilef, "Power Management Control of an Autonomous Photovoltaic/Wind Turbine/Battery System," *Energies*, vol. 16, no. 5, art. 2286, 2023.
- [27] A. M. Shaheen, E. E. Elattar, N. A. Nagem and A. F. Nasef, "Allocation of PV Systems with Volt/Var Control Based on Automatic Voltage Regulators in Active Distribution Networks," *Sustainability*, vol. 15, no. 21, art. 15634, 2023.
- [28] Y. Chen et al., "Review of Multiport Converters for Renewable Energy Systems," *IEEE Trans. Power Electron.*, vol. 39, no. 4, pp. 4125–4140, Apr. 2024.
- [29] R. Torres et al., "Differential Power Processing for PV and Storage Integration," *Renew. Energy*, vol. 223, pp. 120–134, Ene. 2025.
- [30] A. Patel and M. Singh, "Flexible Power Management in Multiport PV-Battery Converters," *IEEE Access*, vol. 13, pp. 55678–55690, 2025.
- [31] S. Zhang et al., "Design Considerations of Non-Isolated Multiport DC Converters," *Appl. Energy*, vol. 347, pp. 122155, Feb. 2025.
- [32] M. Haque and et al., "Three-Port Converters for Energy Conversion of PV-BES Integrated Systems-A Review."

- [33] I. A. Ivan Prado Jiménez, J. E. Arau Roffiel, and C. Aguilar Castillo, "Topología multipuerto basada en un convertidor Cúk bidireccional no aislado para un sistema de cosecha y almacenamiento de energía," *Jornada de Ciencia y Tecnología Aplicada*, vol. 2, pp. 1-5, 2019.
- [34] R. W. Erickson and D. Maksimovic, *Fundamentals of Power Electronics*, 2nd ed., Springer, 2001.
- [35] N. Mohan, *Power Electronics: Converters, Applications, and Design*, Wiley, 2011.
- [36] D. Maksimovic et al., "Switching-Mode DC–DC Power Supplies," *Proceedings of the IEEE*, vol. 89, no. 6, pp. 876–887, 2001.
- [37] T. Esum and P. L. Chapman, "Comparison of Photovoltaic Array Maximum Power Point Tracking Techniques," *IEEE Transactions on Energy Conversion*, 2007.
- [38] S. Cúk, "A New Optimum Topology Switching DC–DC Converter," *IEEE PESC*, 1977.
- [39] A. Khaligh and Z. Li, "Battery, Ultracapacitor, Fuel Cell, and Hybrid Energy Storage Systems for Electric Vehicles," *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, 2010.
- [40] H. Tao, A. Kotsopoulos, J. Duarte, and M. Hendrix, "Transformer-Coupled Multiport ZVS Bidirectional Converter," *IEEE Transactions on Power Electronics*, 2008.
- [41] B. J. Baliga, "Power Semiconductor Device Figure of Merit for High-Frequency Applications," *IEEE Electron Device Letters*, 1989.
- [42] A. Lidow et al., *GaN Transistors for Efficient Power Conversion*, Wiley, 2019.
- [43] K. Sun, L. Zhang, Y. Xing, and J. Guerrero, "A Distributed Multi-Port DC–DC Converter for Smart Energy Systems," *IEEE Trans. Power Electronics*, 2012.
- [44] H. Moradisizkoobi, N. Elsayad, M. Shojaie, and O. A. Mohammed, "Review of Multiport Converters for Solar and Energy Storage Integration," *IEEE Transactions on Power Electronics*, vol. 35, no. 5, pp. 5114–5130, May 2021, doi: 10.1109/TPEL.2020.2969822.
- [45] T. Sutikno, R. A. Aprilianto, and H. S. Purnama, "Application of non-isolated bidirectional DC–DC converters for renewable and sustainable energy systems: a review," *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, doi: 10.1093/ce/zkac070.
- [46] C. Zhang, H. Li, J. Huang, and Z. Ye, "A New Multiport Converter for Integrated Photovoltaic and Energy Storage Systems," *IEEE Transactions on Power Electronics*, vol. 38, no. 9, pp. 5924–5936, Sept. 2023, doi: 10.1109/TPEL.2023.3262947.
- [47] S. Ahmad, M. M. Alam, and A. B. D. Nizar, "A Hybrid Multiport Converter for Photovoltaic and Energy Storage Applications," *IEEE Transactions on Power Electronics*, vol. 38, no. 7, pp. 6345–6357, Jul. 2023, doi: 10.1109/TPEL.2023.2963287.
- [48] S. A. Gorji, H. G. Sahebi, M. Ektesabi, and A. B. Rad, "Topologies and Control Schemes of Bidirectional DC–DC Power Converters: An Overview," *IEEE Access*, vol. 7, no. 31, pp. 117997–118019, 2019.
- [49] A. J. Alrubaie, M. Swadi, M. Salem, A. Richelli, A. Bughneda, and M. Kamarol, "Systematic Review of Bidirectional, Multiport Converter Structures and Their Derivatives: A Case Study of Bidirectional Dual Input Dual Output Converters," *Review*, vol. 17, no.1, pp. 1–37, 2023.
- [50] H. Zhang, M. Xu, J. Li, and X. Zhang, "A Three-Port Converter for Integration of Photovoltaic, Battery, and Supercapacitor in Smart Grid Systems," *IEEE Transactions on Power Electronics*, vol. 34, no. 9, pp. 8520–8532, Sept. 2019, doi: 10.1109/TPEL.2019.2908779.
- [51] S. B. K. V. S. S. P. Rao, P. R. K. Reddy, and M. S. S. R. Rao, "A Multiport Converter for Photovoltaic and Energy Storage Systems for Efficient Energy Management," *IEEE*

- Transactions on Power Electronics, vol. 37, no. 5, pp. 4127-4139, May 2022, doi: 10.1109/TPEL.2022.3190114.
- [52] H. Gupta and A. Badhoutiya, "Bidirectional DC-DC Converter with Multiport Interface," 2023 International Conference for Advancement in Technology (ICONAT), Goa, India, 2023, pp. 1-4, doi: 10.1109/ICONAT57137.2023.10080202.
- [53] A. Farakhor, M. Abapour, and M. Sabahi, "Design, analysis, and implementation of a multiport DC-DC converter for renewable energy applications," IET Power Electronics, vol. 12, no. 4, pp. 891-898, Apr. 2019, doi: 10.1049/iet-pel.2018.5633.
- [54] M. El Jouni et al., "Control System of Multi-Port Autonomous Reconfigurable Solar Power Plant (MARS)," IEEE Transactions on Industrial Electronics, vol. 70, no. 1, pp. 311-322, Ene. 2024.
- [55] J. Wang et al., "Review of Multiport Converters for Solar and Energy Storage Integration," IEEE Access, vol. 12, pp. 10012-10024, 2023.
- Y. H. Kim et al., "Design of an Isolated Multiport Converter for PV Systems and Battery Storage Integration," IEEE Transactions on Power Electronics, vol. 39, no. 4, pp. 2723-2735, Apr. 2024.
- [56] Z. Wang et al., "A Modular Multiport Converter to Integrate Multiple Solar Photovoltaic Modules," IEEE Journal of Emerging and Selected Topics in Power Electronics, vol. 11, no. 2, pp. 1542-1554, Jun 2024.
- [57] R. Chen et al., "Step-Up Multiport Converter for Energy Stability in PV Systems," IEEE Transactions on Energy Conversion, vol. 39, no. 3, pp. 1203-1212, Sept. 2024.
- [58] H. Liu and X. Zhang, "Multi-Port DC-AC Inverter for Standalone PV Systems," IEEE Transactions on Sustainable Energy, vol. 15, no. 1, pp. 123-131, Ene. 2024.
- [59] Gupta et al., "Non-Isolated Multiport Converters for Standalone PV Applications," IEEE Access, vol. 11, pp. 17564-17578, 2023.
- [60] F. Fang et al., "Interleaved Multi-Port Converter with Single Inductor for PV Systems," IEEE Transactions on Power Electronics, vol. 39, no. 5, pp. 4521-4533, May 2024.
- [61] K. Nakamura et al., "High-Efficiency Multi-Port Converter for Autonomous PV Systems," IEEE Journal of Photovoltaics, vol. 14, no. 3, pp. 1892-1901, Mar. 2024.
- [62] T. Singh and S. K. Ghosh, "Integration of Energy Storage with Multiport PV Systems," IEEE Transactions on Power Electronics, vol. 39, no. 6, pp. 3784-3795, Jun. 2024.
- [63] S. Bhattacharya, "A Novel Non-Isolated Three Port DC-DC Converter for Photovoltaic Applications," 2020 IEEE International Conference on Power Electronics, Smart Grid and Renewable Energy (PESGRE), pp. 1-6, Nov. 2020, doi: 10.1109/PESGRE51191.2020.9298327
- [64] S. Bhattacharya and S. Samanta, "Non-Isolated Buck-Based Three-Port DC-DC Converter for Medium Power Standalone Photovoltaic Applications," The Journal of Power Electronics, vol. 23, no. 5, pp. 920-930, May 2023, doi: 10.1007/s43236-023-00099-7.
- [65] M. Al-Soeidat, H. Aljarajreh, H. Khawaldeh, D. D.-C. Lu, and J. G. Zhu, "A Reconfigurable Three-Port DC-DC Converter for Integrated PV-Battery System," IEEE Transactions on Power Electronics, vol. 37, no. 10, pp. 10323-10333, Oct. 2020, doi: 10.1109/TPEL.2020.2991989.
- [66] H. Moradisizkoohi, N. Elsayad, M. Shojaie, and O. A. Mohammed, "PWM Plus Phase-Shift Modulated Three-Port Three-Level Soft-Switching Converter Using GaN Switches for Photovoltaic Applications," 2020 IEEE International Conference on Power Electronics, Smart

Grid and Renewable Energy (PESGRE), pp. 1-6, Nov. 2020, doi: 10.1109/PESGRE51191.2020.9298287.

[67] Renogy, 100-Watt 12 Volt Monocrystalline Solar Panel- Specification Sheet, Renogy. [En línea]. Disponible: <https://www.renogy.com/content/files/Specifications/RNG-100D-SS%20spec.pdf>. [Acceso: 17 de febrero de 2025].

[68] Lithium Battery 72V 100Ah, Lithium Battery Factory. [En línea]. A Disponible en: <https://www.lithium-battery-factory.com/es/product/lithium-battery-72v-100ah/>. [Acceso: 27 de febrero de 2025].

[69] TDK Electronics, B32656A3305 Film Capacitor Datasheet. [En línea]. Disponible: https://www.tdk-electronics.tdk.com/inf/20/20/db/fc_2009/MKP_B32651_658.pdf [Acceso: 16 de abril de 2025].

[70] Coilcraft, Inc., MSS1210H-125KED Inductor Datasheet. [En línea]. Disponible: <https://www.coilcraft.com/getmedia/52078704-21eb-4c2b-9b72-1e07b4a2e252/mss1210h.pdf> [Acceso: 15 de abril de 2025].

[71] Infineon Technologies, IRFB4137 N-Channel Power MOSFET Datasheet, version 01.01. [En línea]. Disponible: https://www.mouser.mx/datasheet/2/196/Infineon_IRFB4137_DataSheet_v01_01_EN-3363184.pdf [Acceso: 21 de abril de 2025].

[72] ON Semiconductor, "MUR840: Ultra-Fast Rectifier, 8 A, 400 V", datasheet, Rev. 11, Aug. 2015. [En línea]. Disponible: <https://www.onsemi.com/pdf/datasheet/mur840-d.pdf> [Acceso: 18 de abril de 2025]

[73] Red de Meteorología y Radiación Solar (REDMET), Base de datos de irradiancia solar. [En línea]. Disponible: <http://www.aire.cdmx.gob.mx/default.php?opc=%27aKBm%27> [Acceso: 22 de abril de 2025].

[74] J. E. López-Velázquez, et al., "An Assessment of the Weather Research and Forecasting (WRF) Model for Horizontal Solar Irradiance in Mexico (2017–2020)," Atmosphere, 2024.

[75] C. H. Zepeda-Fernández, M. Ramírez-Cerón, X. Cancino-Rojas, E. Moreno Barbosa, M. Arredondo-Velázquez y J. M. Hernández-López, "Solar irradiance statistical analysis in Mexico City from 2018 to 2021," Ene. 2025.

[76] K. Fernández-González, C. M. Welsh-Rodríguez, G. Díaz-Félix, "Evaluación de bases de datos de irradiancia e irradiación solar mediante sensores remotos y reanálisis, con

aproximación de cobertura nubosa en México,” *Investigaciones Geográficas*, Núm. 116, Abr. 2025. DOI: 10.14350/rig.60962.

[77] T. Cavazos, et al., “Spring 2024: Unprecedented atmospheric heatwaves in Mexico,” *Frontiers in Climate*, vol. 6, no. 1449710, 2024. [En línea]. Disponible: <https://doi.org/10.3389/fclim.2024.1449710>

[78] CONAGUA, “Informe sobre la sequía y canícula en México 2021–2023,” Comisión Nacional del Agua, Reporte técnico interno, Dic. 2023. [En línea]. Disponible: <https://smn.conagua.gob.mx/es/climatologia/monitor-de-sequia>.

[79] S. E. Perkins-Kirkpatrick and S. C. Lewis, “Increasing trends in regional heatwaves,” *Nature Communications*, vol. 11, art. 3357, 2020, doi: 10.1038/s41467-020-16970-7.

[80] E. Russo, A. S. Sharma, L. A. S. de Araujo et al., “Increasing Intensity of Extreme Heatwaves: The Crucial Role of Large-Scale Drivers,” *Geophysical Research Letters*, vol. 50, no. 6, 2023, doi: 10.1029/2023GL103540.

[81] J. Ballester et al., “Heat-related mortality in Europe during the summer of 2022,” *Nature Medicine*, vol. 29, pp. 1857–1866, 2023, doi: 10.1038/s41591-023-02419-z.

Anexo A

En este capítulo se presenta el Anexo A, el cual contiene los resultados de simulación correspondientes al comportamiento del convertidor bidireccional en esquema paralelo bajo el Escenario II, basado en condiciones de irradiancia variable. Dichos resultados se muestran mediante representaciones gráficas y tabulares que permiten analizar el desempeño del convertidor en las distintas condiciones de operación consideradas.

Adicionalmente, se incluyen los parámetros y resultados del sistema fotovoltaico operando bajo el esquema tradicional en el mismo escenario de simulación, con el propósito de facilitar la comparación del comportamiento y desempeño energético de ambos esquemas de conexión.

Anexo A: Resultados de simulación

Tabla.22 Resultados del análisis matemático de los modos de operación en el convertidor bidireccional en esquema paralelo correspondientes al Escenario I.

Escenario I											
Modo de operación	PV a Carga	Batería a Carga	PV a Batería	PV a Carga y Batería				PV y Batería a Carga			
Convertidor DC-DC	Boost	Boost	Buck	Boost	Buck	Boost	Buck	Boost	Boost	Boost	Boost
%	100	100	100	80	20	20	80	80	20	20	80
Señal de control	Q1	Q3	Q2	Q1	Q2	Q1	Q2	Q1	Q3	Q1	Q3
Tensión de entrada [V]	89.5	72	89.5	89.5	89.5	89.5	89.5	80.05	32.19	80.05	32.19
Ciclo de trabajo	0.5525	0.64	0.8044	0.5525	0.8044	0.5525	0.8044	0.5997	0.8390	0.5997	0.8390
Inductor [μ H]	1200	1000	270	1200	270	1200	270	1200	1000	1200	1000
Condensador [nF]	3000	3300	1000	3000	1000	3000	1000	3000	3300	3000	3300
Corriente promedio en el transistor [A]	1.414	1.638	5.72	1.414	5.72	1.414	5.72	1.414	1.638	1.414	1.638
Tensión máxima del transistor [V]	200	200	89.5	200	89.5	200	89.5	200	200	200	200
Corriente promedio en el diodo [A]	1.145	1.414	1.390	1.145	1.390	1.145	1.390	1.145	1.414	1.145	1.414
Tensión máxima del diodo [V]	200	200	89.5	200	89.5	200	89.5	200	200	200	200
Resistencia [Ω]	78.134	78.134	10.126	97.6677	50.6309	390.6708	12.6677	78.134		78.134	
Frecuencia [kHz]					50						

Tabla.23 Resultados del análisis matemático de los modos de operación en el convertidor bidireccional en esquema paralelo correspondientes al Escenario II.

Escenario II										
Modo de operación	PV a Carga	PV a Batería	PV a Carga y Batería				PV y Batería a Carga			
Convertidor DC-DC	Boost	Buck	Boost	Buck	Boost	Buck	Boost	Boost	Boost	Boost
%	100	100	80	20	20	80	80	20	20	80
Señal de control	Q1	Q2	Q1	Q2	Q1	Q2	Q1	Q3	Q1	Q3
Ciclo de trabajo	0.5525	0.8044	0.5525	0.8044	0.5525	0.8044	0.6027	0.9595	0.8774	0.7385
Inductor [μ H]	1200	270	1200	270	1200	270	1200	1000	1200	1000
Condensador [nF]	3000	1000	3000	1000	3000	1000	3000	3300	3000	3300
Corriente promedio en el transistor [A]	1.414	5.72	1.414	5.72	1.414	5.72	1.414	1.638	1.414	1.638
Tensión máxima del transistor [V]	200	89.5	200	89.5	200	89.5	200	200	200	200
Corriente promedio en el diodo [A]	1.145	1.390	1.145	1.390	1.145	1.390	1.145	1.414	1.145	1.414
Tensión máxima del diodo [V]	200	89.5	200	89.5	200	89.5	200	200	200	200
Resistencia [Ω]	78.134	10.126	97.6677	50.6309	390.6708	12.6677	78.134		78.134	
Frecuencia [kHz]					50					

Tabla.24 Registro de resultados eléctricos promedio del esquema paralelo PV a Carga en el Escenario II.

Fechas	Tensión de entrada [V]	Corriente de entrada [A]	Tensión de salida [V]	Corriente de salida [A]
25/07/2020	49.644134	3.0745246	105.91301	1.355503
03/08/2020	51.646491	3.1667506	109.07197	1.3959604
08/08/2020	49.63523	3.0529104	105.14087	1.3456481
10/08/2020	49.675715	3.0570883	105.28285	1.3474653
20/08/2020	48.846219	3.0062098	103.53721	1.3251237
20/07/2021	50.368156	3.08907	106.39198	1.3616605
30/07/2021	50.100284	3.0734976	105.8551	1.3547893
05/08/2021	49.872638	3.0808514	106.11292	1.3580889
17/08/2021	50.18716	3.0804585	106.09057	1.3578028
20/08/2021	49.548037	3.0543279	105.19639	1.3463359
15/07/2022	50.262323	3.0834477	106.19871	1.3591869
25/07/2022	49.5357	3.0613191	105.44614	1.3495552
29/07/2022	52.091461	3.2046483	110.37767	1.4126714
13/08/2022	52.048434	3.2020072	110.28673	1.4115075
16/08/2022	51.165594	3.1415872	108.19566	1.3847449
26/07/2023	47.03347	2.8834035	99.30629	1.2709741
03/08/2023	48.332566	2.9874465	102.9002	1.3169708
18/08/2023	46.426283	2.843015	97.919245	1.253222
30/08/2023	46.17027	2.8462584	98.029448	1.1254632
03/09/2023	43.239754	2.6439833	91.056122	1.1653841
13/01/2024	43.239754	2.6439833	91.056122	1.165384
01/02/2024	40.833328	2.5191737	86.445481	1.1063747
19/03/2024	43.833455	2.6878242	92.576131	1.184838
26/04/2024	45.675598	2.8098148	96.774399	1.2385696
15/05/2024	46.920665	2.8739582	98.981576	1.2668182

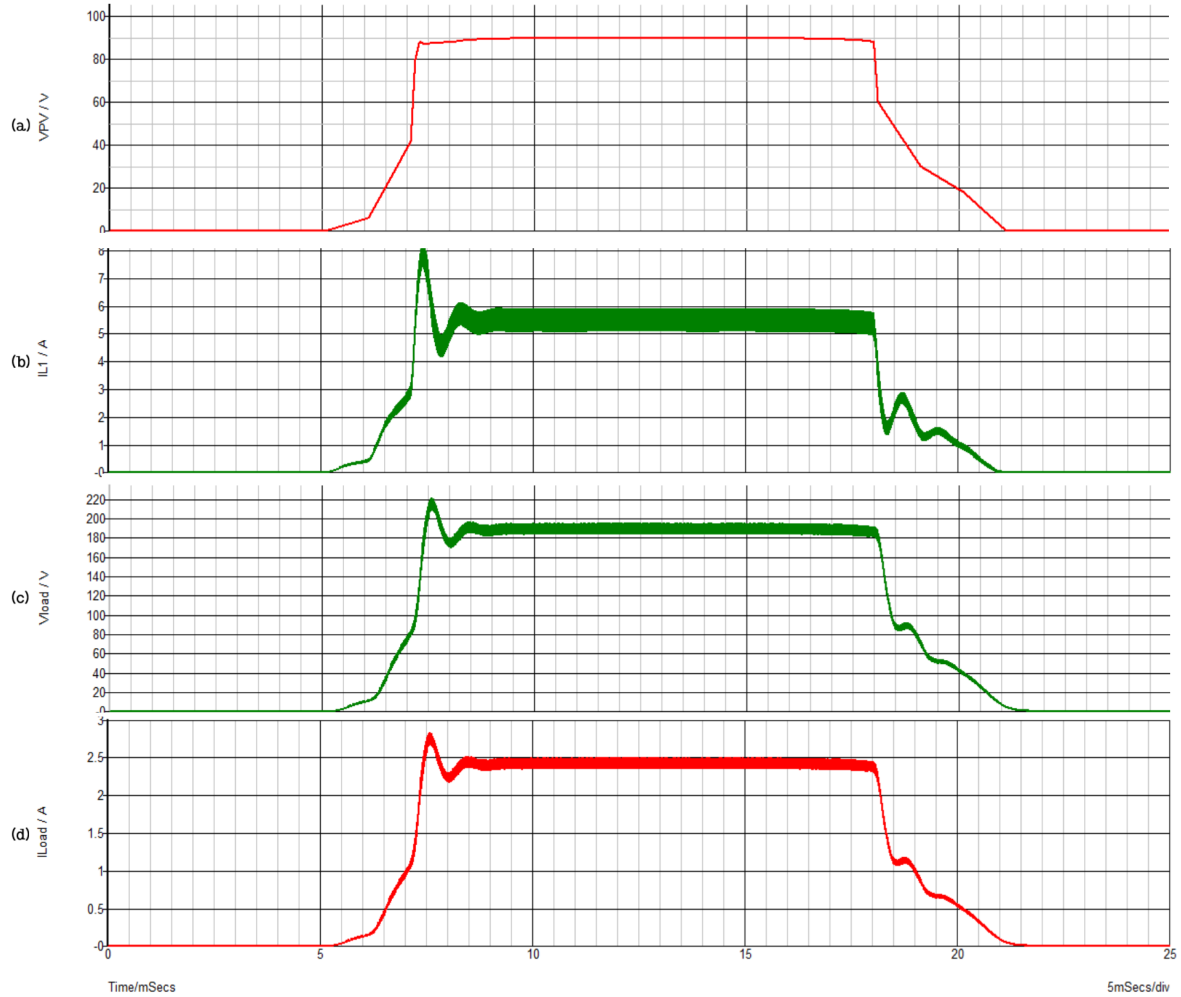


Fig.52 Ejemplo del comportamiento de las formas de onda de tensión y corriente en el Escenario II bajo operación PV a Carga con irradiancia del día 3 de septiembre de 2023.
a) Tensión de entrada en el arreglo de paneles solares, b) Corriente de entrada en el inductor 1, c) Tensión de salida en la carga, d) Corriente de salida en la carga.

Tabla.25 Registro de resultados eléctricos promedio del esquema paralelo PV a Batería en el Escenario II.

Fechas	Tensión de entrada [V]	Corriente de entrada [A]	Tensión de salida [V]	Corriente de salida [A]
25/07/2020	49.644134	3.0162642	37.660208	3.7191594
03/08/2020	51.646491	3.135255	39.142514	3.8655456
08/08/2020	49.63523	3.0138121	37.626345	3.7158152
10/08/2020	49.675715	3.0162967	37.657461	3.7188881
20/08/2020	48.846219	2.9655737	37.02406	3.6463362
20/07/2021	50.368156	3.0587351	38.187242	3.771207
30/07/2021	50.100284	3.0423123	37.982076	3.7509457
05/08/2021	49.872638	3.0264976	37.78441	3.731425
17/08/2021	50.18716	3.0457478	38.024771	3.755162
20/08/2021	49.548037	3.0067521	37.537991	3.7070898
15/07/2022	50.262323	3.05223	38.106178	3.7632015
25/07/2022	49.5357	3.0076967	37.550812	3.7083559
29/07/2022	52.091461	3.1644624	39.50762	3.901606
13/08/2022	52.048434	3.16182	39.474676	3.8983484
16/08/2022	51.165594	3.1055456	38.7713	3.828886
26/07/2023	47.03347	2.8541363	35.632481	3.5189098
03/08/2023	48.332566	2.9337753	36.62786	3.6172092
18/08/2023	46.426283	2.8168276	35.166617	3.4729031
30/08/2023	46.17027	2.8032611	34.997907	3.456242
03/09/2023	43.239754	2.6193102	32.699923	3.2293031
13/01/2024	43.239754	2.6293102	32.69923	3.2293031
01/02/2024	40.833328	2.4780062	30.936438	3.055149
19/03/2024	43.833455	2.6619843	33.234066	3.2820528
26/04/2024	45.675598	2.7729184	34.618957	3.4188186
15/05/2024	46.920665	2.8474032	35.548448	3.5106111

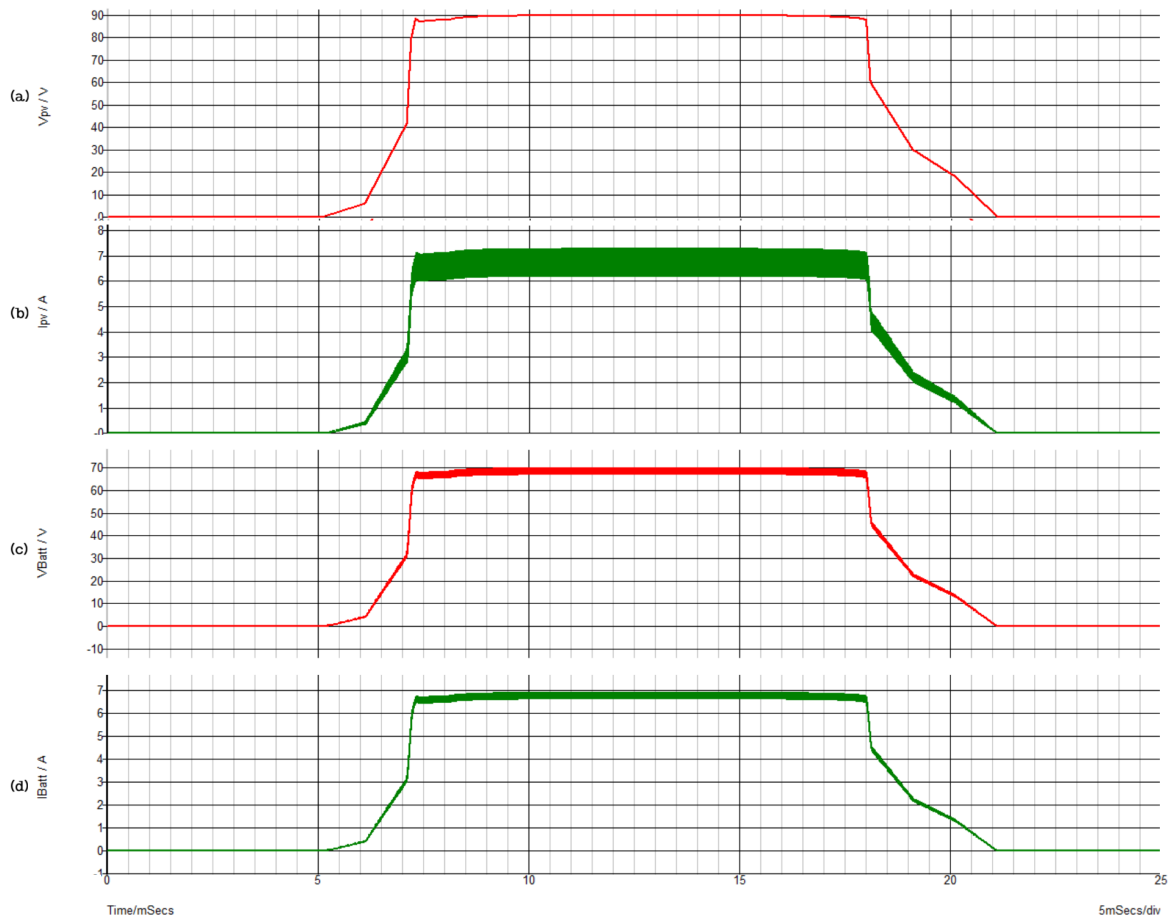


Fig.53 Ejemplo del comportamiento de las formas de onda de tensión y corriente en el Escenario II bajo operación PV a Batería con irradiancia del día 3 de septiembre de 2023.
a) Tensión de entrada en el arreglo de paneles solares, b) Corriente de entrada en el arreglo de paneles solares, c) Tensión de salida en la batería, d) Corriente de salida en la batería.

Tabla.26 Registro de resultados eléctricos promedio durante la operación simultánea del convertidor Boost al 80% y el convertidor Buck al 20% bajo el Escenario II de PV a Batería y Carga.

Fechas	Tensión de entrada [V]	Corriente de entrada [A]	Tensión de salida [V]	Corriente de salida [A]
		2.4976208	107.57161	1.1014041
25/07/2020	49.644134	0.62848987	39.245766	0.77513467
		2.5649265	110.44465	1.1308206
03/08/2020	51.646491	0.65249562	40.742427	0.8046949
		2.4785692	106.70629	1.0925443
08/08/2020	49.63523	0.62726278	39.16607	0.77356061
		2.48281	106.88863	1.0944113
10/08/2020	49.675715	0.6278558	39.20308	0.77429158
		2.4400999	105.06195	1.0757083
20/08/2020	48.846219	0.61713887	38.535243	0.76110128
		2.5033952	107.78367	1.1035754
20/07/2021	50.368156	0.63649875	39.744171	0.78497857
		2.49107717	107.24436	1.0981559
30/07/2021	50.100284	0.63308031	39.530798	0.78076428
		2.5026676	107.76671	1.1034017
05/08/2021	49.872638	0.63034782	39.357705	0.77734556
		2.497665	107.52903	1.1009682
17/08/2021	50.18716	0.63389864	39.579694	0.78173001
		2.47983381	106.77775	1.0932759
20/08/2021	49.548037	0.62580419	39.075142	0.77717647
		2.4991246	107.60153	1.1017105
15/07/2022	50.262323	0.63514644	39.659972	0.78331557
		2.4856607	107.03632	1.0959234
25/07/2022	49.5357	0.62616229	39.098543	0.77222691
		2.5995471	111.93179	1.1460472
29/07/2022	52.091461	0.65854717	41.122329	0.81219826
		2.5974172	111.83996	1.1451069
13/08/2022	52.048434	0.65800076	41.088035	0.81152092
		2.5473941	109.67198	1.1229094
16/08/2022	51.165594	0.64628393	40.353456	0.79701243
		2.33367423	100.60625	1.0300872
26/07/2023	47.03347	0.59399723	37.087969	0.73251649
		2.4259253	104.46314	1.06957772
03/08/2023	48.332566	0.6108321	38.139595	0.75328692
		2.3014731	99.096891	1.0146332
18/08/2023	46.426283	0.58626919	36.604522	0.72296903
		2.3103446	99.476068	1.01815155
30/08/2023	46.17027	0.58347908	36.432871	0.7195778
		2.1394701	92.113237	0.94312897
03/09/2023	43.239754	0.54530764	34.042408	0.67236427
		2.1394701	92.113237	0.93412897
13/01/2024	43.239754	0.54530764	34.042408	0.67236427
01/02/2024	40.833328	2.051906	87.679785	0.89773574

		0.51570411	32.199774	0.63597079
		2.1765446	93.722504	0.95960593
19/03/2024	43.833455	0.55396776	34.590957	0.68319853
		2.2798823	98.160806	1.0050488
26/04/2024	45.675598	0.57714378	36.036868	0.71175642
		2.3311228	100.22738	1.0262081
15/05/2024	46.920665	0.59256435	36.99931	0.7307654

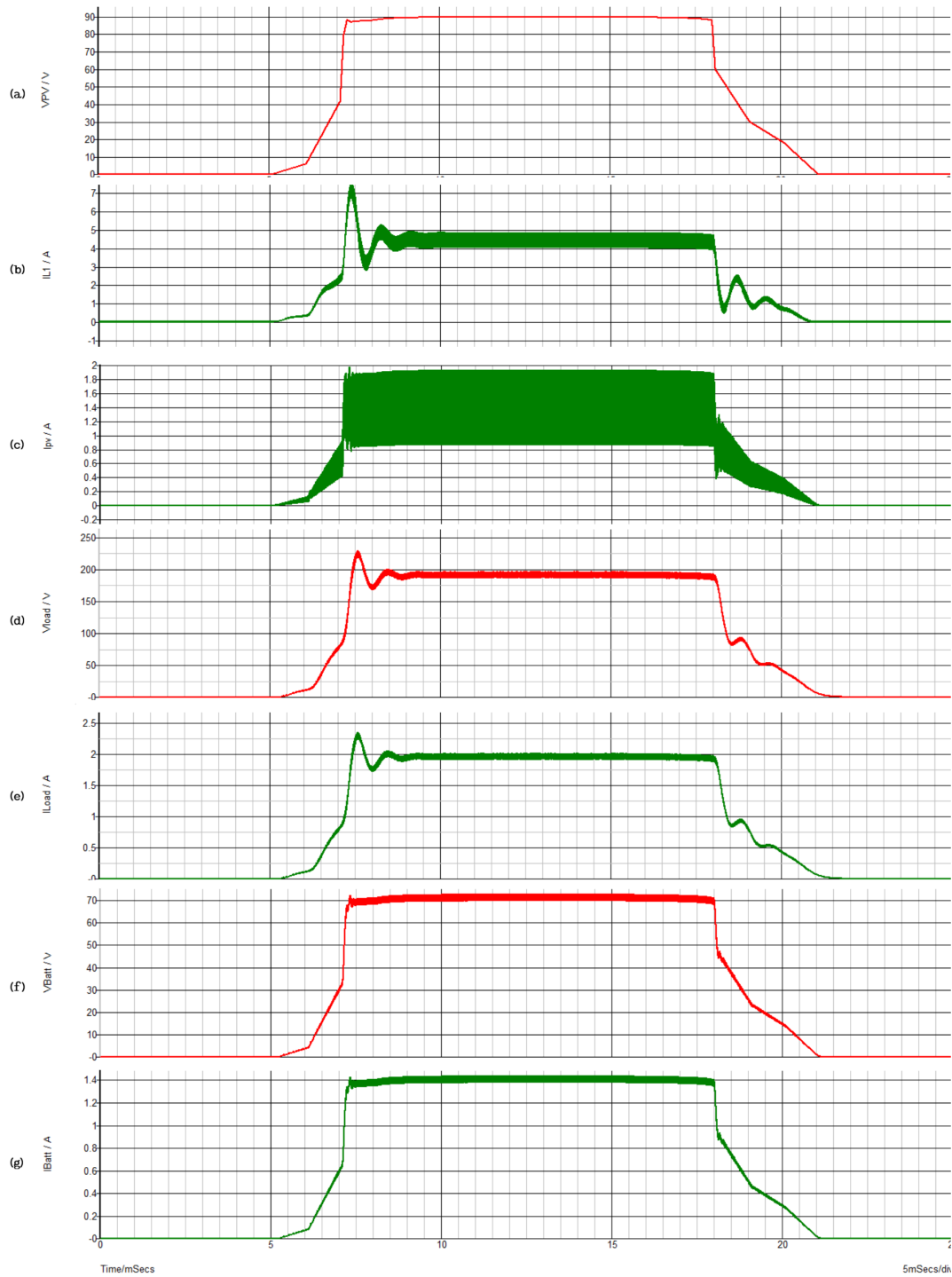


Fig.54 Ejemplo del comportamiento de las formas de onda de tensión y corriente en el Escenario II, durante la operación simultánea del convertidor Boost al 80% y el convertidor Buck al 20%, en modo PV a Batería y Carga con irradiancia del día 3 de septiembre de 2023.

a) Tensión de entrada en el arreglo de paneles solares, b) Corriente de entrada en el inductor 1, c) Corriente de entrada en el panel solar, d) Tensión de salida en la carga, e) Corriente de salida en la carga, f) Tensión de salida en la batería, g) Corriente de salida en la batería.

Tabla.27 Registro de resultados eléctricos promedio durante la operación simultánea del convertidor Boost al 20% y el convertidor Buck al 80% bajo el Escenario II de PV a Batería y Carga.

Fechas	Tensión de entrada [V]	Corriente de entrada [A]	Tensión de salida [V]	Corriente de salida [A]
25/07/2020	49.644134	0.75365116	119.29564	0.30536102
		2.4363917	38.025141	3.0041114
03/08/2020	51.646491	0.7432081	121.4279	0.31081898
		2.5322195	39.51963	3.122181
08/08/2020	49.63523	0.69234558	118.19682	0.30254838
		2.4341053	37.988514	3.0012178
10/08/2020	49.675715	0.73164529	118.55018	0.30345287
		2.4361358	38.019965	3.0037025
20/08/2020	48.846219	0.71873401	116.37787	0.29789243
		2.3951656	37.380408	2.9531754
20/07/2021	50.368156	0.73431202	119.08351	0.30481804
		2.4703999	38.554722	3.04595
30/07/2021	50.100284	0.73521916	118.79611	0.30408239
		2.4570995	38.347439	3.029574
05/08/2021	49.872638	0.75423431	119.14086	0.30496484
		2.4443959	38.148388	3.0138484
17/08/2021	50.18716	0.73828009	119.13978	0.30496207
		2.4599411	38.391267	3.0330366
20/08/2021	49.548037	0.72778616	118.19881	0.30255349
		2.4284414	37.899612	2.9941942
15/07/2022	50.262323	0.74054345	119.15814	0.30500909
		2.4651514	38.472944	3.0394893
25/07/2022	49.5357	0.7335333	118.46779	0.303242
		2.4292861	37.913456	2.9952879
29/07/2022	52.091461	0.76462782	123.20818	0.31537596
		2.5557859	39.887914	3.1512766
13/08/2022	52.048434	0.77407441	123.11263	0.31513139
		2.553662	39.854707	3.1486531
16/08/2022	51.165594	0.74156935	120.35253	0.30806635
		2.5082135	39.144397	3.0925363
26/07/2023	47.03347	0.69004122	111.34839	0.28501847
		2.5051786	39.975512	2.842184
03/08/2023	48.332566	0.69776247	114.7369	0.29369203
		2.3696426	36.981891	2.9216912
18/08/2023	46.426283	0.65787271	107.59892	0.27542094
		2.2750502	35.505325	2.8050376
30/08/2023	46.17027	0.69332534	110.29089	0.28231158
		2.2641334	35.3353	2.7916051
03/09/2023	43.239754	0.5924029	99.495125	0.25467766
		2.1156327	33.015975	2.6083708
13/01/2024	43.239754	0.5934029	99.495125	0.25467766
		2.1156327	33.015975	2.6083708

	40.833328	0.61520805	98.334642	0.25170717
01/02/2024		2.0014044	31.234377	2.4676187
	43.833455	0.64439039	104.12728	0.26653459
19/03/2024		2.1499634	33.55403	2.6508789
	45.675598	0.67730742	109.007736	0.27902612
26/04/2024		2.2395913	34.952518	2.7613641
	46.920665	0.68728074	110.91517	0.28390954
15/05/2024		2.2997363	35.890867	2.8354968

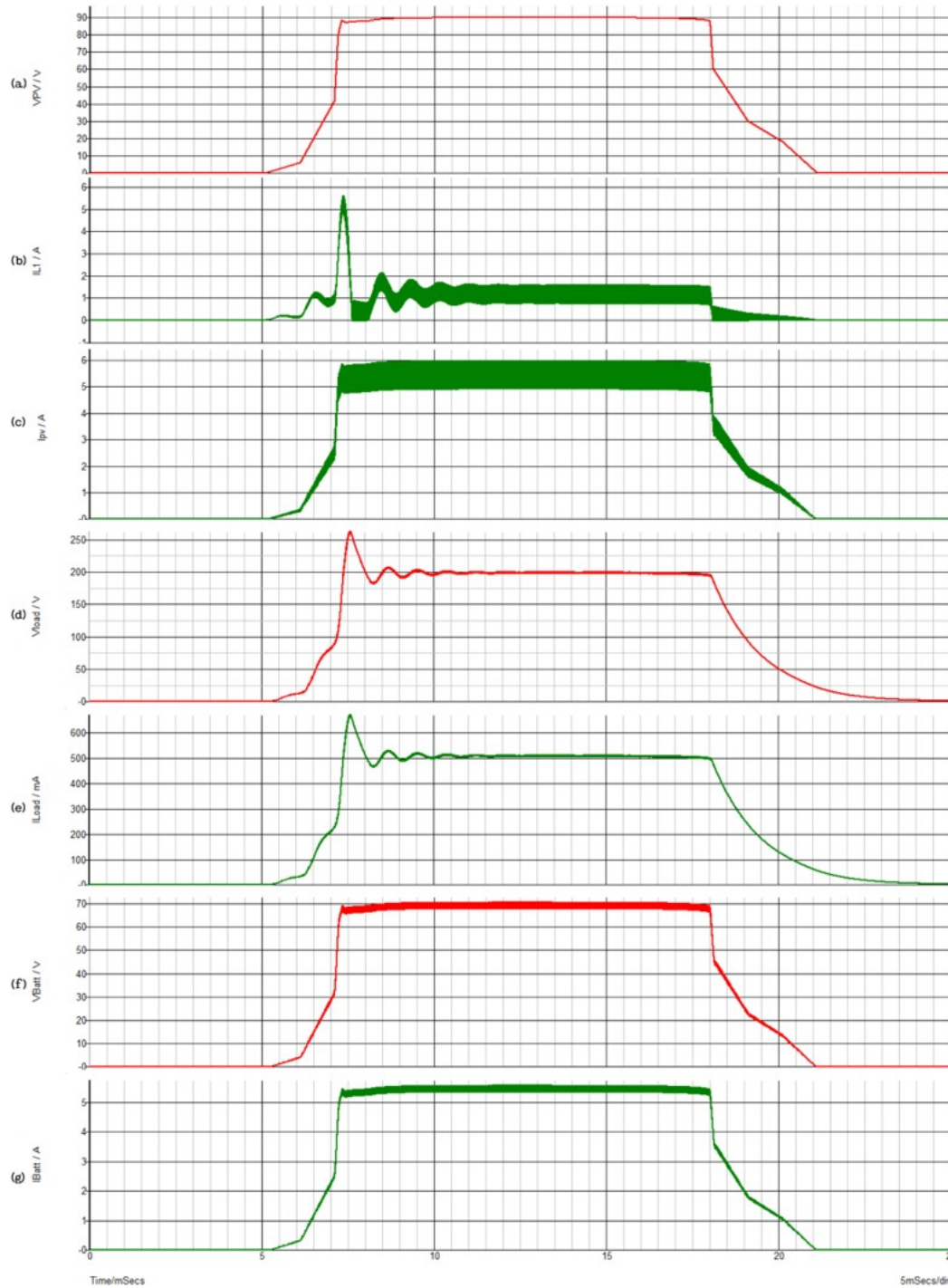


Fig.55 Ejemplo del comportamiento de las formas de onda de tensión y corriente en el Escenario II, durante la operación simultánea del convertidor Boost al 20% y el convertidor Buck al 80%, en modo PV a Batería y Carga con irradiancia del día 3 de septiembre de 2023.

a) Tensión de entrada en el arreglo de paneles solares, b) Corriente de entrada en el inductor 1, c) Corriente de entrada en el panel solar, d) Tensión de salida en la carga, e) Corriente de salida en la carga, f) Tensión de salida en la batería, g) Corriente de salida en la batería.

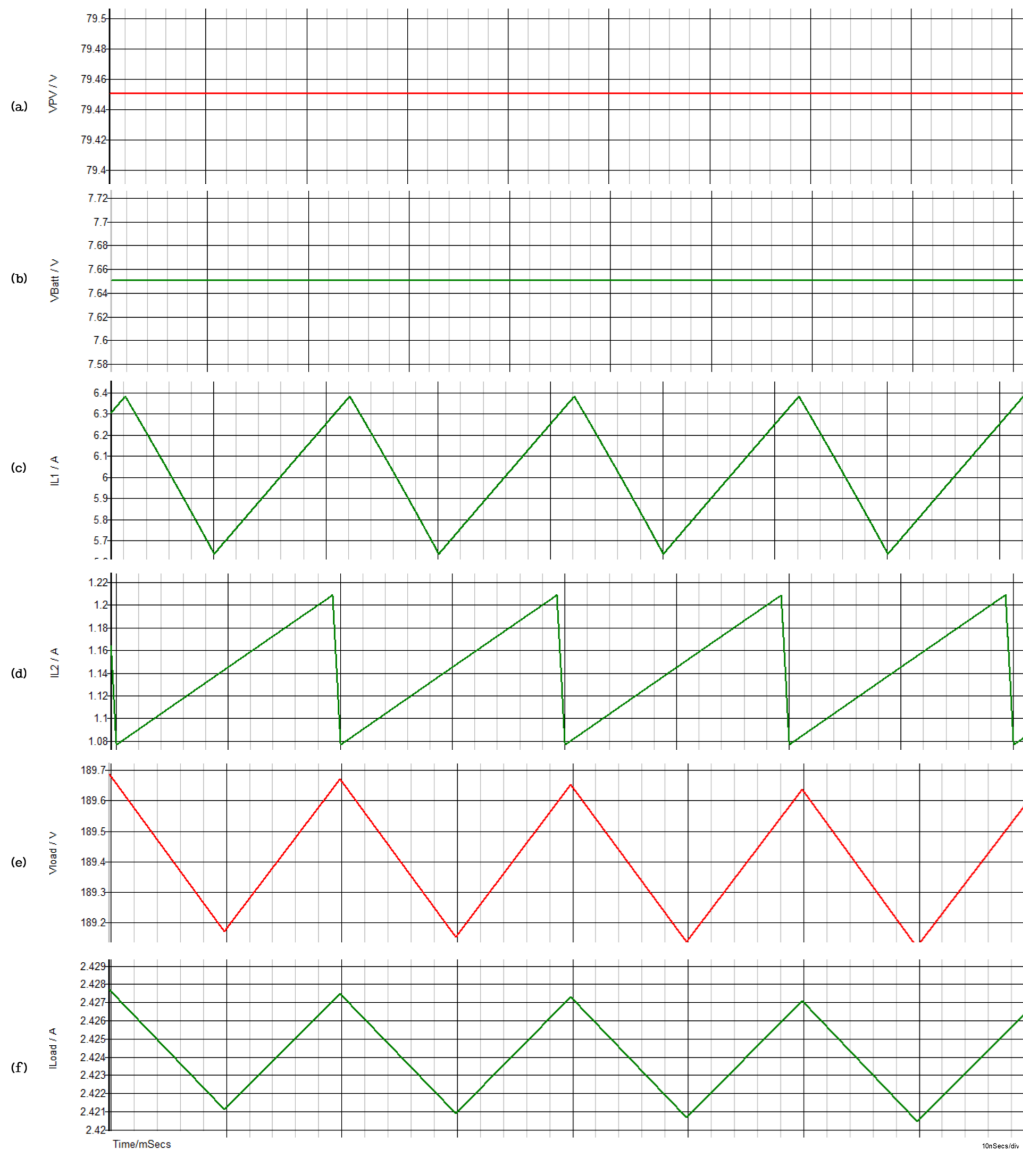


Fig.56 Comportamiento de las formas de onda de tensión y corriente en el Escenario II, durante la operación simultánea de los convertidores Boost al 80% y al 20% en modo PV y Batería a Carga.

a) Tensión de entrada en la batería, b) Tensión de entrada en el arreglo de paneles solares, c) Corriente de entrada en el inductor 1, d) Corriente de entrada en el inductor 2 e) Tensión de salida en la carga, f) Corriente de salida en la carga.

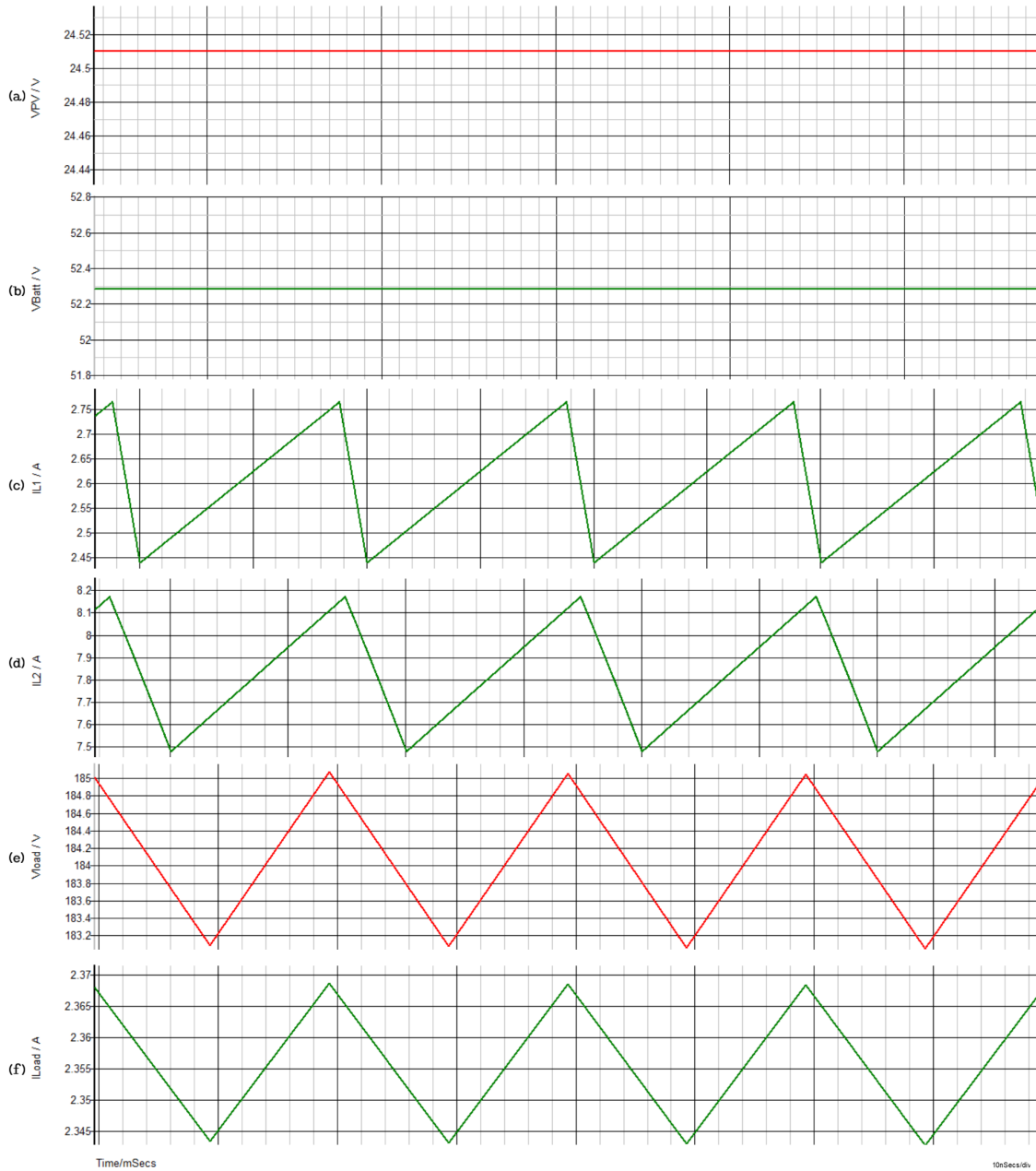


Fig.57 Comportamiento de las formas de onda de tensión y corriente en el Escenario II, durante la operación simultánea de los convertidores Boost al 80% y al 20% en modo PV y Batería a Carga.

a) Tensión de entrada en la batería, b) Tensión de entrada en el arreglo de paneles solares, c) Corriente de entrada en el inductor 1, d) Corriente de entrada en el inductor 2 e) Tensión de salida en la Carga, f) Corriente de salida en la Carga.

Tabla.28 Resultados del análisis matemático en esquema tradicional correspondientes al Escenario I

Modo de operación	PV a Bus CD	Bus CD a Batería	Batería a Carga
Convertidor DC-DC	Boost	Buck	Boost
Tensión de entrada [V]	89.5	200	200
Ciclo de trabajo	0.5525	0.36	0.64
Inductor [μ H]	1200	1000	1000
Condensador [nF]	3000	1000	3300
Corriente promedio en el transistor [A]	1.4142	2.5597	1.682
Tensión máxima del transistor [V]	200	200	200
Corriente promedio en el diodo [A]	1.1455	4.5506	0.9215
Tensión máxima del diodo [V]	200	200	200
Resistencia [Ω]	78.1342	10.1262	78.1342
Frecuencia [kHz]		50	

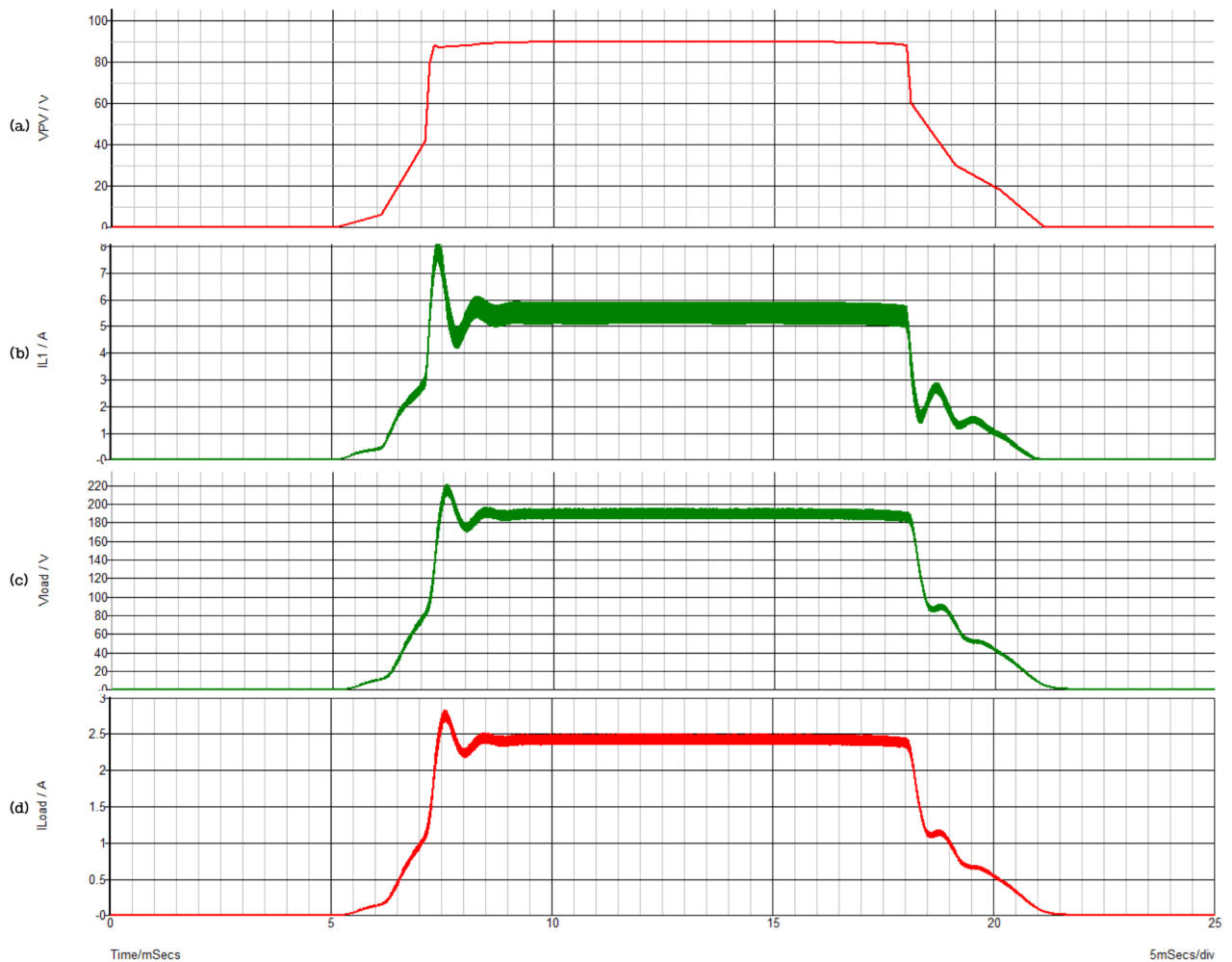


Fig.58 Ejemplo de comportamiento de las formas de onda de tensión y corriente del esquema tradicional en el Escenario II (3 de septiembre de 2023).

a) Tensión de entrada en el arreglo de paneles solares, b) Corriente de entrada en el inductor 1, c) Tensión de salida en el bus, d) Corriente de salida en el bus.