



UNIVERSIDAD DE CONCEPCIÓN
FACULTAD DE INGENIERÍA
DEPARTAMENTO DE INGENIERÍA ELÉCTRICA



TOPOLOGÍAS PARA BESS EN SISTEMAS FOTOVOLTAICOS

POR
JAIME ELISEO GÁLVEZ FERNÁNDEZ

Memoria de Título presentada a la Facultad de Ingeniería de la Universidad de Concepción para
optar al título profesional de Ingeniero Civil Eléctrico

Profesor Guía:
Rubén Sigifredo Peña Guíñez

Marzo 2025
Concepción (Chile)

© 2025 Jaime Eliseo Gálvez Fernández

Se autoriza la reproducción total o parcial, con fines académicos, por cualquier medio o procedimiento, incluyendo la cita bibliográfica del documento.

Agradecimientos

Mis más grandes agradecimientos a mi familia, quienes me han apoyado emocional y económicamente durante mis estudios. Agradezco a mi profesor guía Rubén Peña por su asistencia durante el desarrollo de esta Memoria de Título. Agradezco el apoyo del proyecto ANID/FONDAP/SERC 1523A0006. Agradezco a la Universidad de Concepción y a la Facultad de Ingeniería por brindarme las herramientas necesarias para mi desarrollo académico y profesional. Agradezco a mis amigos cercanos quienes me han proporcionado apoyo y compañía en momentos de estrés. Agradezco al Estado de Chile por sus avances en educación gratuita y de calidad para la población y doy mis esperanzas para que futuras generaciones gocen de aún mejores condiciones.

Resumen

En este trabajo se presenta el análisis y simulación de diferentes topologías de conexión para sistemas de almacenamiento de energía en instalaciones fotovoltaicas. Se evalúan tres configuraciones principales: acoplamiento en AC, acoplamiento en DC mediante un convertidor Bidirectional Buck-Boost, y acoplamiento en DC con un Bidirectional Partial Power Converter.

Para cada topología, se diseñaron estrategias de control basadas en controladores PI y se implementaron en Simulink. La finalidad del control es entregar 7 [kW] constantes a la red eléctrica. Se realizaron simulaciones considerando variaciones de irradiancia para analizar el desempeño de cada configuración en la gestión del flujo de energía entre el sistema fotovoltaico, la batería y la red eléctrica.

Los resultados muestran que todas las topologías permiten una adecuada integración del sistema de almacenamiento, garantizando la entrega de 7 [kW] a la red y regulando el nivel de carga de la batería. Se observó que todas las topologías poseen un factor de potencia muy cercano al unitario, haciendo uso eficiente de la energía.

Este trabajo confirma la viabilidad del almacenamiento de energía en sistemas fotovoltaicos, permitiendo optimizar el aprovechamiento de la energía generada.

Tabla de contenidos

LISTA DE TABLAS.....	VI
LISTA DE FIGURAS.....	VII
1. INTRODUCCIÓN.....	1
1.1 INTRODUCCIÓN.....	1
1.2 TRABAJO PREVIO.....	1
1.2.1 Simulación.....	1
1.2.2 Topologías.....	11
1.3 OBJETIVOS.....	13
1.3.1 Objetivo General.....	13
1.3.2 Objetivos específicos.....	13
2. SIMULACIÓN DE SISTEMA PV CON TOPOLOGÍA BESS CON ACOPLAMIENTO EN AC.....	14
2.1 INTRODUCCIÓN.....	14
2.2 IMPLEMENTACIÓN.....	15
2.2.1 Controladores de corriente.....	15
2.2.2 Controlador de voltaje.....	17
2.2.3 Controlador de corriente de la batería.....	20
3. RESULTADOS DE SIMULACIÓN DE SISTEMA PV CON BESS CON ACOPLAMIENTO AC.....	23
4. SIMULACIÓN DE SISTEMA PV CON TOPOLOGÍA BESS Y ACOPLAMIENTO DC.....	30
4.1 INTRODUCCIÓN.....	30
4.2 IMPLEMENTACIÓN.....	31
4.2.1 Controladores de corriente.....	31
4.2.2 Controlador de voltaje – Boost Converter.....	31
4.2.3 Controlador de voltaje – Bidirectional Buck Boost Converter.....	34
5. RESULTADOS DE SIMULACIÓN DE SISTEMA PV CON BESS CON ACOPLAMIENTO DC.....	37
6. SIMULACIÓN DE SISTEMA PV CON TOPOLOGÍA BESS USANDO PARTIAL POWER CONVERTER CON ACOMPLAMIENTO DC.....	42
6.1 INTRODUCCIÓN.....	42
6.2 IMPLEMENTACIÓN.....	43
6.2.1 Controladores de corriente.....	43
6.2.2 Controlador de voltaje – Boost Converter.....	43
6.2.3 Controlador de corriente de la batería – Bidirectional Partial Power Converter.....	43
7. RESULTADOS DE SIMULACIÓN DE SISTEMA PV CON TOPOLOGÍA BESS USANDO PARTIAL POWER CONVERTER CON ACOPLAMIENTO DC.....	46
8. COMENTARIOS.....	51
8.1 TOPOLOGÍA A: ACOPLAMIENTO EN AC.....	51
8.2 TOPOLOGÍA B: ACOPLAMIENTO EN DC.....	51
8.3 TOPOLOGÍA C: ACOPLAMIENTO EN DC – PARTIAL POWER CONVERTER.....	52
9. CONCLUSIONES.....	53
9.1 SUMARIO.....	53
9.2 CONCLUSIONES.....	53
9.3 TRABAJO FUTURO.....	54
10. REFERENCIAS.....	55

Lista de Tablas

Tabla 4.1: Parámetros Boost Converter..... 32

Tabla 4.2: Parámetros Bidirectional Buck Boost Converter. 35

Tabla 6.1: Parámetros Bidirectional Partial Power Converter..... 44

Lista de Figuras

Figura 1.1: Inversor trifásico tipo puente IGBT-Diode.	2
Figura 1.2: Boost Converter.	2
Figura 1.3: Bidirectional Buck Boost Converter.	3
Figura 1.4: Bidirectional Partial Power Converter.	4
Figura 1.5: Modelo equivalente del condensador de enlace.	5
Figura 1.6: Circuito equivalente de la batería.	6
Figura 1.7: Disposición de módulos para el panel solar.	7
Figura 1.8: Parámetros de módulo " SunPower SPR-415E-WHT-D".	7
Figura 1.9: Curvas características del panel solar.	8
Figura 1.10: Muestreo natural realizado en la generación de PWM.	9
Figura 1.11: Muestreo natural realizado con una portadora diente de sierra.	10
Figura 1.12: Topología A: Acoplamiento en AC.	11
Figura 1.13: Topología B: Acoplamiento en DC.	11
Figura 1.14: Topología C: Acoplamiento en DC - Partial Power Converter.	12
Figura 2.1: Topología A: Acoplamiento en AC.	14
Figura 2.2: Conexión entre la red y el inversor.	15
Figura 2.3: Diseño de los controladores de corriente.	16
Figura 2.4: Implementación de controladores de corriente.	17
Figura 2.5: Balance de potencias en el lado DC de los inversores.	18
Figura 2.6: Diseño del controlador de voltaje.	19
Figura 2.7: Implementación control de voltaje.	19
Figura 2.8: Modelo de la batería	21
Figura 2.9: Diseño del controlador de corriente en la batería.	21
Figura 2.10: Implementación del controlador de corriente en la batería.	22
Figura 3.1: Potencias topología A.	23
Figura 3.2: Voltaje y corriente de fase A, topología A.	24
Figura 3.3: Corriente del panel, topología A.	24
Figura 3.4: Voltaje del panel, topología A.	25
Figura 3.5: Corriente de la batería, topología A.	25
Figura 3.6: Voltaje de la batería, topología A.	26
Figura 3.7: Corriente de eje d de la batería, topología A.	27
Figura 3.8: Corriente eje q de la batería, topología A.	27
Figura 3.9: Corriente eje d del panel, topología A.	28
Figura 3.10: Corriente eje q del panel, topología A.	28
Figura 3.11: State of Charge, topología A.	29
Figura 4.1: Topología B: Acoplamiento en DC.	30
Figura 4.2: Boost Converter.	31
Figura 4.3: Diseño del control de voltaje del panel.	32
Figura 4.4: Root locus del Boost Converter en lazo cerrado.	33
Figura 4.5: Implementación del control de voltaje del panel.	33
Figura 4.6: Bidirectional Buck Boost Converter.	34
Figura 4.7: Diseño del control de voltaje de la batería.	34
Figura 4.8: Root locus del Bidirectional Buck Boost Converter.	35
Figura 4.9: Implementación del control de corriente de la batería.	36
Figura 5.1: Potencias, topología B.	37

Figura 5.2: Voltaje y corriente fase A, topología B.	38
Figura 5.3: Corriente de la batería, topología B.	38
Figura 5.4: Voltaje de la batería, topología B.	39
Figura 5.5: Corriente del panel, topología B.	39
Figura 5.6: Voltaje del panel, topología B.	40
Figura 5.7: Corriente de la red, eje d, topología B.	40
Figura 5.8: Corriente de la red, eje q, topología B.	41
Figura 5.9: State of Charge, topología B.	41
Figura 6.1: Topología C: Acoplamiento en DC - Partial Power Converter.	42
Figura 6.2: Bidirectional Partial Power Converter.	43
Figura 6.3: Diseño del control de voltaje de la batería.	44
Figura 6.4: Root locus del Bidirectional Partial Power Converter.	45
Figura 6.5: Implementación del control de corriente de la batería.	45
Figura 7.1: Potencias, topología C.	46
Figura 7.2: Voltaje y corriente fase A, topología C.	47
Figura 7.3: Corriente de la batería, topología C.	47
Figura 7.4: Voltaje de la batería, topología C.	48
Figura 7.5: Corriente del panel, topología C.	48
Figura 7.6: Voltaje del panel, topología C.	49
Figura 7.7: Corriente de la red, eje d, topología C.	49
Figura 7.8: Corriente de la red, eje q, topología C.	50
Figura 7.9: State of Charge, topología C.	50

1. Introducción

1.1 Introducción

La generación de energía fotovoltaica en Chile es un sector importante de generación para el sistema eléctrico, y debido a sus características, se encuentra en la cima de las listas de prioridad de despacho. Uno de los problemas de las generadoras fotovoltaicas es cuando parte de su generación es asignada como reserva, situación en que parte de la energía no es despachada y por lo tanto desaprovechada. Esta Memoria de Título explora diferentes topologías de conexión entre los convertidores, el panel solar, baterías y la red eléctrica para el almacenamiento de esta energía en baterías.

1.2 Trabajo previo

Para la implementación de las topologías en estudio y su control, se realizarán simulaciones que permitan evaluar su desempeño y analizar los resultados obtenidos. A continuación, se especifica el software a utilizar, junto con una descripción detallada de sus herramientas y su aplicación. Posteriormente, se presentarán las topologías consideradas en este trabajo.

1.2.1 Simulación

- Software

La simulación se realiza en el software Simulink, con apoyo del software Matlab para la realización de cálculos matemáticos. Se simula el sistema durante 2 [s].

- Red eléctrica

La red eléctrica se modela como fuentes de voltaje alterno, sinusoidal, de $220 V_{rms}$ fase-neutro, $380 V_{rms}$ entre fases, frecuencia de 50 Hz, conexión estrella neutro, secuencia positiva, fase “a” en cero grados. Se considera que la red eléctrica tiene un filtro representado por sus parámetros R y L, de valores 0,1257 [Ω] y 0,01 [H] respectivamente.

- Convertidor AC/DC: Inversor bidireccional

Los inversores son convertidores DC/AC que transforman la corriente continua en corriente alterna, esenciales en aplicaciones de energía renovable y accionamientos de motores. Muchos inversores modernos son bidireccionales, permitiéndoles operar como rectificadores de ser necesario, permitiendo el flujo de energía en ambos sentidos.

El inversor se modela mediante el bloque “Universal Bridge” contenido en la librería de Simulink “Simscape Electrical” [1]. Este se selecciona como inversor tipo puente IGBT-Diode, mostrado en la figura 1.1.

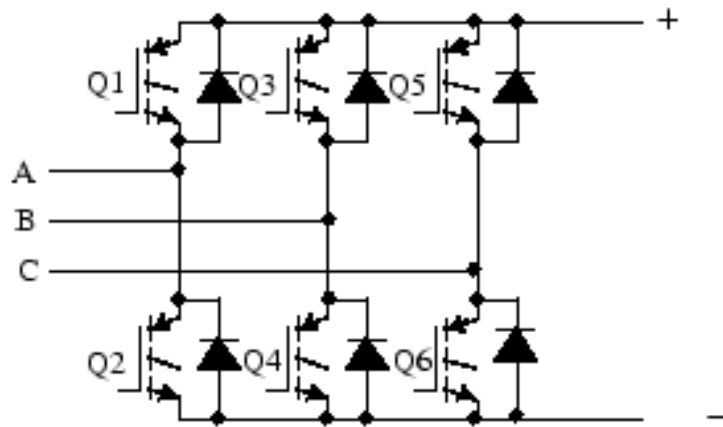


Figura 1.1: Inversor trifásico tipo puente IGBT-Diode. [1].

- Convertidor DC/DC: Boost Converter

Un Boost Converter es un convertidor DC/DC que eleva el voltaje de entrada mientras que reduce la corriente, haciéndolo ideal para aplicaciones fotovoltaicas. Se muestra en la figura 1.2.

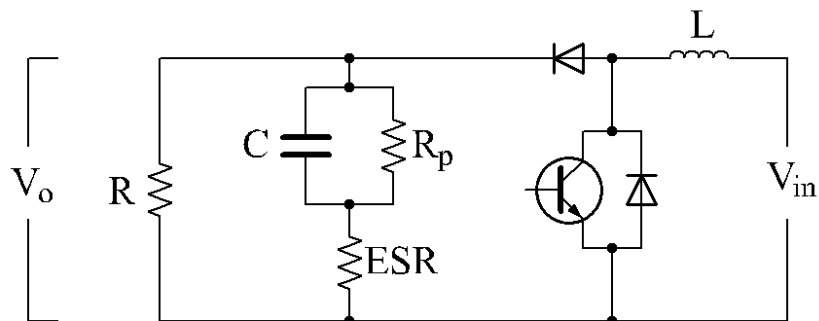


Figura 1.2: Boost Converter. [2].

El Boost Converter se modela de acuerdo con el diagrama utilizado en [2]. El IGBT utilizado es representado por el bloque “IGBT/Diode” de la librería de Simulink “Simscape Electrical” [3].

- Convertidor DC/DC: Bidirectional Buck Boost Converter.

Este convertidor DC/DC puede elevar o reducir el voltaje mientras que permite el flujo de la energía en ambas direcciones. Es comúnmente usado en aplicaciones de baterías, como en vehículos eléctricos y sistemas de almacenamiento de energía, donde la carga y descarga requiere diferentes niveles de voltaje. El convertidor se muestra en la figura 1.3.

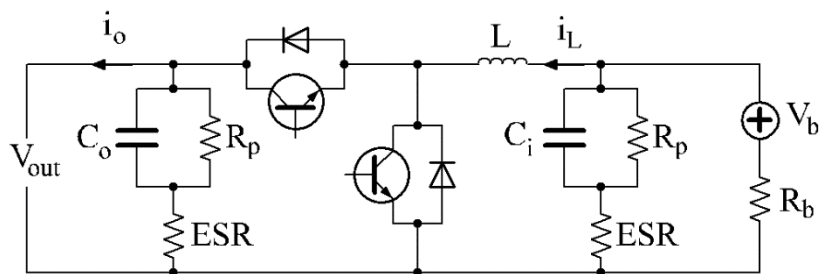


Figura 1.3: Bidirectional Buck Boost Converter. [4].

El Bidirectional Buck Boost Converter se modela de acuerdo con el diagrama utilizado en [4]. Los IGBT utilizados son representados por el bloque “IGBT/Diode” de la librería de Simulink “Simscape Electrical” [3].

- Convertidor DC/DC: Bidirectional Partial Power Converter.

Un Bidirectional Partial Power Converter es un convertidor DC/DC especializado que procesa solo una fracción de la potencia total, mejorando la eficiencia. Es particularmente útil en sistemas BESS, donde minimiza las pérdidas mientras que permite una transferencia de potencia bidireccional. El convertidor se muestra en la figura 1.4.

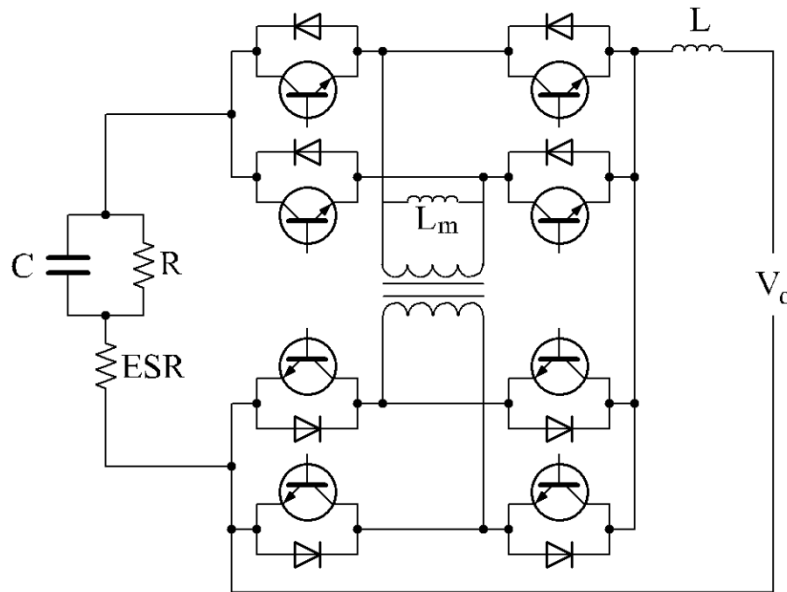


Figura 1.4: Bidirectional Partial Power Converter: [5].

El Bidirectional Partial Power Converter se modela de acuerdo con el diagrama utilizado en [5]. Los IGBT utilizados son representados por el bloque “IGBT/Diode” de la librería de Simulink “Simscape Electrical” [3].

- Condensador de enlace

El condensador de enlace se modela como un condensador con una resistencia en paralelo que simboliza la corriente de fuga, y ambos en serie con una resistencia llamada “Equivalent Series Resistance” o ESR, que simboliza la pérdida de potencia por calor en el capacitor. Para esta simulación se desprecia la inductancia llamada “Equivalent Series Inductance” (ESL), que simboliza la inductancia del material del que está construido el condensador. El condensador de enlace está representado en la figura 1.5.

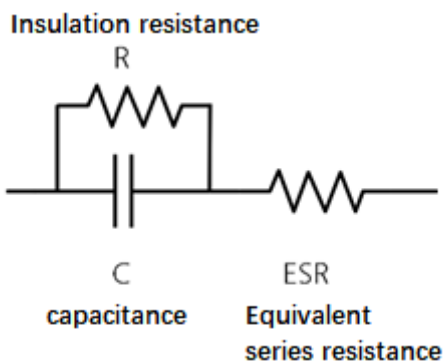


Figura 1.5: Modelo equivalente del condensador de enlace. [7].

Los valores escogidos son considerando que se instalan cuatro condensadores, divididos en dos ramas en paralelo con dos condensadores en serie cada una, con lo que los valores son, por condensador, un voltaje de 400 V, 1000 μF para la capacitancia, 0,0024 A de corriente de fuga, y un ESR de 0,143 Ω [7]. Los valores del condensador equivalente a estos cuatro condensadores conectados de la manera mencionada son un voltaje de 800 V, 1000 μF para la capacitancia, 0,0096 A de corriente de fuga, y un ESR de 0,572 Ω .

- Bateria

La batería se modela usando el bloque llamado “Battery” proporcionado por la librería de Simulink, “Simscape Electrical” [8]. Este se conecta al condensador de enlace del rectificador de frente activo. El circuito equivalente de la batería se muestra en la figura 1.6.

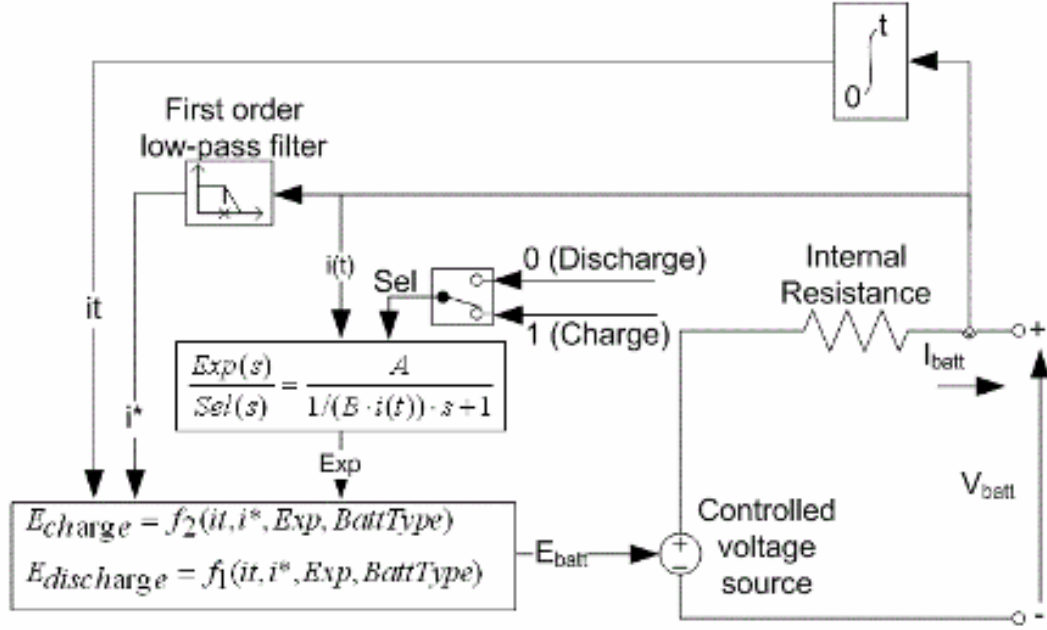


Figura 1.6: Circuito equivalente de la batería. [8].

Los parámetros internos de la batería los determina el bloque mencionado, dependiendo del material del que está hecho la batería y sus capacidades nominales. En este caso se utiliza una batería de Ion de Litio, de voltaje nominal 600 V, corriente nominal de 12 Ah, estado de carga o *State of Charge (SOC)* inicial del 50%, y un tiempo de respuesta de la batería de 30 s. No se consideran los efectos de temperatura ni envejecimiento de la batería en su simulación.

- Características del panel solar

El panel solar referido en este trabajo corresponde a un conexionado de módulos de paneles solares conectados de una forma específica. La red de módulos está compuesta por un conjunto de 9 módulos conectados en serie y 4 de aquellos conjuntos conectados en paralelo, como se aprecia en la figura 1.7.

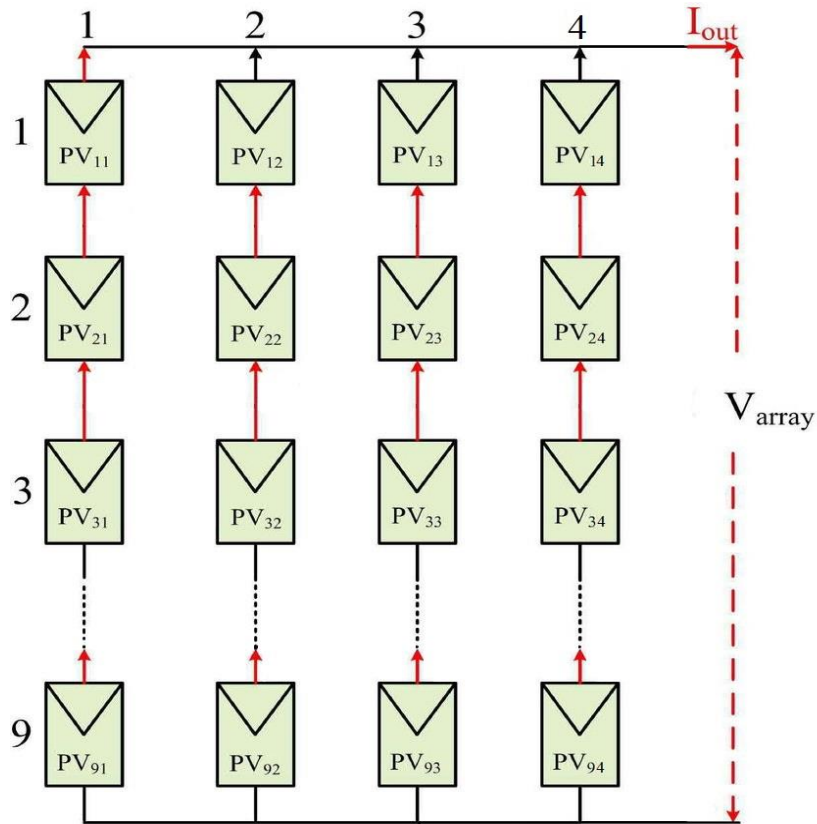


Figura 1.7: Disposición de módulos para el panel solar. [21].

Cada uno de estos módulos corresponde al módulo “SunPower SPR-415E-WHT-D” del bloque “PV Array” de Simulink [9]. Sus parámetros se muestran en la figura 1.8.

Module data	
Module:	SunPower SPR-415E-WHT-D
Maximum Power (W)	414.801
Cells per module (Ncell)	128
Open circuit voltage Voc (V)	85.3
Short-circuit current Isc (A)	6.09
Voltage at maximum power point Vmp (V)	72.9
Current at maximum power point Imp (A)	5.69
Temperature coefficient of Voc (%/deg.C)	-0.229
Temperature coefficient of Isc (%/deg.C)	0.030706

Figura 1.8: Parámetros de módulo “SunPower SPR-415E-WHT-D”.

La irradianza del panel solar es de tal forma que comienza en $900 [W/m^2]$ y esta decrece como rampa a partir de los $0,8 [s]$ hasta los $1,2 [s]$ donde se establece en $300 [W/m^2]$. La potencia máxima que el panel puede entregar es de $13\,437 [W]$ correspondientes al primer caso y $4\,405 [W]$ para el último. Dicha información se aprecia en la figura 1.9.

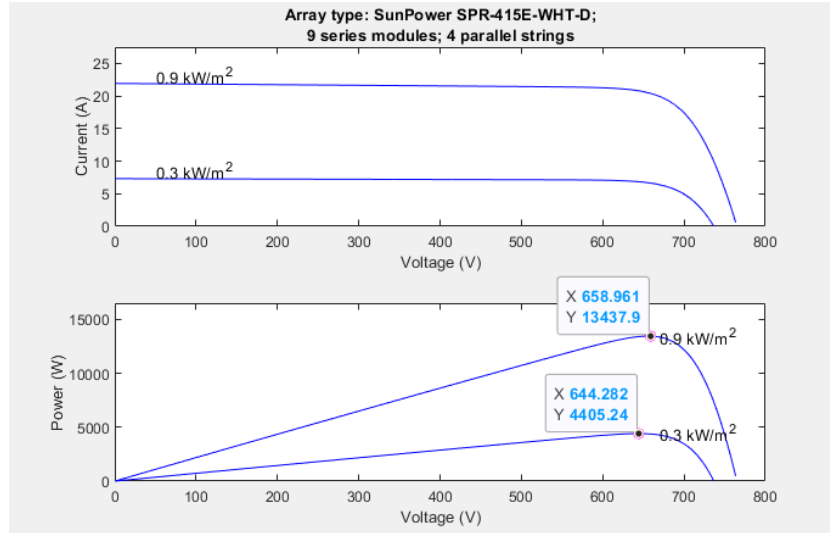


Figura 1.9: Curvas características del panel solar.

El voltaje de referencia para el panel solar es obtenido utilizando la técnica “Maximum Power Point Tracking” (MPPT) con el fin de maximizar la potencia que entrega el panel.

- Transformada dq0

Los controladores se calculan e implementan en coordenadas dq0 debido a que así es más sencillo trabajar con circuitos trifásicos. Las transformadas utilizadas en este trabajo corresponden a las transformadas $T_{abc-dq0}(t)$ y su contraparte $T_{dq0-abc}(t)$. La implementación de estas transformaciones es realizada a través de los bloques “abc to dq0” y “dq0 to abc” proporcionados por la librería de Simulink “Simscape Electrical” [10], considerando que la alineación en $\omega t = 0$ del eje rotatorio está 90 grados detrás de la fase a, esto último quiere decir que al aplicar la transformación a una señal de secuencia positiva de magnitud 1 y fase 0 *grados*, se obtiene un valor de $d = 1$ y $q = 0$.

De acuerdo con la documentación del bloque, la transformación abc a dq0 está dada por la ecuación 1.1.

$$T_{abc-dq0}(t) = \frac{2}{3} \begin{bmatrix} \sin(\omega t) & \sin\left(\omega t - \frac{2\pi}{3}\right) & \sin\left(\omega t + \frac{2\pi}{3}\right) \\ \cos(\omega t) & \cos\left(\omega t - \frac{2\pi}{3}\right) & \cos\left(\omega t + \frac{2\pi}{3}\right) \\ \frac{1}{2} & \frac{1}{2} & \frac{1}{2} \end{bmatrix} \quad (1.1)$$

Similarmente, la transformación dq0 a abc está dada por la ecuación 1.2.

$$T_{dq0-abc}(t) = \begin{bmatrix} \sin(\omega t) & \cos(\omega t) & 1 \\ \sin\left(\omega t - \frac{2\pi}{3}\right) & \cos\left(\omega t - \frac{2\pi}{3}\right) & 1 \\ \sin\left(\omega t + \frac{2\pi}{3}\right) & \cos\left(\omega t + \frac{2\pi}{3}\right) & 1 \end{bmatrix} \quad (1.2)$$

La aplicación de las transformadas es realizada tal que la transformación está sincronizada con la frecuencia de la red.

- Generación de PWM para los inversores

La generación del PWM para los inversores es realizada a través del bloque “PWM Generator (2-level)”, proporcionado por la librería de Simulink “Simscape Electrical” [11], configurado para generar un PWM de tipo puente trifásico. Este genera pulsos para convertidores que utilizan topologías de dos niveles de tensión, que es el caso de los inversores. La técnica de muestreo utilizada es la llamada “Natural Sampling”, o muestreo natural, la cual modela el comportamiento de una implementación analógica de un generador de PWM, como se muestra en la figura 1.10.

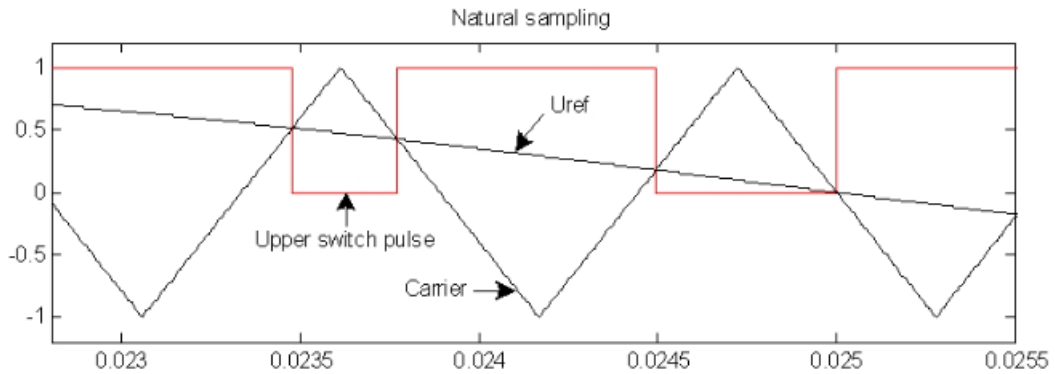


Figura 1.10: Muestreo natural realizado en la generación de PWM. [11].

Para esto se utiliza una portadora triangular de valores $[-1 \ 1]$ con una frecuencia de 5 $[kHz]$ y una fase inicial en 0 grados, lo cual significa que la portadora comienza en su valor mínimo, -1 , con pendiente positiva.

La señal de referencia, o señal moduladora, se calcula utilizando 1.3.

$$m = \frac{v_r^{abc}(t)}{v_{dc}(t)/2} \quad (1.3)$$

El voltaje v_{dc} es medido en el condensador de enlace y el voltaje v_r^{abc} es obtenido al aplicar la transformación $T_{dq0-abc}(t)$ a los voltajes $v_r^d(t)$ y $v_r^q(t)$, cuya obtención es descrita más adelante en la implementación de los controladores de corriente.

- Generación de PWM para convertidores DC-DC

La generación del PWM para los convertidores DC-DC es realizada a través del bloque “PWM Generator (DC-DC)” proporcionado por la librería de Simulink “Simscape Electrical” [12]. Este genera señales de pulso para disparar switches de convertidores de un cuadrante, como el boost o buck converter. Para convertidores de dos cuadrantes se utiliza la señal PWM y su negado. La técnica de muestreo es también “Natural Sampling”, pero utilizando como portadora una señal diente de sierra. La frecuencia de la portadora es de 8000 Hz . La técnica de muestreo se aprecia en la figura 1.11.

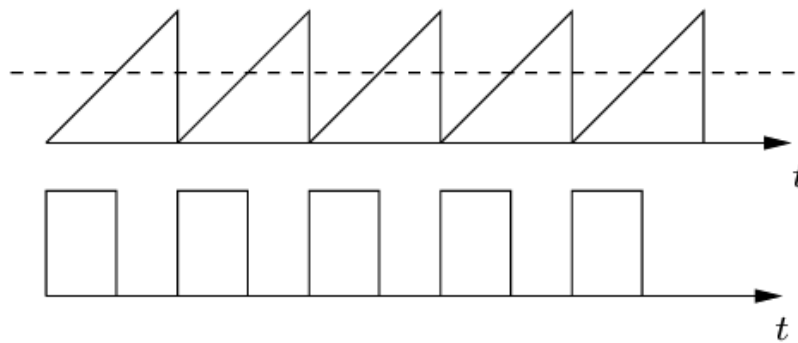


Figura 1.11: Muestreo natural realizado con una portadora diente de sierra.

1.2.2 Topologías

Las siguientes topologías están diseñadas para satisfacer la demanda de potencia de la red eléctrica. En situaciones donde la generación excede la demanda, el excedente se almacena en baterías, mientras que, en caso de un déficit de potencia, la energía necesaria se extrae de ellas. Para este trabajo, la demanda de la red se establece en 7000 [W].

- Topología A: Acoplamiento en AC.

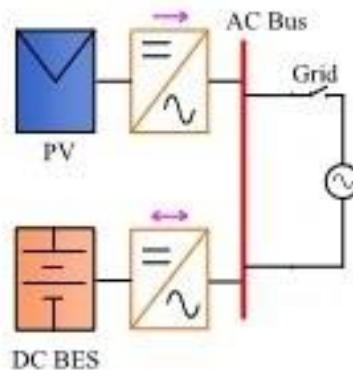


Figura 1.12: Topología A: Acoplamiento en AC.

La topología A consiste en dos convertidores DC-AC implementados directamente al enlace AC que conecta a la red. En este trabajo se utilizarán inversores, los cuales permiten flujo de potencia bidireccional para la batería. Se muestra el esquema en la figura 1.12. [13]

- Topología B: Acoplamiento en DC.

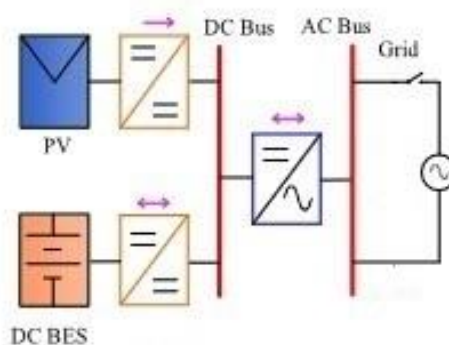


Figura 1.13: Topología B: Acoplamiento en DC.

La topología B consiste en dos convertidores DC-DC conectados a un enlace DC, el cual se conecta a la red mediante un inversor. Se implementará un Boost Converter para el panel solar el cual determinará el funcionamiento del panel solar en su punto de máxima transferencia de potencia, y un Bidirectional Buck-Boost converter para la batería, el cual permite el flujo de potencia bidireccional para la carga y descarga. Se muestra el esquema en la figura 1.13. [13]

- Topología C: Acoplamiento en DC – Partial Power Converter.

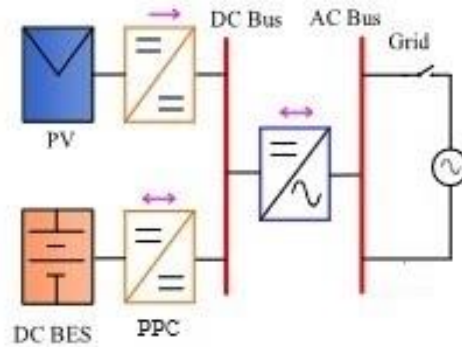


Figura 1.14: Topología C: Acoplamiento en DC - Partial Power Converter.

La topología C consiste en dos convertidores DC-DC conectados a un enlace DC, el cual se conecta a la red mediante un inversor. Se implementará un Boost Converter para el panel solar el cual determinará el funcionamiento del panel solar en su punto de máxima transferencia de potencia, y un Bidirectional Partial Power Converter para la batería, el cual permite flujo bidireccional de potencia para carga y descarga. Se muestra el esquema en la figura 1.14. [5]

1.3 Objetivos

1.3.1 Objetivo General

Simular y analizar diferentes topologías de conexión para paneles solares alimentando a la red eléctrica y para el almacenaje de energía sobrante en baterías.

1.3.2 Objetivos específicos

- Desarrollar estrategias de control para las topologías seleccionadas.
- Simular las topologías desarrolladas en ambiente Simulink.
- Obtener resultados bajo diferentes condiciones de operación.
- Analizar el desempeño de cada una de las topologías.

2. Simulación de sistema PV con topología BESS con acoplamiento en AC

2.1 Introducción

Este capítulo presenta la simulación de la topología A: acoplamiento en AC. Dicha topología está compuesta por dos inversores bidireccionales conectados a la red, como se muestra en la figura 2.1. [14]

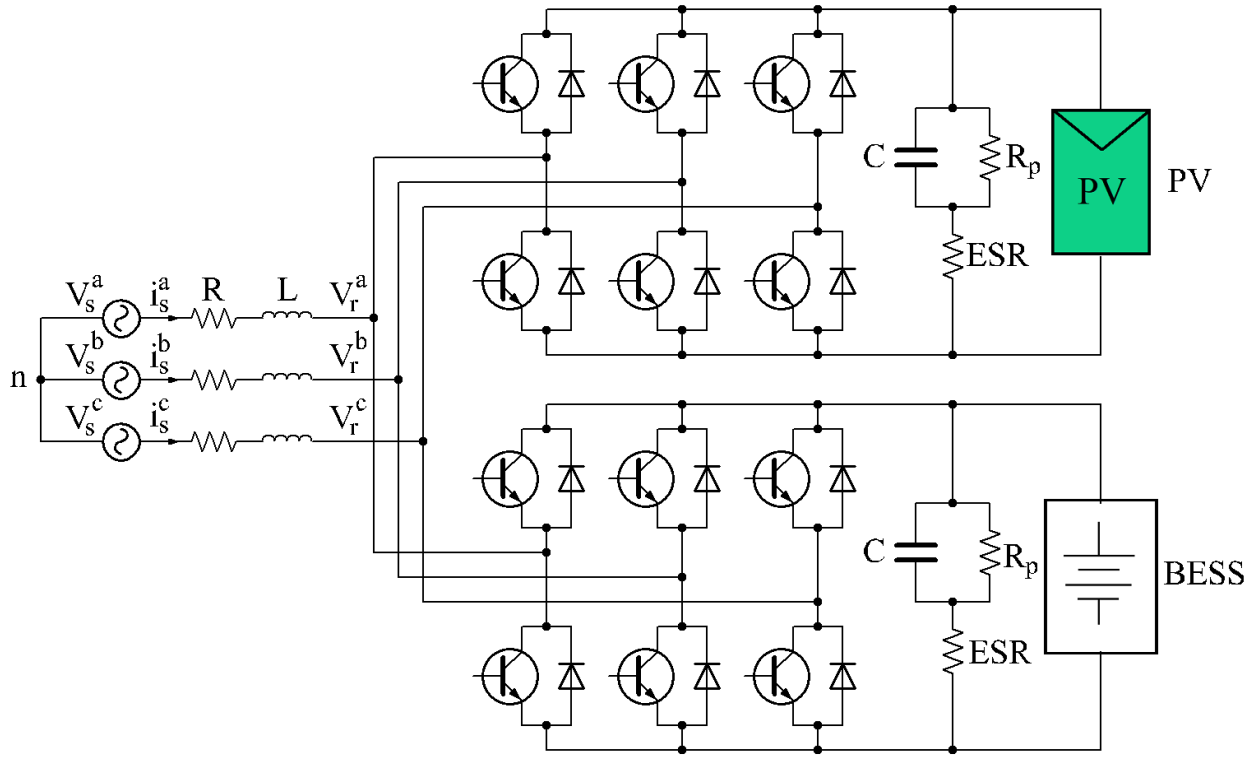


Figura 2.1: Topología A: Acoplamiento en AC. [14].

El primer inversor conecta el panel solar al enlace AC, mientras que el segundo conecta la batería con dicho enlace. Gracias a su capacidad bidireccional, el inversor de la batería permite tanto la carga como la descarga de la batería. Ambos inversores están acoplados en el enlace AC y posteriormente conectados a la red eléctrica.

El control de los convertidores se implementa mediante un controlador PI, que permite cero error en estado estacionario ante estrada escalón.

La potencia que se quiere entregar a la red eléctrica es de 7 [kW].

2.2 Implementación

2.2.1 Controladores de corriente

La implementación de los inversores se realiza como se muestra en la figura 2.2. [14]

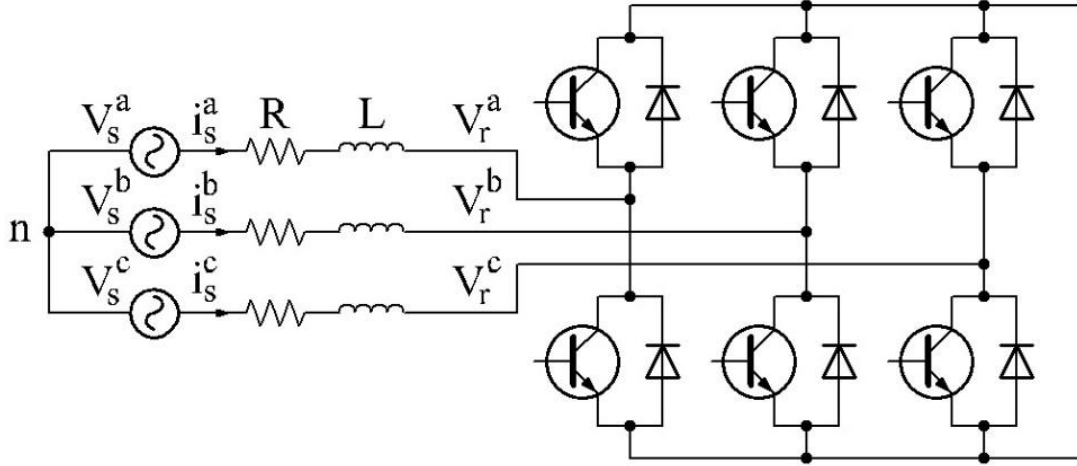


Figura 2.2: Conexión entre la red y el inversor. [14].

Los controladores de corriente son diseñados e implementados en coordenadas dq para la simplificación de su obtención e implementación. Al realizar un análisis de malla entre los voltajes de fase de la red eléctrica y los voltajes de fase del lado alterno del convertidor se obtiene la ecuación 2.1.

$$v_s^{abc}(t) = R \cdot i_s^{abc}(t) + L \cdot \frac{d}{dt} i_s^{abc}(t) + v_r^{abc}(t) \quad (2.1)$$

Aplicando $T_{abc-dq0}$ se obtiene la ecuación 2.2.

$$v_s^{dq}(t) = R \cdot i_s^{dq}(t) + L \cdot \frac{d}{dt} i_s^{dq}(t) + v_r^{dq}(t) + L \cdot W \cdot i_s^{dq}(t) \quad (2.2)$$

Con W definido como en la ecuación 2.3.

$$W = \begin{pmatrix} 0 & -\omega \\ \omega & 0 \end{pmatrix} \quad (2.3)$$

A fin de desacoplar las ecuaciones de los ejes d y q, se introducen los términos de compensación de las ecuaciones 2.4 y 2.5.

$$v_r^d(t) = -v_s^{d'}(t) + (\omega \cdot L \cdot i_s^q(t) + v_s^d(t)) \quad (2.4)$$

$$v_r^q(t) = -v_s^{q'}(t) - (\omega \cdot L \cdot i_s^d(t) + v_s^q(t)) \quad (2.5)$$

Obteniéndose las ecuaciones 2.6 y 2.7.

$$v_s^{d'}(t) = R \cdot i_s^d(t) + L \cdot \frac{d}{dt} i_s^d(t) \quad (2.6)$$

$$v_s^{q'}(t) = R \cdot i_s^q(t) + L \cdot \frac{d}{dt} i_s^q(t) \quad (2.7)$$

Por lo tanto, para cada uno de los lazos de corriente, la planta queda descrita por la ecuación 2.8.

$$F_{i_s^{dq}/v_s^{dq'}}(s) = \frac{i_s^d(s)}{v_s^{d'}(s)} = \frac{i_s^q(s)}{v_s^{q'}(s)} = \frac{1}{Ls + R} \quad (2.8)$$

Finalmente, para controlar la corriente, se aplica un PI a modo de tener cero error en estado estacionario ante entrada escalón. Este se diseña de acuerdo a lo mostrado en la figura 2.3.

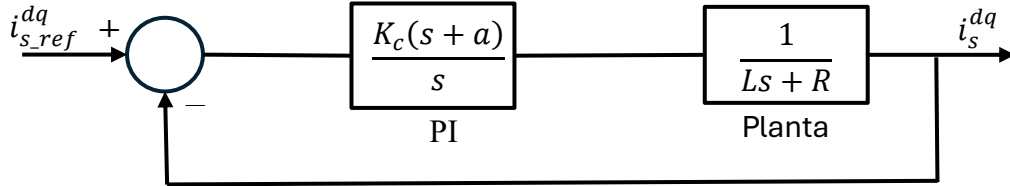


Figura 2.3: Diseño de los controladores de corriente. [14].

Realizando un análisis a este sistema realimentado se obtiene que su función de transferencia está dada por la ecuación 2.9.

$$F_{i_s^{dq}/i_s^{dq ref}} = \frac{K_c(s+a)/L}{s^2 + \left(\frac{R+K_c}{L}\right)s + \frac{K_c a}{L}} \quad (2.9)$$

Comparando el polinomio característico de esta función de transferencia con la forma general de un polinomio de segundo orden, se obtienen las ecuaciones 2.10 y 2.11.

$$K_c = 2 \cdot \zeta \cdot \omega_n \cdot L - R \quad (2.10)$$

$$a = \frac{\omega_n^2 \cdot L}{K_c} \quad (2.11)$$

Se elige un factor de amortiguamiento de $\zeta = 0,8$, y una frecuencia natural de $\omega_n = 2\pi \cdot 100$ lo cual entrega los valores $K_c = 9,9274$ y $a = 397,67$.

Encontrados los valores de los controladores PI, estos se implementan como se aprecia en la figura 2.4:

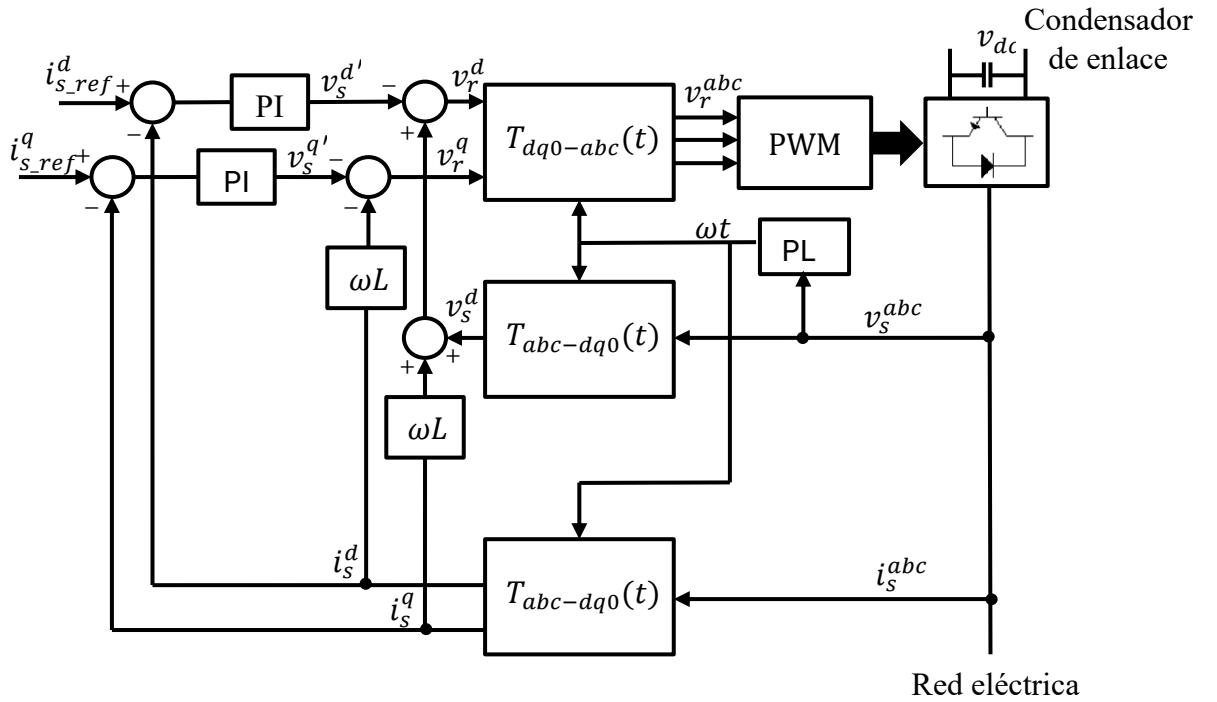


Figura 2.4: Implementación de controladores de corriente.

2.2.2 Controlador de voltaje

El control de voltaje se realiza en el lado DC de los inversores. El esquema a analizar se presenta en la figura 2.5.

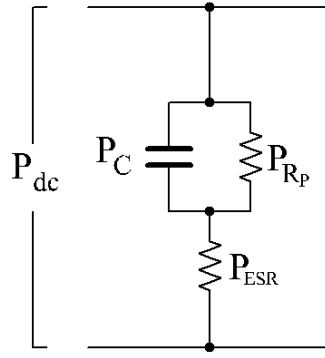


Figura 2.5: Balance de potencias en el lado DC de los inversores.

Realizando un análisis de potencia en la rama del condensador, se encuentra que su balance está representado por la ecuación 2.12.

$$P_{dc} = P_C + P_{R_p} + P_{ESR} \quad (2.12)$$

El control se realizará compensando P_{ESR} en la implementación a modo de simplificar el cálculo del controlador de voltaje. Dado que la caída de voltaje en la ESR es muy pequeña (del orden de $\approx 1 V$) comparada con el voltaje del condensador de enlace, se asume que $v_{dc} \approx v_C$, lo que da origen a 2.13 y 2.14.

$$P_{dc} = v_{dc}(t) \cdot i_C(t) + v_{dc}(t) \cdot i_{R_p}(t) \quad (2.13)$$

$$\Rightarrow P_{dc} = v_{dc}(t) \cdot C \frac{d}{dt} v_{dc}(t) + v_{dc}(t) \cdot \frac{v_{dc}}{R_p} \quad (2.14)$$

Por lo tanto, la planta queda descrita por la ecuación 2.15.

$$F_{v_{dc}^2/P_{dc}} = \frac{1}{sC + 1/R_p} \quad (2.15)$$

Se utiliza un PI para controlar el nivel de voltaje, por lo que el diseño del controlador se realiza como se muestra en la figura 2.6.

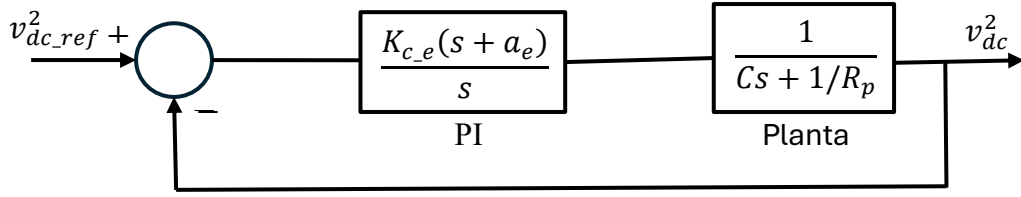


Figura 2.6: Diseño del controlador de voltaje.

Realizando un análisis al sistema realimentado se obtiene que su función de transferencia está dada por la ecuación 2.16.

$$F_{v_{dc}^2/v_{dc_ref}^2}(s) = \frac{K_{c_e}(s + a_e)/C}{s^2 + \left(\frac{1/R_p + K_{c_e}}{C}\right)s + \frac{K_{c_e}a_e}{C}} \quad (2.16)$$

Comparando el polinomio característico de esta función de transferencia con la forma general de un polinomio de segundo orden, se obtienen las ecuaciones 2.17 y 2.18.

$$K_{c_e} = 2 \cdot \zeta \cdot \omega_{n_e} \cdot C - 1/R_p \quad (2.17)$$

$$a_e = \frac{\omega_{n_e}^2 \cdot C}{K_{c_e}} \quad (2.18)$$

Se elige un factor de amortiguamiento de $\zeta = 0,8$, y una frecuencia natural tal que el controlador de voltaje es diez veces más lento que los de corrientes, $\omega_n = 2\pi \cdot 10$ lo cual entrega los valores $K_{c_e} = 0,1005$ y $a_e = 39,2746$.

Ya encontrados los valores del controlador PI, este se implementa como se muestra en la figura 2.7.

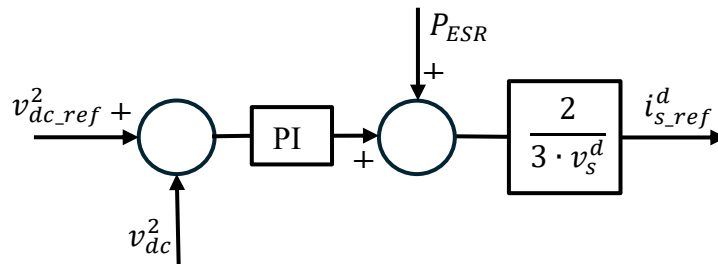


Figura 2.7: Implementación control de voltaje.

El voltaje de referencia está dado por el MPPT para el caso del panel, mientras que, para el caso de la batería, este depende de la corriente.

Cabe notar que se relaciona la salida del PI, que es la potencia presente en el condensador de enlace, con la corriente $i_{s_ref}^d$ como referencia para el controlador de corriente eje d a partir del nivel de voltaje. Esto se implementa a partir del hecho de que la potencia en ejes abc y la potencia en ejes dq se relaciona de la manera descrita en la ecuación 2.19, lo que da origen a las ecuaciones 2.20, 2.21 y 2.22.

$$P_{abc} = 3 \cdot v_{rms} \cdot i_{rms} \quad (2.19)$$

$$P_{dq} = v_s^d \cdot i_s^d = \sqrt{2} \cdot v_{rms} \cdot \sqrt{2} \cdot i_{rms} = 2 \cdot v_{rms} \cdot i_{rms} \quad (2.20)$$

$$\Rightarrow P_{dq} = P_{abc} \cdot 2/3 \quad (2.21)$$

$$\Rightarrow P_{abc} = 3/2 \cdot P_{dq} \quad (2.22)$$

Por lo tanto, la potencia en el condensador de enlace está dada por la ecuación 2.23.

$$P_{dc} = 3/2 \cdot v_s^d \cdot i_s^d \quad (2.23)$$

Por lo tanto, la corriente de referencia eje d se calcula a partir de la ecuación 2.24.

$$i_{s_ref}^d = \frac{2P_{dc}}{3v_s^d} \quad (2.24)$$

2.2.3 Controlador de corriente de la batería

Para efectos de diseño del controlador la batería se modela como una fuente de voltaje continuo en serie con una resistencia, estos conectados al condensador de enlace. Se muestra este esquema en la figura 2.8.

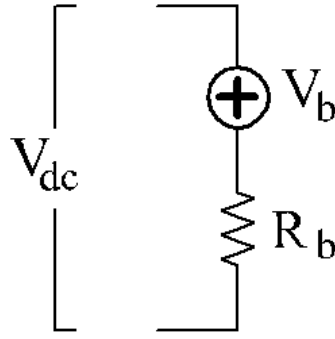


Figura 2.8: Modelo de la batería

La ecuación de la malla de voltaje está dada por 2.25

$$v_{dc}(t) = v_b(t) + i_b(t)R \quad (2.25)$$

Se define la variable $v_u(t)$ en la ecuación 2.26.

$$v_u(t) = v_{dc}(t) - v_b(t) \quad (2.26)$$

Considerando lo anterior, se tiene que la planta está dada por la ecuación 2.27.

$$F_{i_b/v_u}(s) = \frac{1}{R_b} \quad (2.27)$$

Se utiliza un PI para controlar la corriente de la batería, por lo que el diseño del controlador se realiza como se muestra en la figura 2.9.

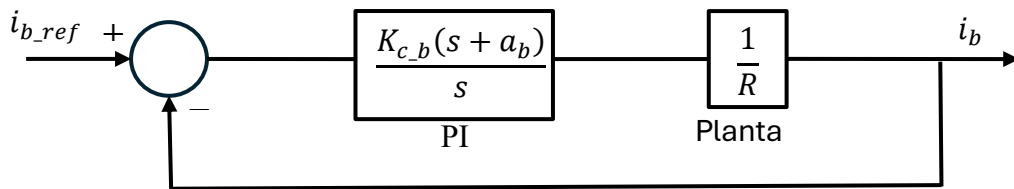


Figura 2.9: Diseño del controlador de corriente en la batería.

Realizando un análisis al sistema realimentado se obtiene que su función de transferencia está dada por la ecuación 2.28.

$$F_{i_b/i_{b_ref}}(s) = \frac{K_{c_b}(s + a_b)}{s^2 + (R_b + K_{c_b})s + K_{c_b}a_b} \quad (2.28)$$

Comparando el polinomio característico de esta función de transferencia con la forma general de un polinomio de segundo orden, se obtienen las ecuaciones 2.29 y 2.30.

$$K_{c_b} = 2 \cdot \zeta \cdot \omega_{n_b} - R_b \quad (2.29)$$

$$a_b = \frac{\omega_{n_b}^2}{K_{c_b}} \quad (2.30)$$

Se elige un factor de amortiguamiento de $\zeta = 0,8$, y una frecuencia natural tal que el controlador de corriente en la batería es diez veces más lento que el controlador de voltaje, $\omega_n = 2\pi$ lo cual entrega los valores $K_{c_b} = 10,0531$ y $a_b = 3,927$.

Ya encontrados los valores del controlador PI, este se implementa como se muestra en la figura 2.10.

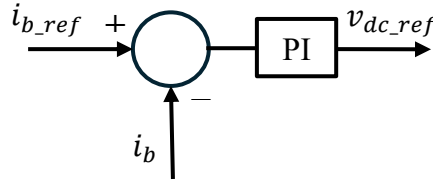


Figura 2.10: Implementación del controlador de corriente en la batería.

La corriente de referencia se determina a partir de la potencia que se desea inyectar en la red. En este informe, se establece una entrega constante de 7 [kW] a la red, por lo que la corriente de referencia se implementa como en la ecuación 2.31.

$$i_{b_ref} = \frac{P_{PV} - 7000}{v_b} \quad (2.31)$$

3. Resultados de simulación de sistema PV con BESS con acoplamiento AC

Los resultados de la simulación para la topología A se muestran a continuación.

El balance de potencias de la topología A se muestra en la figura 3.1. En esta simulación, el objetivo es entregar una potencia constante de 7 [kW] a la red eléctrica. Inicialmente, cuando la irradianza es alta, el panel fotovoltaico genera suficiente energía para cubrir tanto la demanda de la red como para cargar la batería con el excedente de potencia. A medida que la irradianza disminuye y la producción del panel cae, se observa que la batería comienza a suplir la potencia faltante, descargándose para mantener la entrega constante de 7 [kW] a la red. Este comportamiento coordinado entre el panel y la batería evidencia una adecuada respuesta del sistema de almacenamiento de energía ante variaciones de generación, permitiendo mantener la potencia de salida hacia la red sin interrupciones.

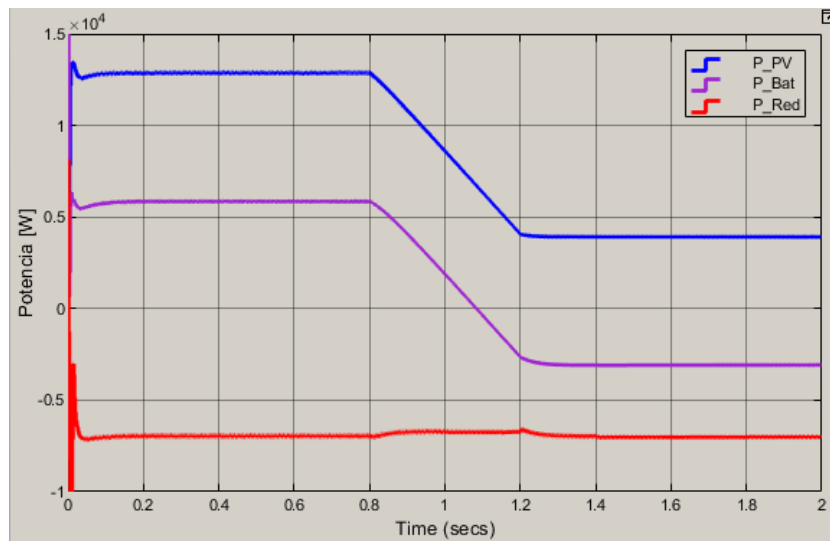


Figura 3.1: Potencias topología A.

El voltaje y corriente de fase A se muestra en la figura 3.2. Es posible identificar que el factor de potencia es muy cercano al unitario, dado que se busca entregar potencia activa a la red.

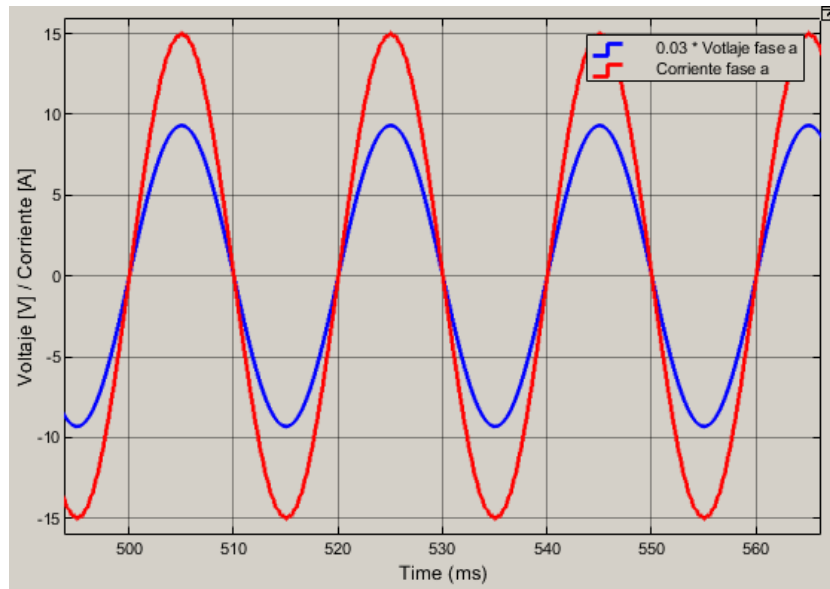


Figura 3.2: Voltaje y corriente de fase A, topología A.

La corriente del panel solar se muestra en la figura 3.3. La corriente es negativa debido a que se midió en sentido inverso. El panel solar es capaz de entregar más corriente al verse expuesto a mayor irradianza, mientras que a medida que esta disminuye, consecuentemente la corriente también lo hace.

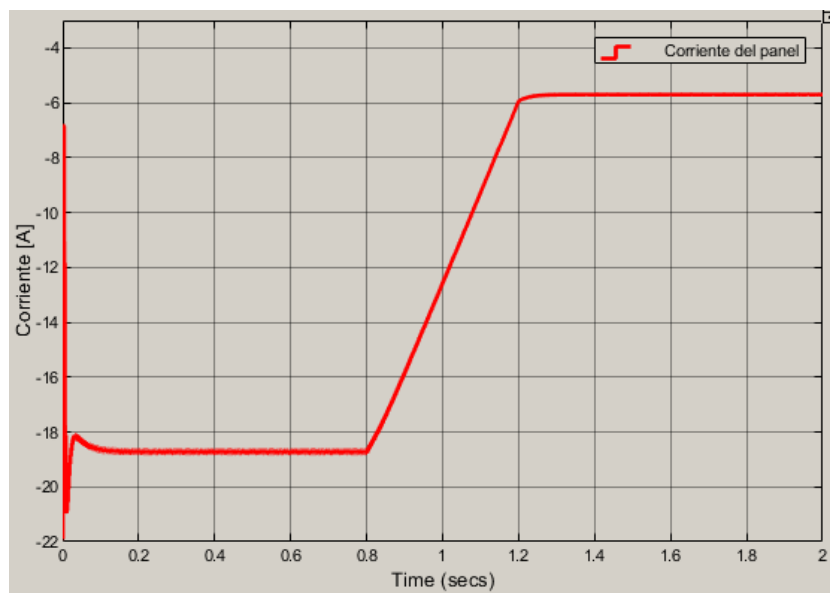


Figura 3.3: Corriente del panel, topología A.

El voltaje del panel solar y su referencia se muestran en la figura 3.4. El voltaje del panel solar sigue de cerca a la referencia.

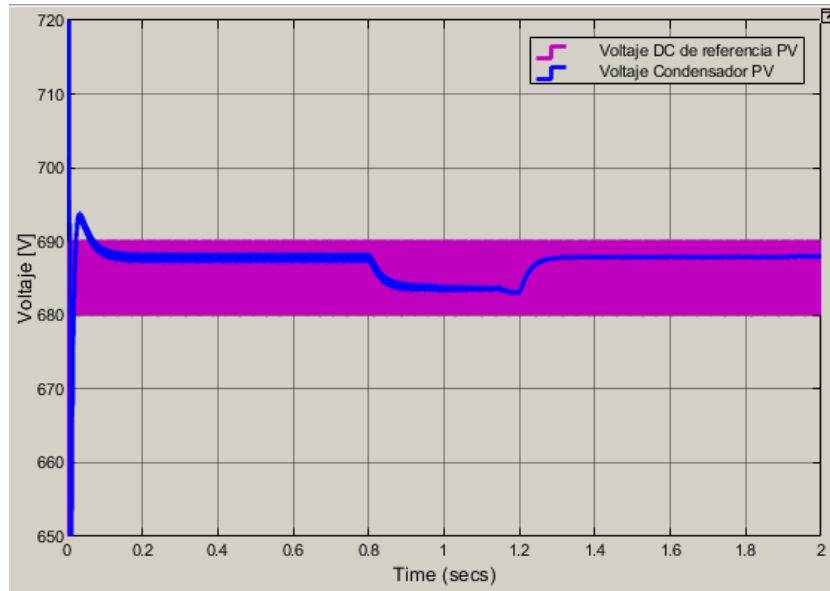


Figura 3.4: Voltaje del panel, topología A

La corriente de la batería y su referencia se muestran en la figura 3.5. Un valor positivo de corriente significa que la batería está absorbiendo potencia, en otras palabras, cargándose. A medida que baja la irradianza, la batería suplente la potencia necesaria, invirtiendo el sentido de la corriente.

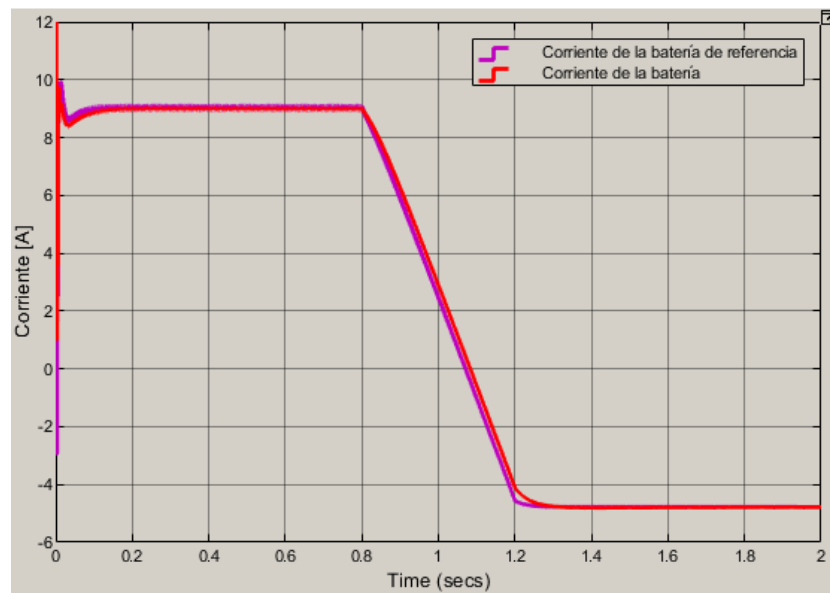


Figura 3.5: Corriente de la batería, topología A.

El voltaje de la batería y su referencia se muestran en la figura 3.6. El voltaje de la batería sigue de cerca a la referencia excepto durante el transiente. La pequeña variación de voltaje entre el estado inicial y final representan la diferencia de voltaje necesaria para que la batería cargue o descargue.

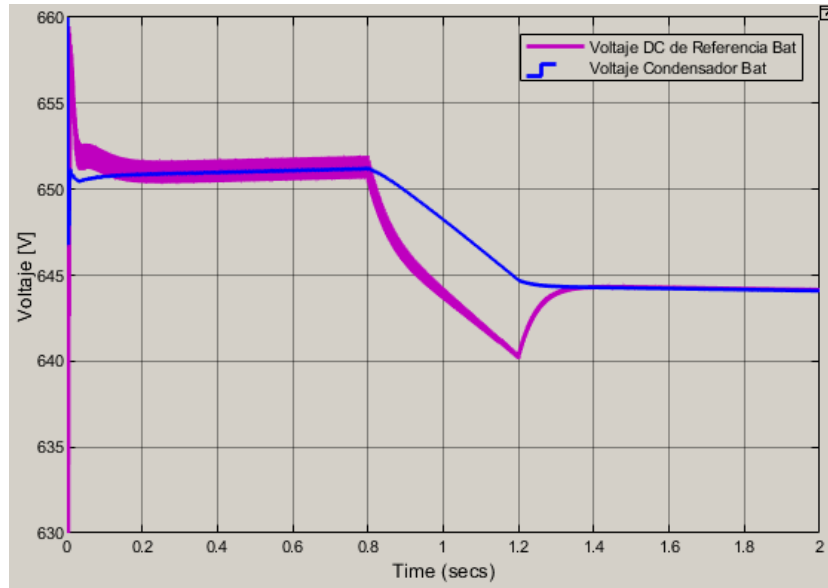


Figura 3.6: Voltaje de la batería, topología A.

La corriente de eje d de la batería y su referencia se muestran en la figura 3.7. La corriente que la red percibe como la corriente de la batería. Un valor positivo de corriente indica la carga de la batería. Es como si la red estuviese cargando la batería (debido a que esta se conecta al enlace AC junto con los inversores), pero un análisis más acertado es que aquí se muestra cómo se desvía la potencia desde el panel solar hacia la batería en el enlace AC.

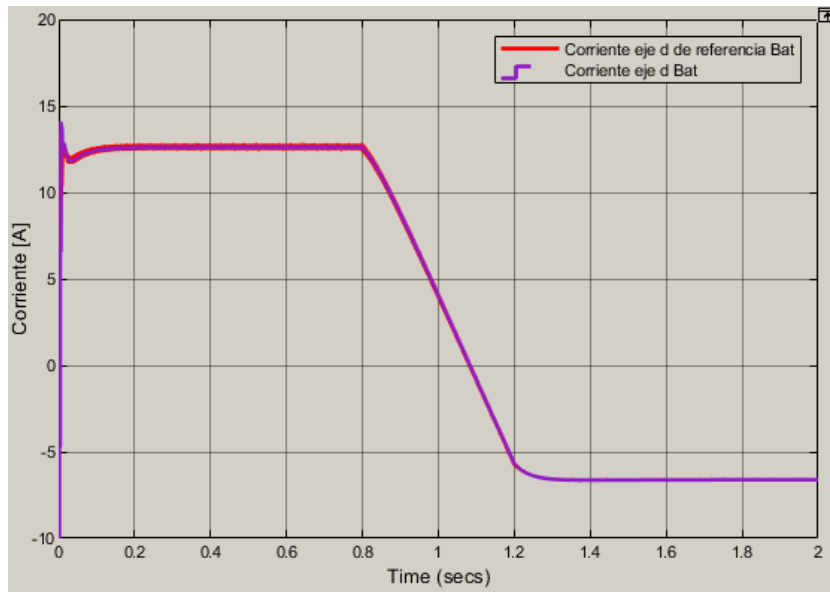


Figura 3.7: Corriente de eje d de la batería, topología A.

La corriente de eje q de la batería y su referencia se muestran en la figura 3.8. La corriente de eje q de la batería es muy cercana a cero, asegurando así mínima presencia de reactivos en la red.

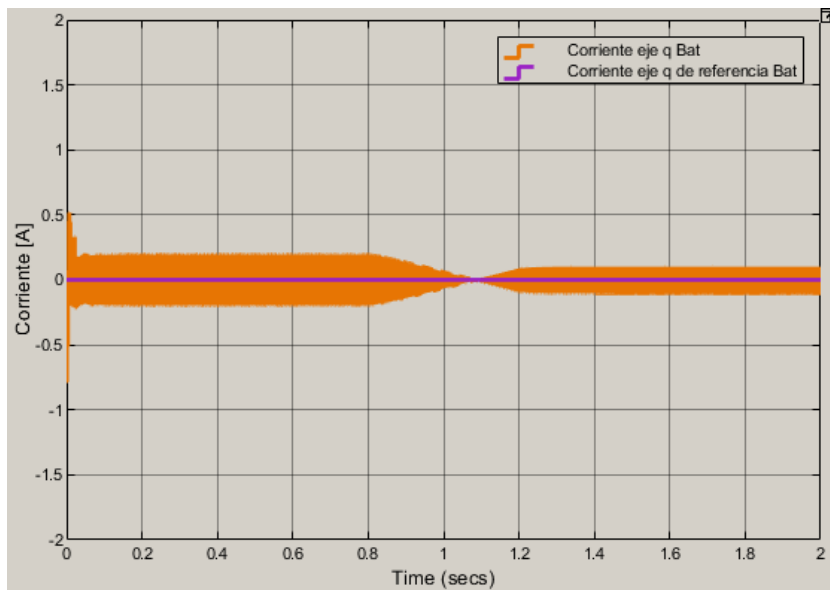


Figura 3.8: Corriente eje q de la batería, topología A.

La corriente de eje d del panel y su referencia se muestran en la figura 3.9. Representa los valores de corriente que el panel solar entrega al enlace AC, donde se dividen entre la red y la batería.

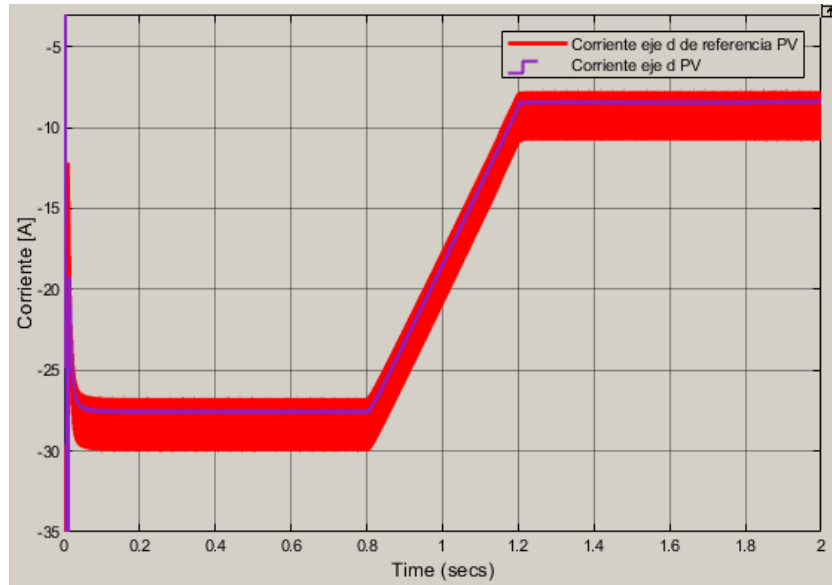


Figura 3.9: Corriente eje d del panel, topología A.

La corriente de eje q del panel y su referencia se muestran en la figura 3.10. El valor de corriente de eje q es muy cercano a cero, asegurando así mínima presencia de reactivos.

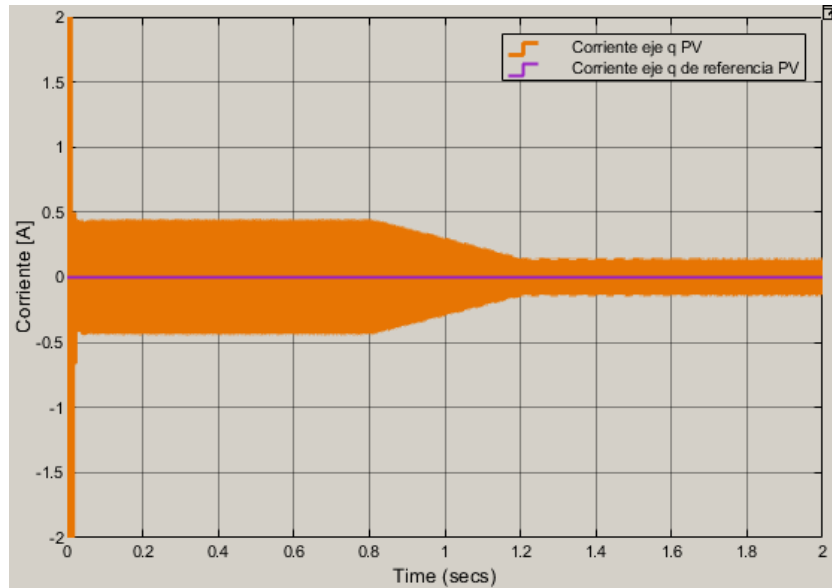


Figura 3.10: Corriente eje q del panel, topología A.

El estado de carga de la batería se muestra en la figura 3.11. La batería se carga con el excedente mientras que la irradianza sea tal que el panel solar logra entregar más de 7 [kW] a la red, y se descarga para complementar al panel solar cuando este no es capaz de suplir dicha potencia.

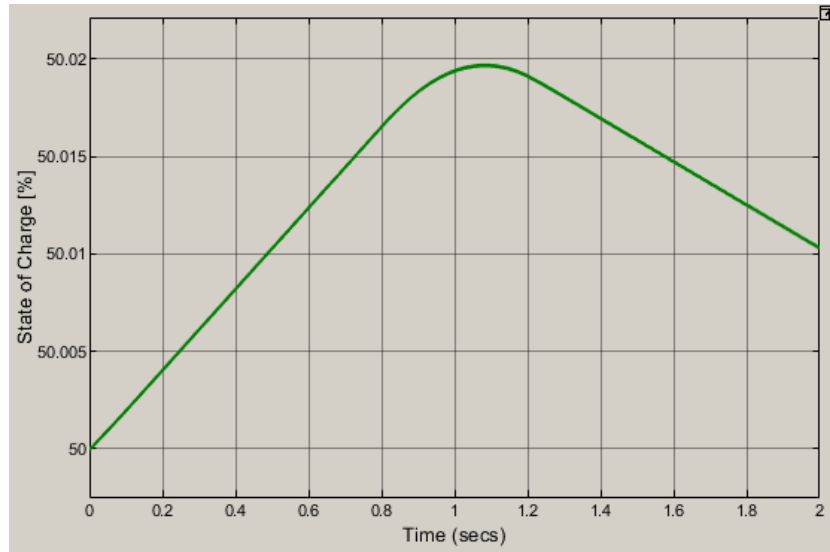


Figura 3.11: State of Charge, topología A.

4. Simulación de sistema PV con topología BESS y acoplamiento DC

4.1 Introducción

Este capítulo presenta la simulación de la topología B: acoplamiento en DC. Esta está compuesta por un Boost Converter y un Bidirectional Buck Boost Converter, como se muestra en la figura 4.1. [15]

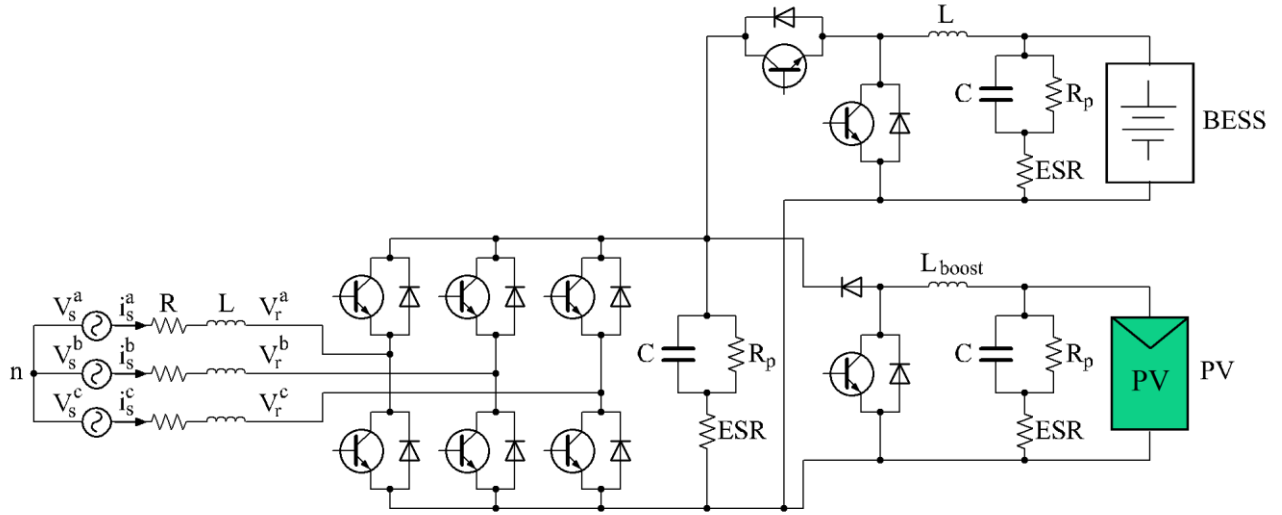


Figura 4.1: Topología B: Acoplamiento en DC.

El convertidor del panel solar es un Boost Converter, que lo conecta al enlace DC y regula el voltaje para asegurar su operación en su punto de máxima transferencia de potencia. El convertidor de la batería es un Bidirectional Buck Boost Converter que la conecta al enlace DC y permite tanto su carga como descarga. Ambos convertidores están acoplados en el enlace DC y posteriormente conectados a la red eléctrica mediante un inversor.

El control de los convertidores se implementa mediante un controlador PI, que permite cero error en estado estacionario ante entrada escalón.

La potencia que se quiere entregar a la red es de 7 [kW].

4.2 Implementación

4.2.1 Controladores de corriente.

La conversión AC-DC es realizada por un inversor al igual que en la topología A. Dado que los parámetros son los mismos, el control del convertidor es el mismo que en 2.2.1. $K_c = 9,9274$ y $a = 397,67$.

4.2.2 Controlador de voltaje – Boost Converter.

El panel solar es conectado al enlace dc mediante un Boost Converter controlado por un PI, el cual se encarga de que el panel solar opere en su punto de máxima transferencia de potencia. Para lograr esto, primero se detalla la función de transferencia del convertidor, mostrado en la figura 4.2.

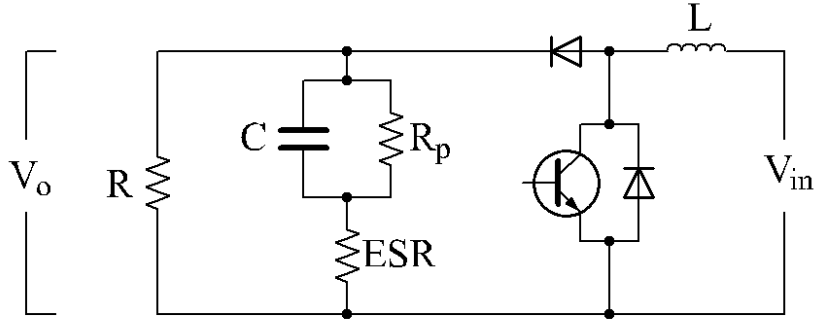


Figura 4.2: Boost Converter.

La función de transferencia de este convertidor está dada por [2], ecuación 4.1.

$$\frac{v_o}{d(s)} = G_{d0} \cdot \frac{\left(1 + \frac{s}{\omega_{z1}}\right) \cdot \left(1 - \frac{s}{\omega_{RHP-zero}}\right)}{1 + \frac{s}{\omega_0 \cdot Q} + \frac{s^2}{\omega_0^2}} \quad (4.1)$$

Las variables de 4.1 se muestran en las ecuaciones 4.2, 4.3, 4.4, 4.5 y 4.6.

$$G_{d0} = \frac{V_o^2}{V_{in}} \quad (4.2)$$

$$\omega_{z1} = \frac{1}{ESR \cdot C} \quad (4.3)$$

$$\omega_{RHP-zero} = \frac{R}{L} \cdot \left(\frac{V_{in}}{V_o}\right)^2 \quad (4.4)$$

$$\omega_0 = \frac{1}{\sqrt{L \cdot C}} \cdot \frac{V_{in}}{V_o} \quad (4.5)$$

$$Q = \frac{\omega_0}{\frac{1}{C \cdot (R + ESR)}} \quad (4.6)$$

El diseño del controlador PI se realiza como se muestra en la figura 4.3.

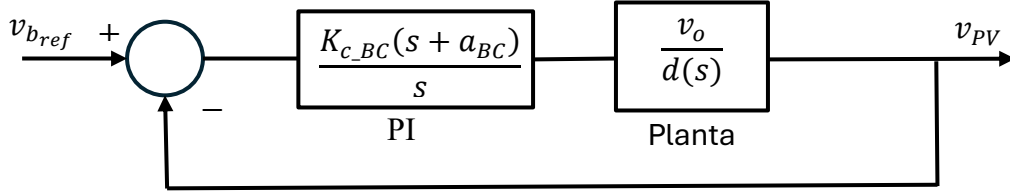


Figura 4.3: Diseño del control de voltaje del panel.

Los valores del PI se obtienen mediante el root locus lazo cerrado basado en la función de transferencia del Convertidor, considerando la función de transferencia del PI, mediante Matlab.

La función de transferencia se calcula a partir del punto de operación, el cual se obtiene simulando el sistema de manera experimental, para 900 [W/m²] de irradianza para el panel. Los parámetros del punto de operación se indican en la tabla 4.1.

Parámetros	Valores
ESR	0,572 [Ω]
C	1 [mF]
L	1 [mH]
R	31,6262 [Ω]

Tabla 4.1: Parámetros Boost Converter.

Con lo que se obtiene la función de transferencia del Boost Converter mostrada en la ecuación 4.7.

$$\frac{v_o}{d(s)} = \frac{-11.76s^2 + 3.51 \cdot 10^5 s + 6.50 \cdot 10^8}{s^2 + 31.06s + 1 \cdot 10^6} \quad (4.7)$$

El root locus resultante de este sistema se grafica en la figura 4.4.

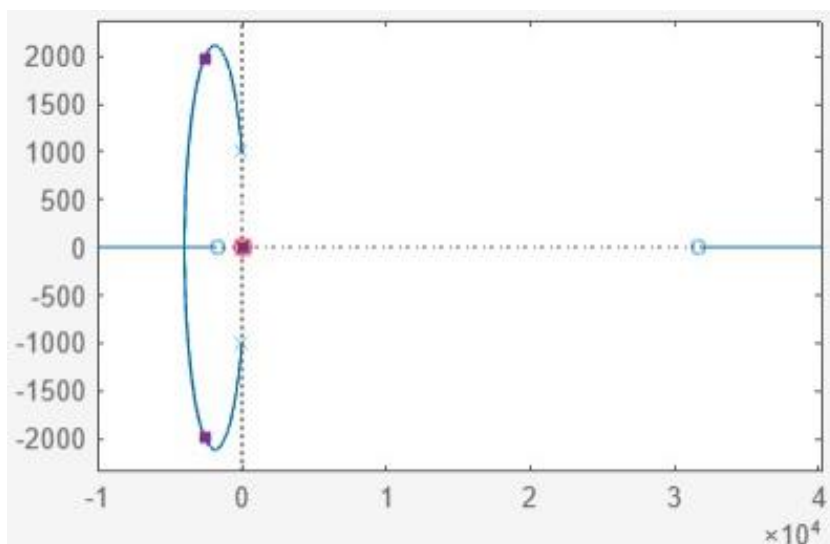


Figura 4.4: Root locus del Boost Converter en lazo cerrado.

A partir del root locus se obtienen los valores del PI que se utilizará para el control del voltaje del panel, $K_{c_BC} = 0,013$ y $a_{BC} = 0,01$.

Ya encontrados los valores del controlador PI, este se implementa como se muestra en la figura 4.5. [16]

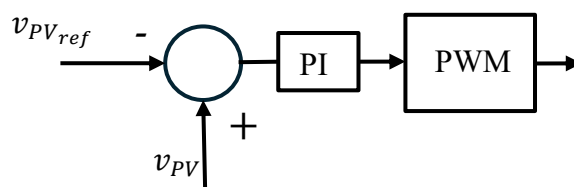


Figura 4.5: Implementación del control de voltaje del panel.

El voltaje de referencia está dado por el MPPT.

4.2.3 Controlador de voltaje – Bidirectional Buck Boost Converter.

La batería se conecta al enlace de mediante un Bidirectional Buck Boost Converter controlado por un PI, el cual se encarga de la carga o descarga de la batería. Para lograr esto, primero se detalla la función de transferencia del convertidor, el cual se muestra en la figura 4.6.

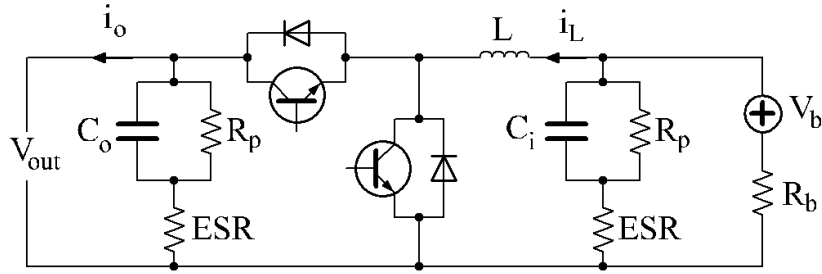


Figura 4.6: Bidirectional Buck Boost Converter.

La función de transferencia de este convertidor se obtiene a través del modelo de pequeña señal, asumiendo que la única perturbación es en el ciclo de trabajo [4]:

$$\frac{v_o}{d(s)} = C \frac{X}{d(s)} = C \left((sI - A)^{-1} \cdot ((A_1 - A_2)X + (B_1 - B_2)U) \right) + (C_1 - C_2)X \quad (4.8)$$

El diseño del controlador PI se realiza como se muestra en la figura 4.7.

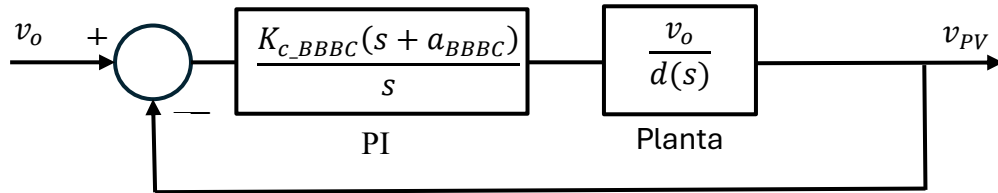


Figura 4.7: Diseño del control de voltaje de la batería.

Los valores del PI se obtienen mediante el root locus lazo cerrado basado en la función de transferencia del Convertidor, considerando la función de transferencia del PI, mediante Matlab.

La función de transferencia se calcula a partir del punto de operación, el cual se obtiene simulando el sistema de manera experimental, para $900 [W/m^2]$ de irradianza para el panel. Los valores de los ESR se asumen cero por simplicidad de diseño de los controladores. Los parámetros del punto de operación se muestran en la tabla 4.2.

Parámetros	Valores	Parámetros	Valores
I_o	$-9,86 [A]$	R_a	$0 [\Omega]$
D	$0 [\%]$	L	$0,001 [H]$
C_o	$0,01 [F]$	C_i	$0,001 [F]$
R_p	$0,002 [\Omega]$	V_b	$651,5 [V]$
R_{C_i}	$0 [\Omega]$	i_L	$-9,86 [A]$
R_{C_o}	$0 [\Omega]$	V_{C_o}	$688 [V]$
R_L	$0 [\Omega]$	V_{C_i}	$651,5 [V]$

Tabla 4.2: Parámetros Bidirectional Buck Boost Converter.

La función de transferencia se muestra en la ecuación 4.9.

$$\frac{v_o}{d(s)} = \frac{986.03s^2 + 5.58 \cdot 10^8 s + 3.26 \cdot 10^{13}}{s^3 + 5.00 \cdot 10^5 s^2 + 1.10 \cdot 10^6 s + 5.00 \cdot 10^{10}} \quad (4.9)$$

El root locus resultante de este sistema se grafica en la figura 4.8.

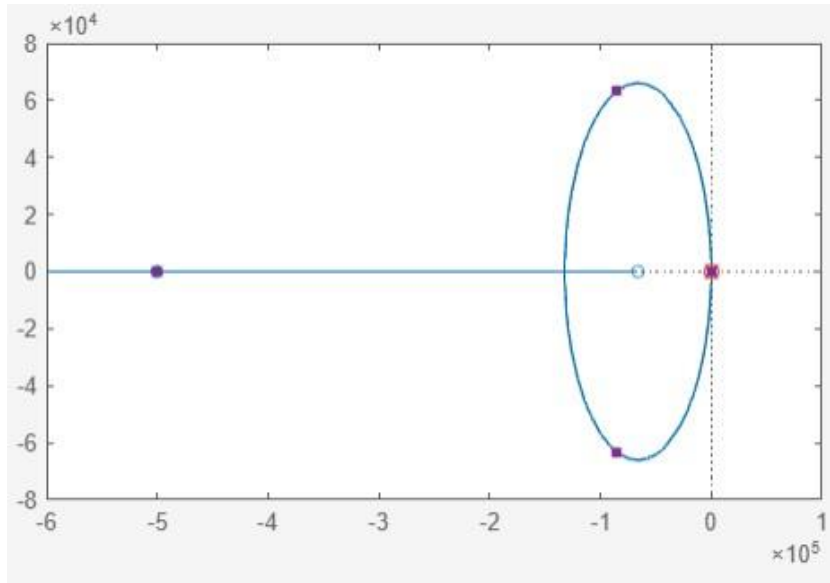


Figura 4.8: Root locus del Bidirectional Buck Boost Converter.

A partir del root locus se obtienen los valores del PI que se utilizará para el control del voltaje de la batería, $K_{c_BBBC} = 170$ y $a_{BBBC} = 10$.

Ya encontrados los valores del controlador PI, este se implementa como se muestra en la figura 4.9.

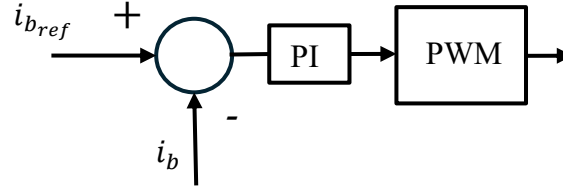


Figura 4.9: Implementación del control de corriente de la batería.

Dado que se quieren entregar 7 [kW] a la red, la corriente de referencia está dada por la ecuación 4.10.

$$i_{b_ref} = \frac{P_{PV} - 7000}{v_b} \quad (4.10)$$

5. Resultados de simulación de sistema PV con BESS con acoplamiento DC

Los resultados de la simulación se muestran a continuación:

El balance de potencias de la topología B se muestra en la figura 5.1. La potencia que el panel solar entrega se divide entre 7 [kW] a la red y el sobrante para cargar la batería. Al disminuir la irradianza y por consiguiente la potencia que el panel solar es capaz de entregar, la batería supe la potencia faltante para entregar a la red 7000 [W] constantes.

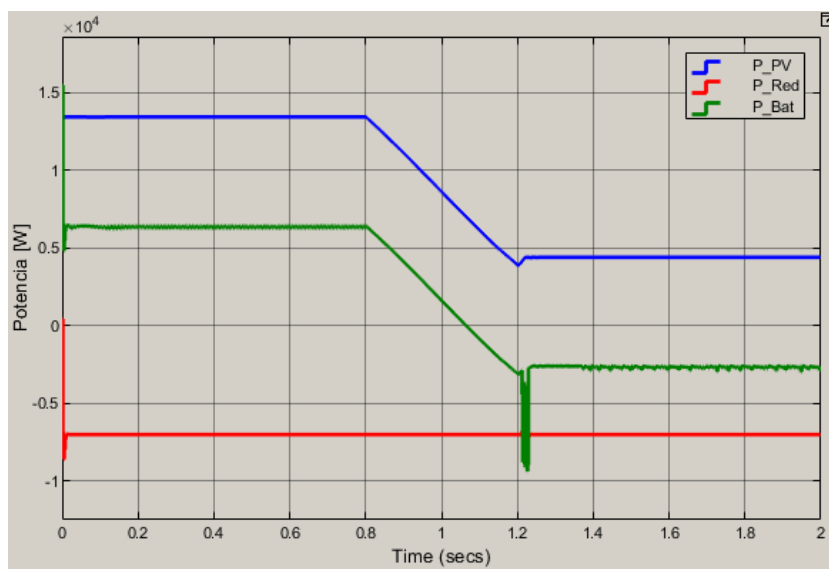


Figura 5.1: Potencias, topología B.

El voltaje y corriente de fase A se muestra en la figura 5.2. Es posible identificar que el factor de potencia es muy cercano al unitario.

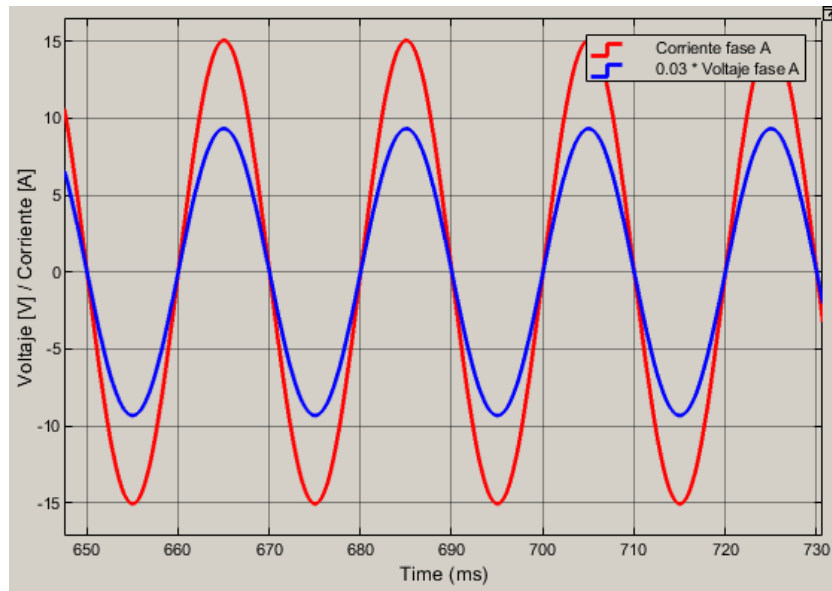


Figura 5.2: Voltaje y corriente fase A, topología B.

La corriente de la batería y su referencia se muestra en la figura 5.3. La corriente positiva se traduce en la carga de la batería y viceversa. El ruido presente a los 1,2 [s] se debe a la saturación del controlador de corriente de la batería.

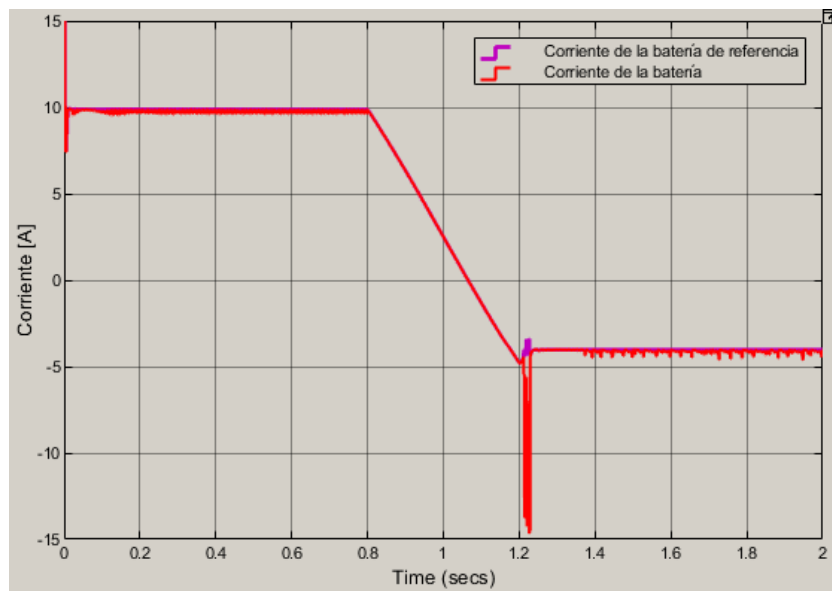


Figura 5.3: Corriente de la batería, topología B.

El voltaje de la batería se muestra en la figura 5.3. La pequeña variación de voltaje entre el estado inicial y final representan la diferencia de voltaje necesaria para que la batería cargue o descargue.

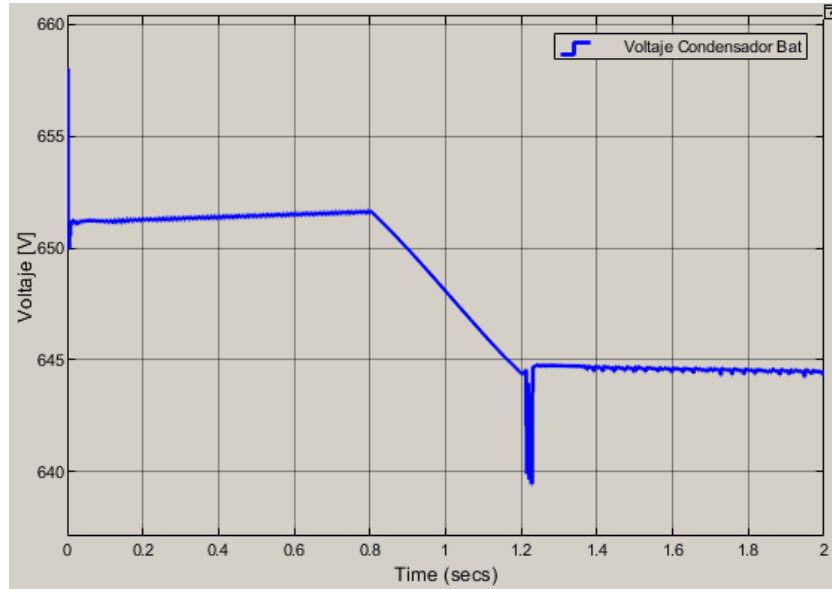


Figura 5.4: Voltaje de la batería, topología B.

La corriente del panel solar se muestra en la figura 5.5. El panel solar es capaz de entregar más corriente al verse expuesto a mayor irradianza, mientras que a medida que esta disminuye, consecuentemente la corriente también lo hace.

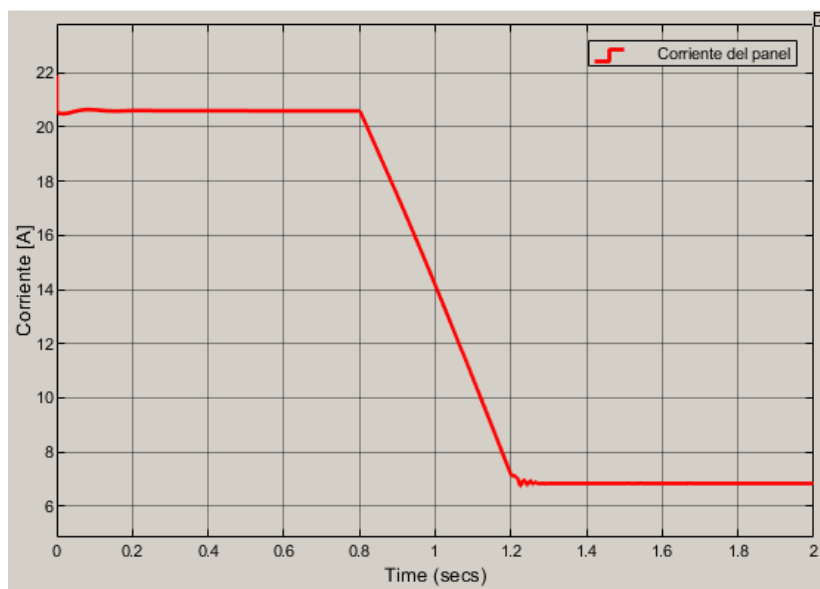


Figura 5.5: Corriente del panel, topología B.

El voltaje del panel solar se muestra en la figura 5.6. Siguiendo el MPPT, el voltaje del panel cambia levemente entre el estado estacionario inicial y final, pasando por un transiente que es corregido rápidamente por el controlador.

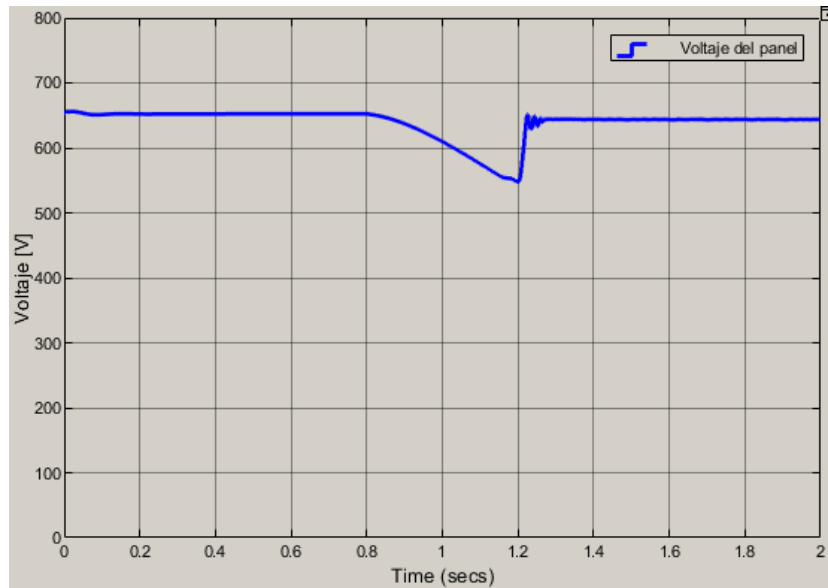


Figura 5.6: Voltaje del panel, topología B.

La corriente de eje d de la red y su referencia se muestra en la figura 5.7. La corriente de eje d de la red presenta una pequeña perturbación debido a la saturación del controlador de corriente de la batería. De otro modo, se tiene una señal bastante limpia y por tanto mínima presencia de armónicos.

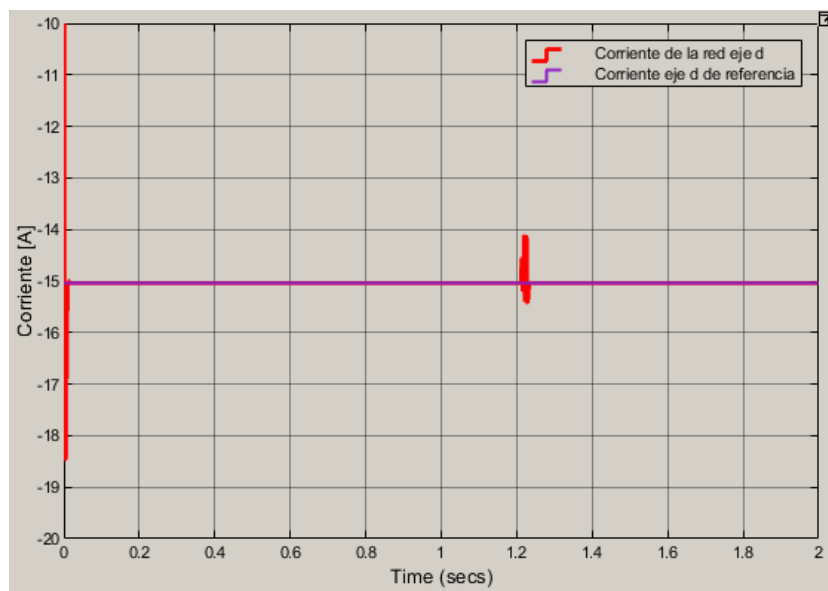


Figura 5.7: Corriente de la red, eje d, topología B.

La corriente de eje q de la red y su referencia se muestra en la figura 5.8. Se aprecia que el valor es muy cercano a cero, evitando así la presencia de reactivos en la red.

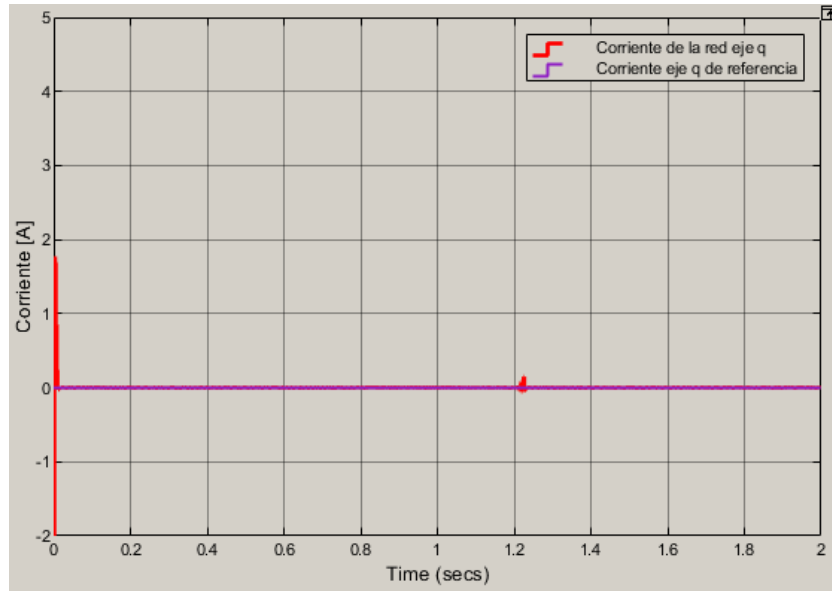


Figura 5.8: Corriente de la red, eje q, topología B.

El estado de carga de la batería se muestra en la figura 5.6. La batería se carga con el excedente mientras que la irradianza sea tal que el panel solar logra entregar más de 7000 [W] a la red, y se descarga para complementar al panel solar cuando este no es capaz de suplir dicha potencia.

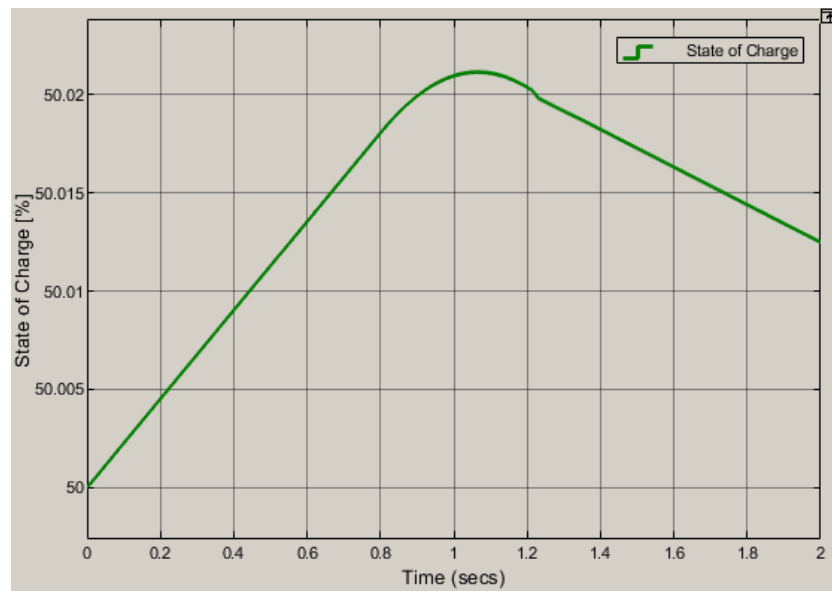


Figura 5.9: State of Charge, topología B.

6. Simulación de sistema PV con topología BESS usando partial power converter con acoplamiento DC

6.1 Introducción

Este capítulo presenta la simulación de la topología C: acoplamiento en DC - Partial Power Converter. Esta topología está compuesta por un Boost Converter y un Bidirectional Partial Power Converter, como se muestra en la figura 6.1. [5]

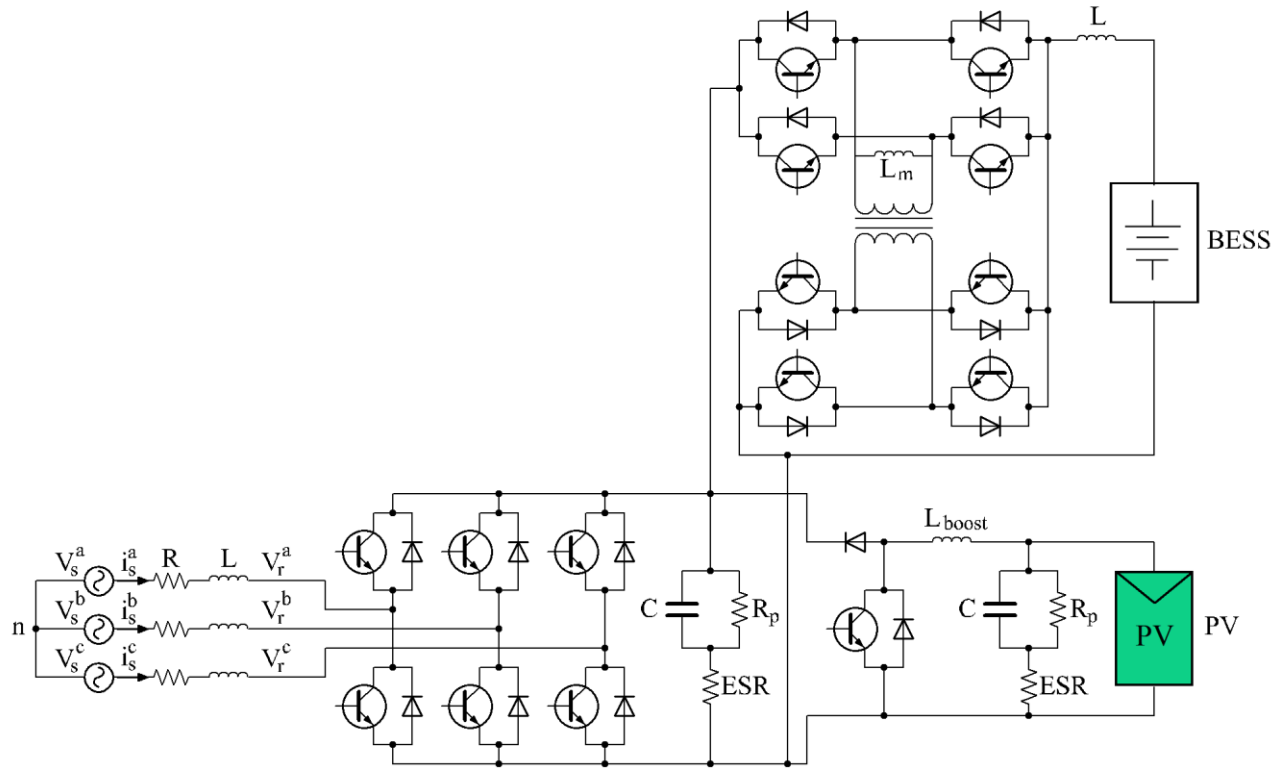


Figura 6.1: Topología C: Acoplamiento en DC - Partial Power Converter.

El convertidor del panel solar es un Boost Converter, que lo conecta al enlace DC y regula el voltaje para asegurar su operación en su punto de máxima transferencia de potencia. El convertidor de la batería es un Bidirectional Partial Power Converter que la conecta al enlace DC y permite tanto su carga como descarga. Ambos convertidores están acoplados en el enlace DC y posteriormente conectados a la red eléctrica mediante un inversor.

El control de los convertidores se implementa mediante un controlador PI.

La potencia que se quiere entregar a la red es de 7000 [W].

6.2 Implementación

6.2.1 Controladores de corriente.

La conversión AC-DC es realizada por un inversor al igual que en la topología A. Dado que los parámetros son los mismos, el control del convertidor es el mismo que en 2.2.1. $K_c = 9,9274$ y $a = 397,67$.

6.2.2 Controlador de voltaje – Boost Converter.

El panel solar es conectado al enlace DC mediante un Boost Converter controlado por un PI, igual que en la topología B. Dado que los parámetros son los mismos, el control del convertidor es el mismo que en 4.2.2. $K_{c_BC} = 0,013$ y $a_{BC} = 0,01$.

6.2.3 Controlador de corriente de la batería – Bidirectional Partial Power Converter.

La batería se conecta al enlace dc mediante un Bidirectional Partial Power Converter controlado por un PI, el cual se encarga de la carga o descarga de la batería, mostrado en la figura 6.2.

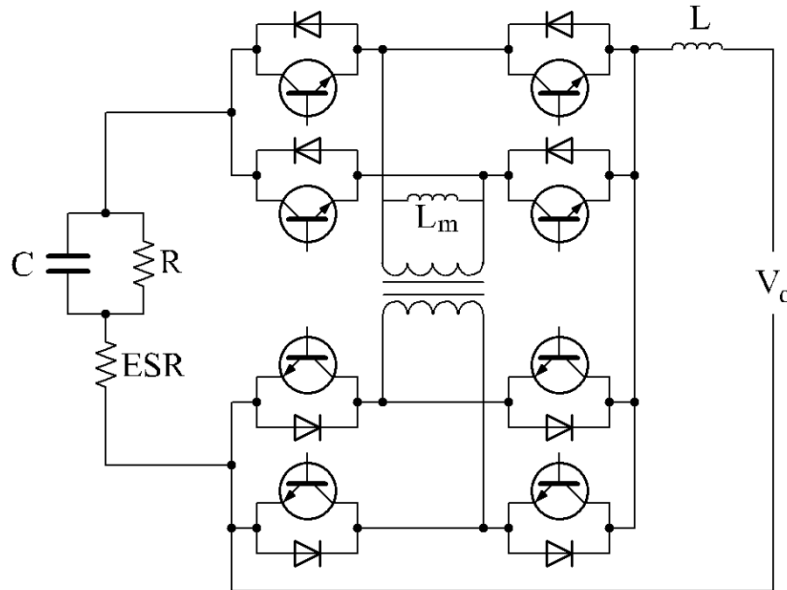


Figura 6.2: Bidirectional Partial Power Converter.

El diseño del controlador PI se realiza como se muestra en la figura 6.3.

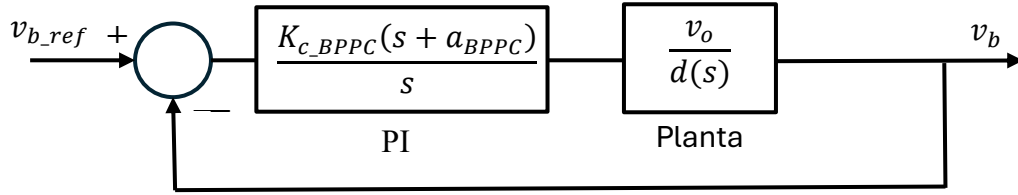


Figura 6.3: Diseño del control de voltaje de la batería.

La función de transferencia de este convertidor se estima mediante Matlab, tomando como entrada el pulso a los IGBT, y como salida el voltaje del lado de la batería, para $900 [W/m^2]$ de irradianza para el panel. Los parámetros se muestran en la tabla 6.1.

Parámetros	Valores
V_o	0,572 [Ω]
C	0,001 [F]
L	0,001 [H]
L_m	0,001 [H]
n	1,54

Tabla 6.1: Parámetros Bidirectional Partial Power Converter.

La función de transferencia se estima a partir de estos valores mediante Matlab y está dada por la ecuación 6.1.

$$\frac{v_o}{d(s)} = \frac{5373s^2 + 1.081 \cdot 10^{10}s + 3.263 \cdot 10^{10}}{s^3 + 3.739 \cdot 10^4 s^2 + 4.988 \cdot 10^6 s - 3.473 \cdot 10^4} \quad (6.1)$$

El root locus resultante de este sistema se grafica en la figura 6.4.

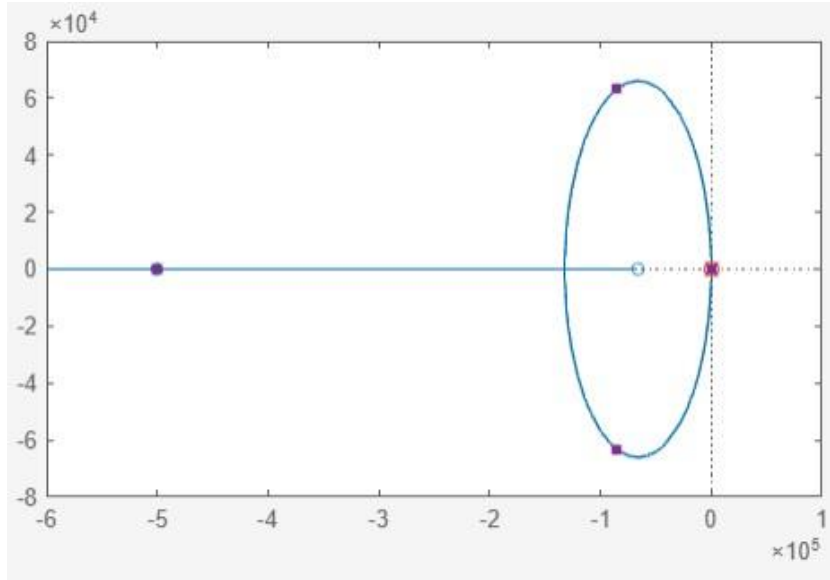


Figura 6.4: Root locus del Bidirectional Partial Power Converter.

A partir de esto se obtiene el PI que se utilizará para el control del voltaje de la batería, $K_{c_BBBC} = 959,4$ y $a_{BBBC} = 1$.

Ya encontrados los valores del controlador PI, este se implementa como se muestra en la figura 6.5.

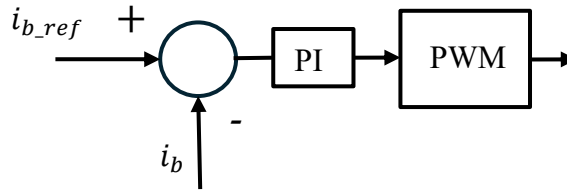


Figura 6.5: Implementación del control de corriente de la batería.

Dado que se quieren entregar 7 [kW] a la red, la corriente de referencia se determina por como muestra la ecuación 6.2.

$$i_{b_ref} = \frac{P_{PV} - 7000}{v_b} \quad (6.2)$$

7. Resultados de Simulación de sistema PV con topología BESS usando Partial Power Converter con acoplamiento DC

Los resultados de la simulación se muestran a continuación:

El balance de potencias de la topología C se muestra en la figura 7.1. La potencia que el panel solar entrega se divide entre 7 [kW] a la red y el sobrante para cargar la batería. Al disminuir la irradianza y por consiguiente la potencia que el panel solar es capaz de entregar, la batería supe la potencia faltante para entregar a la red 7 [kW] constantes.

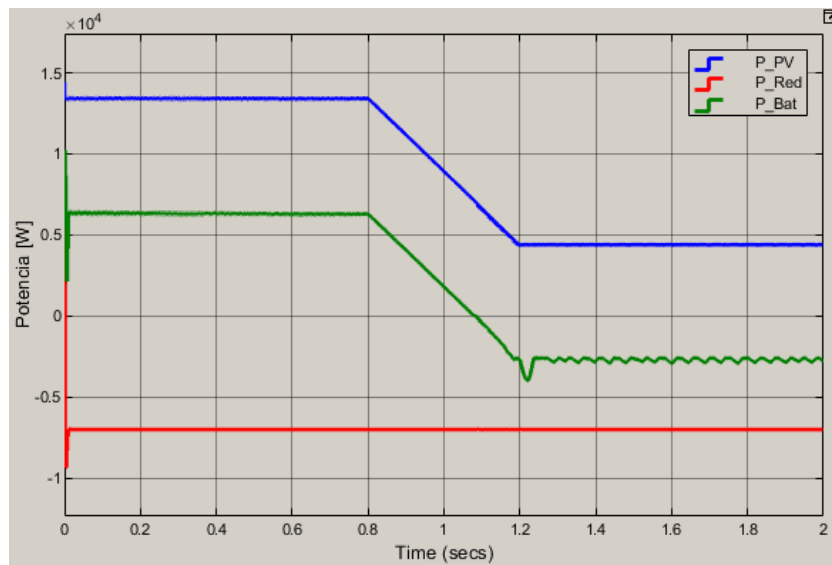


Figura 7.1: Potencias, topología C.

El voltaje y corriente de fase A se muestran en la figura 7.2. Es posible identificar que el factor de potencia es muy cercano al unitario.

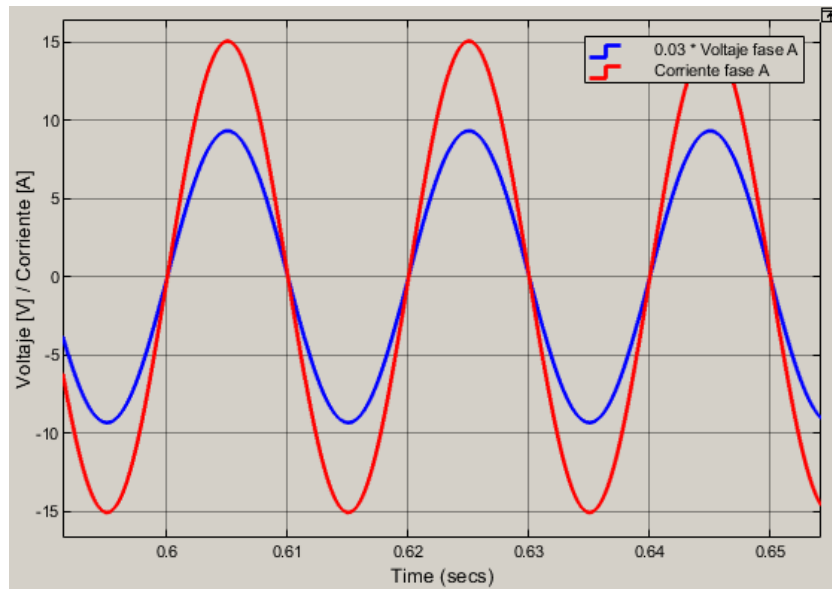


Figura 7.2: Voltaje y corriente fase A, topología C.

La corriente de la batería y su referencia se muestran en la figura 7.3. La corriente de la batería presenta ruido a partir de 1.2 [s]. Esto se traduce en una señal más sucia como se observa en el balance de potencias.

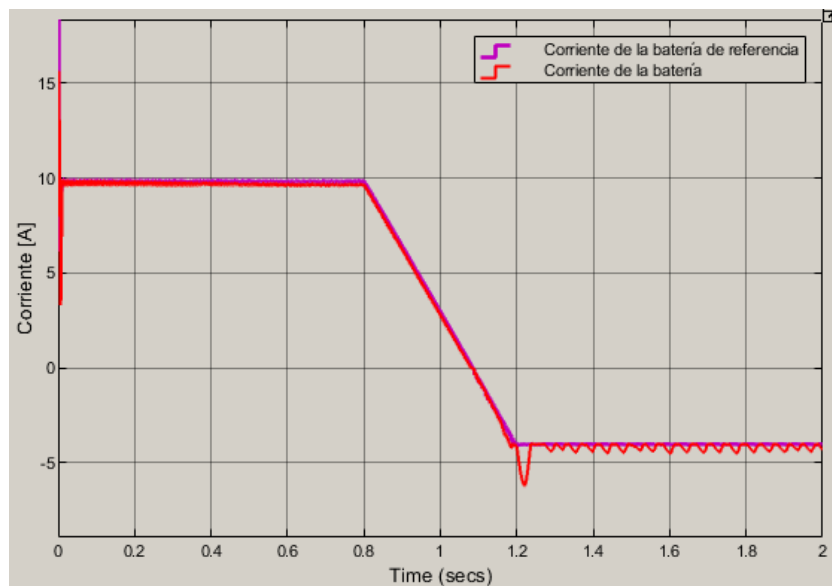


Figura 7.3: Corriente de la batería, topología C.

El voltaje de la batería se muestra en la figura 7.4. El voltaje de la batería presenta ruido de baja magnitud al igual que su corriente, contribuyendo ruido al cálculo de la potencia de la batería.

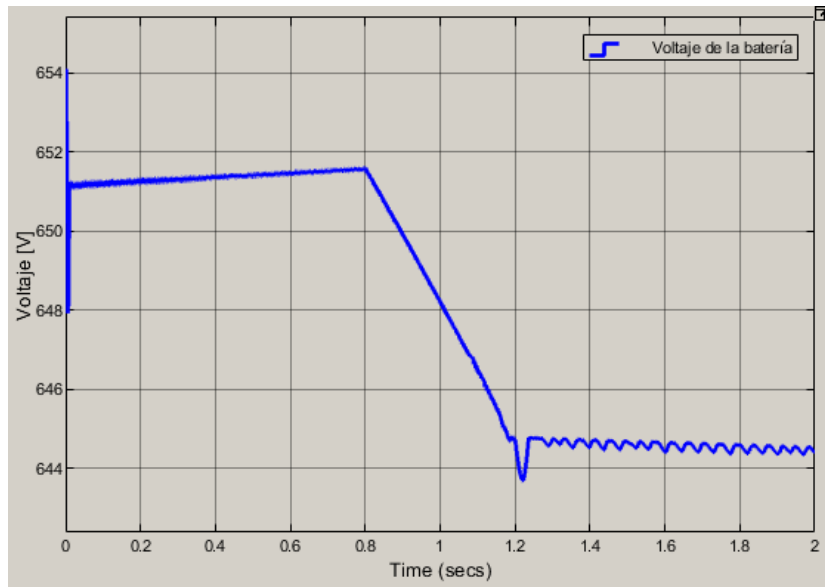


Figura 7.4: Voltaje de la batería, topología C.

La corriente del panel solar se muestra en la figura 7.5. El panel solar es capaz de entregar más corriente al verse expuesto a mayor irradianza, mientras que a medida que esta disminuye, consecuentemente la corriente también lo hace.

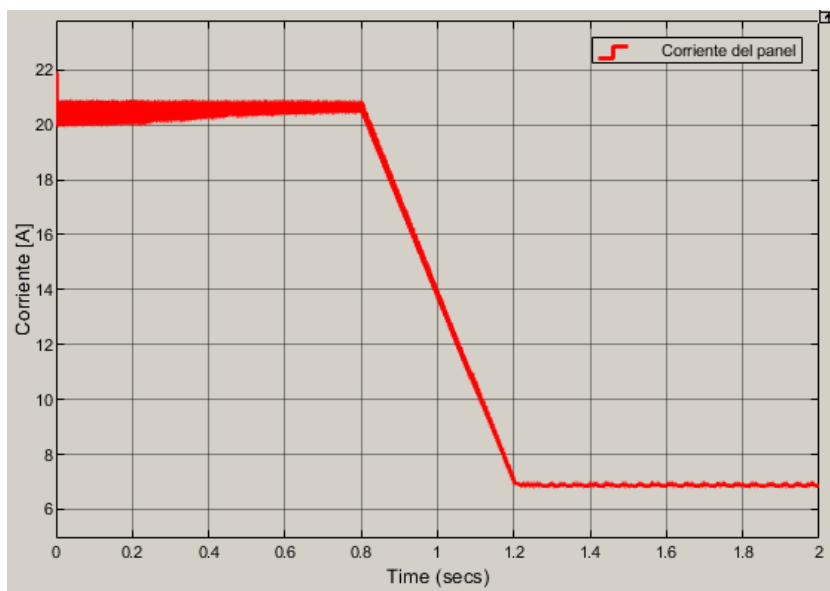


Figura 7.5: Corriente del panel, topología C.

El voltaje del panel solar y su referencia se muestran en la figura 7.6. Debido a la configuración de conexiones del control del panel solar de 4.2.2, el voltaje de referencia presenta más ruido que la señal medida, pero el balance de potencias evidencia su eficacia.

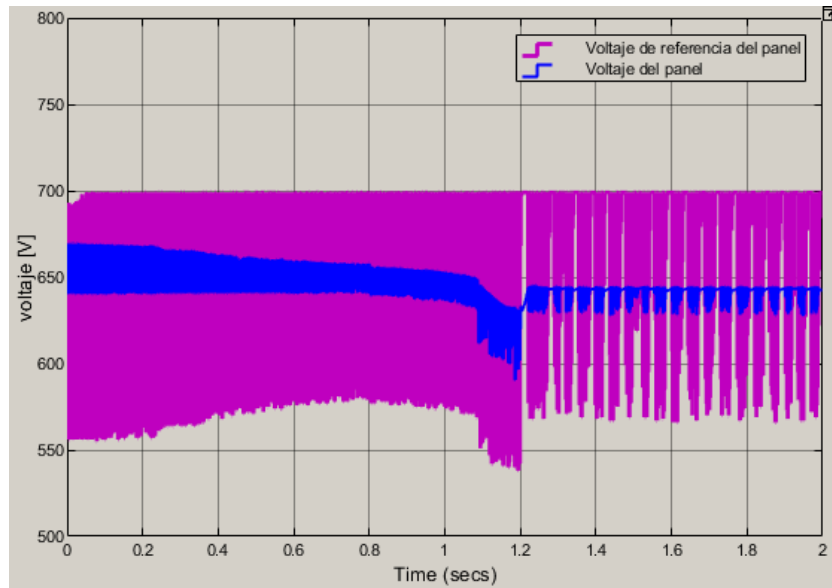


Figura 7.6: Voltaje del panel, topología C.

La corriente de eje d de la red y su referencia se muestran en la figura 7.7. A pesar del ruido presente en las señales de la batería, en la red se tiene una señal limpia de armónicos, gracias a los eficaces controladores de corriente del inversor.

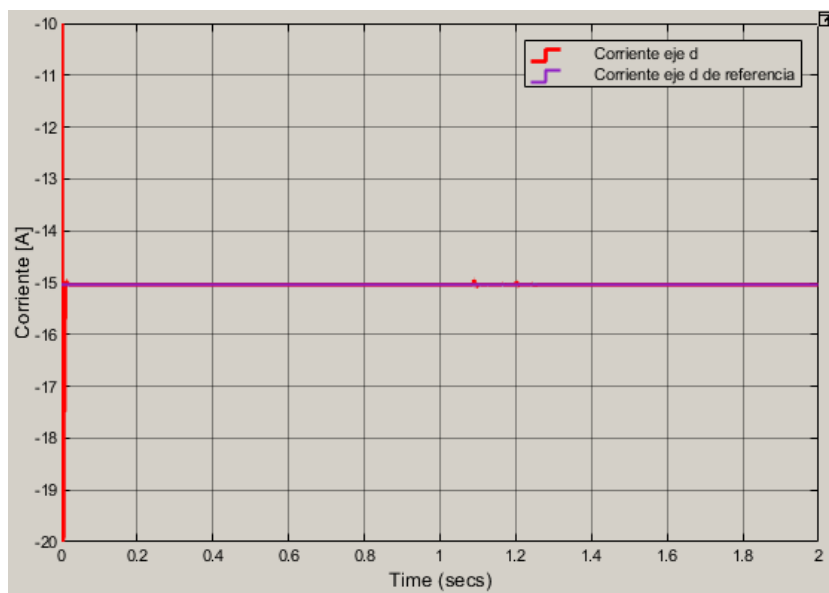


Figura 7.7: Corriente de la red, eje d, topología C.

La corriente de eje q de la red y su referencia se muestran en la figura 7.8. Como el valor de la corriente es muy cercano a cero, se tiene mínima presencia de reactivos en la red.

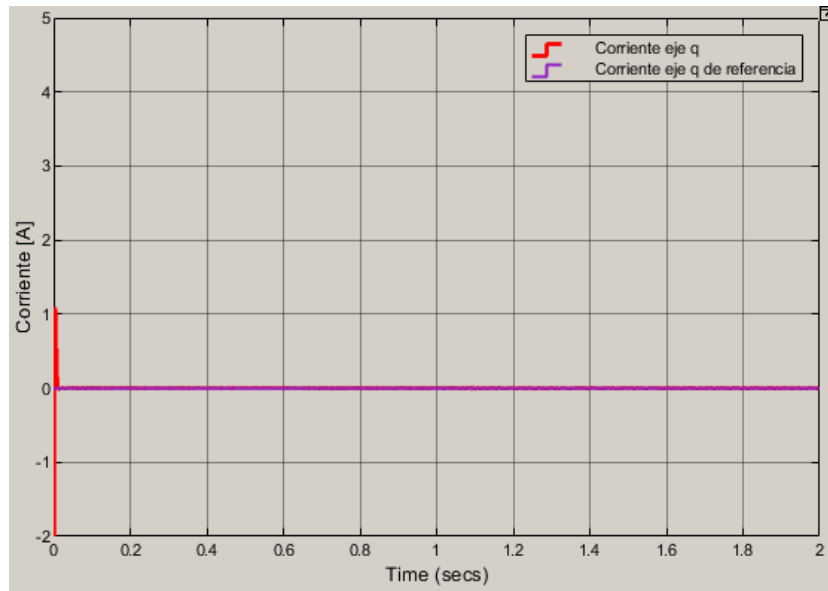


Figura 7.8: Corriente de la red, eje q, topología C.

El estado de carga de la batería se muestra en la figura 7.9. La batería se carga con el excedente mientras que la irradianza sea tal que el panel solar logra entregar más de 7000 [W] a la red, y se descarga para complementar al panel solar cuando este no es capaz de suplir dicha potencia.

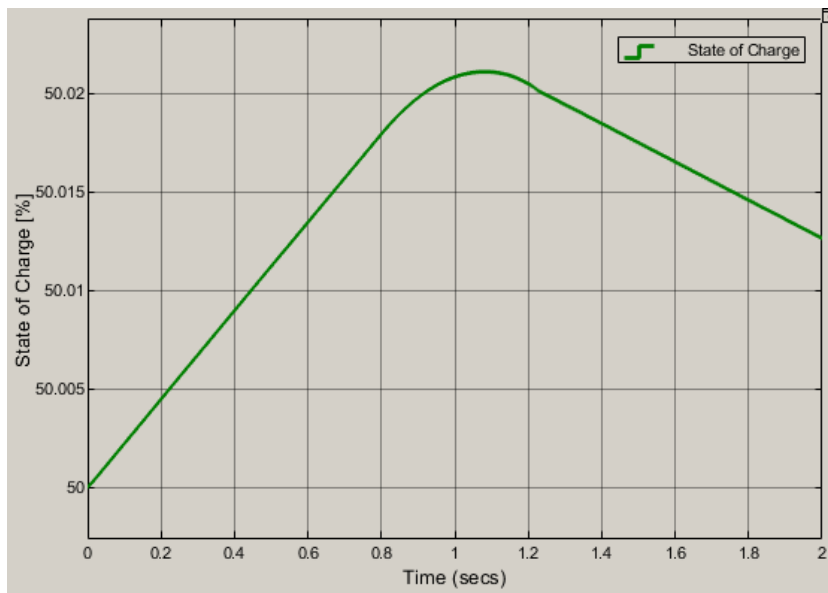


Figura 7.9: State of Charge, topología C.

8. Comentarios

8.1 Topología A: Acoplamiento en AC

La simulación de la Topología A – Acoplamiento en AC se ha llevado a cabo con éxito, como se evidencia en el balance de potencias mostrado en la Figura 3.1. Cuando la potencia suministrada por el panel es superior a la entregada a la red, el excedente se almacena en la batería. Por el contrario, cuando la potencia del panel es menor que la requerida por la red, la batería compensa el déficit entregando la energía necesaria. Este comportamiento queda reflejado en el estado de carga de la batería, Figura 3.11.

El control de los inversores demuestra su eficacia al evitar la generación de armónicos y potencia reactiva, lo cual se observa en las formas de onda de la corriente y el voltaje de la fase A (Figura 3.2). Ambas se encuentran en fase, logrando un factor de potencia muy cercano al unitario y mínima presencia de ruido en la forma de onda. Además, la corriente del eje q se mantiene cercana a cero tanto en el inversor del panel como en el de la batería, lo que confirma el correcto funcionamiento del sistema de control.

8.2 Topología B: Acoplamiento en DC

La simulación de la Topología B – Acoplamiento en DC también ha sido exitosa, como se evidencia en el balance de potencias presentado en la Figura 5.1. Aunque durante el transiente se observa cierta distorsión en la forma de onda de la potencia de la batería, en estado estacionario el control garantiza una curva de potencia limpia y sin ruido. La operación de la batería es adecuada, cargándose o descargándose según lo que dicta el panel, lo cual se refleja en su estado de carga en la Figura 5.9. Esto mediante el uso del Bidirectional Buck Boost Converter.

El inversor opera de manera eficiente, como se puede observar en la Figura 5.2, donde la corriente y el voltaje se encuentran en fase, alcanzando un factor de potencia muy cercano al unitario y mínima presencia de armónicos. Esto se traduce en una alta eficiencia del sistema.

Cabe destacar que en las señales de voltaje y corriente de la batería se observa la presencia de ruido al final del transiente. Esto se debe a la saturación del convertidor, el cual se encuentra en un

punto de operación distinto para el cual se diseñó. Sin embargo, el controlador de corriente de la batería logra neutralizarlo rápidamente, asegurando una operación estable en estado estacionario.

8.3 Topología C: Acoplamiento en DC – Partial Power Converter

La simulación de la Topología C – Acoplamiento en DC – *Partial Power Converter* ha sido exitosa, como lo muestra el balance de potencias en la Figura 7.1. En comparación con la Topología B, el ruido presente al final del transiente es significativamente menor. Sin embargo, en estado estacionario, se detecta una pequeña perturbación que, aunque no representa un problema relevante, está presente en la operación del sistema. Esto se debe a que el controlador se encuentra en un punto de operación distinto para el cual fue diseñado.

La gestión de la carga y descarga de la batería se lleva a cabo correctamente mediante el Bidirectional Partial Power Converter, como se evidencia en la Figura 7.9.

Las formas de onda de corriente y voltaje en la fase A, representadas en la Figura 7.2, demuestran que ambos están en fase, asegurando un factor de potencia muy cercano al unitario. Esto indica la ausencia de potencia reactiva inyectada a la red y la minimización de armónicos en la corriente, confirmando la eficiencia del sistema.

9. Conclusiones

9.1 Sumario

Se diseñó exitosamente el control para las tres topologías para BESS en sistemas fotovoltaicos. En cada una de ellas se entregan 7 [kW] a la red desde el panel solar, enviando la potencia excedente a baterías, o extrayendo de ellas la potencia faltante, evidenciado por las figuras extraídas de las simulaciones. Se prueban dos condiciones de operación diferentes, con una irradianza de 900 [W/m²] entregada al panel, que cambia en forma de rampa hasta llegar a 300 [W/m²]. Se proporciona un análisis del comportamiento de estas topologías.

9.2 Conclusiones

En este trabajo se han evaluado y comparado tres topologías para la integración de sistemas de almacenamiento de energía en sistemas fotovoltaicos, mediante simulaciones en Simulink. Cada una de estas topologías ha sido analizada en términos de desempeño bajo diferentes condiciones de irradianza, asegurando la entrega de 7 [kW] a la red eléctrica y la gestión eficiente de la energía almacenada en baterías.

Los resultados obtenidos muestran que todas las configuraciones permiten un control adecuado del flujo de potencia entre el sistema fotovoltaico, la batería y la red. Se logró implementar con éxito estrategias de control en lazo cerrado, donde los controladores PI diseñados garantizaron estabilidad y respuesta rápida en la regulación de voltaje y corriente. La topología con acoplamiento en AC demostró un leve desajuste durante el transiente, pero una gran respuesta en estado estacionario tanto pre como post-transiente, mientras que ambas topologías con acoplamiento en DC demostraron buena respuesta antes y durante el transiente, pero cierta saturación al volver a entrar a estado estacionario.

Si bien los controladores diseñados respondieron de manera adecuada a las variaciones de irradianza, se observaron oscilaciones en el control de corriente de la batería, posiblemente debido a la saturación de los controladores y las limitaciones de la simulación. Sin embargo, el sistema logró cumplir con los objetivos de carga y descarga de la batería dentro de los parámetros esperados.

En general, este trabajo confirma que la integración de sistemas de almacenamiento en instalaciones fotovoltaicas es una estrategia viable para mejorar la gestión de la energía generada por los paneles solares, reduciendo desperdicios y permitiendo un uso más eficiente de la generación solar.

9.3 Trabajo futuro

El trabajo futuro pendiente para esta Memoria de Título comprende tópicos importantes a explorar:

- Cálculo y comparación de la eficiencia entre los convertidores.
- Cálculo del State of Charge de la batería y su implementación.
- Análisis del ciclo de vida de la batería.
- Análisis de costo para mejorar las topologías propuestas.

10. Referencias

- [1] Mathworks. “Universal bridge”.
<https://www.mathworks.com/help/sps/powersys/ref/universalbridge.html>
- [2] Texas Instrument, “Voltage mode boost converter small signal control loop analysis using the tps61030”, Application Report SLVA274A–May 2007–Revised January 2009.
<https://studylib.net/doc/18315998/voltage-mode-boost-converter-small-signal>
- [3] Mathworks. “IGBT/Diode”.
<https://www.mathworks.com/help/sps/powersys/ref/igbtodiode.html>
- [4] Texas Instruments, “Modeling bi-directional buck/boost converter for digital control using C2000 microcontrollers”, Application Report SPRABX5–January 2015.
<https://www.ti.com/lit/an/sprabx5/sprabx5.pdf?ts=1745862933308>
- [5] N. Muller, “Bidirectional partial power converter interface for energy storage systems to provide peak shaving in grid-tied pv plants”, Univ. Tec. Federico St. Maria, Valparaíso, Chile, 2018.
<https://ieeexplore.ieee.org/document/8352296>
- [6] Industrial Solutions Company Panasonic Co Ltd, “Optimal solution for circuit design = Technical information = LC Filters”, 2020.
https://industrial.panasonic.com/ww/ds/library/lc_filter_TechnicalInfo
- [7] YAGEO Corporation, “Press-Fit Aluminum Electrolytic Capacitors”, 2023.
<https://www.mouser.cl/new/kemet-electronics/kemet-press-fit-capacitors/>
- [8] Mathworks. “Battery”.
<https://www.mathworks.com/help/sps/powersys/ref/battery.html>
- [9] Mathworks. “PV Array”.
<https://www.mathworks.com/help/sps/powersys/ref/pvarray.html>
- [10] Mathworks. “abc to dq0, dq0 to abc”.
<https://www.mathworks.com/help/sps/powersys/ref/abctodq0dq0toabc.html>
- [11] Mathworks. “PWM Generator (2-Level)”.
<https://www.mathworks.com/help/sps/powersys/ref/pwmgenerator2level.html>

- [12] Mathworks. “PWM Generator (DC-DC”. [En línea].
<https://www.mathworks.com/help/sps/powersys/ref/pwmgeneratordcdc.html>
- [13] Peter Wolfs, “Three-Port converters for energy conversion of PV-BES integrated systems”, Central Queensland Univ., 2023.
<https://ieeexplore.ieee.org/document/10015015>
- [14] R. Peña, “Apuntes rectificador de frente activo”, Univ. Concepción, 2023.
- [15] Xing-Gang Yan, “A novel adaptive command-filtered backstepping sliding mode control for PV grid-connected system with energy storage”, Univ. Kent, 2019.
https://www.researchgate.net/publication/330065972_A_novel_adaptive_command-filtered_backstepping_sliding_mode_control_for_PV_grid-connected_system_with_energy_storage
- [16] “Demonstration of Maximum Power Point Tracking (MPPT) Using boost Converter in MATLAB - Method 1,”
<https://www.youtube.com/watch?v=o9BOrAHH5E4>
- [17] Myada Shadoul, “DC-DC Boost Converter controller deisgn for PV aplications”, Sultan Qaboos Univ., 2017.
<https://ieeexplore.ieee.org/document/8448164/>
- [18] Jeiner Aricapa, “Estudio y análisis de un convertidor bidireccional de potencia DC-DC con topologia Buck-Boost y de su sistema de control de tension por un metodo de control adaptativo”, Univ. Tecnol. Pereira, 2023.
<https://repositorio.utp.edu.co/entities/publication/b03f5caf-cf36-4981-b673-da8b52e49b91>
- [19] Chao Liu, “An Efficient Voltage Step-up/down Partial Power Converter (SUD-PPC) using Wide Bandgap devices”, Tech. Univ. Denmark, 2021.
<https://ieeexplore.ieee.org/document/9656053>
- [20] Hamadi Safi Allah, “Comparison of Fuzzy Logic and P&O MPPT Techniques for solar Photovoltaic system”, Univ. Djelfa, 2019.
https://www.researchgate.net/publication/333703537_Comparison_of_Fuzzy_Logic_and_PO_MPPT_Techniques_for_solar_Photovoltaic_system
- [21] “Arreglo de módulos de paneles solares”, Autoría personal, 2025.