 Institución Universitaria	INFORME FINAL DE TRABAJO DE GRADO	Código	FDE 089
		Versión	03
		Fecha	2015-01-27

CONVERTIDOR DDB (DOUBLE DUAL BOOST) EN LAZO ABIERTO PARA APLICACIONES PV

Emiliano Paniagua Cano

Programa Académico

Tecnología en Automatización Electrónica

Elkin Edilberto Henao Bravo

Cristian Escudero Quintero

INSTITUTO TECNOLÓGICO METROPOLITANO

26-07-2024

	INFORME FINAL DE TRABAJO DE GRADO	Código	FDE 089
		Versión	03
		Fecha	2015-01-22

RESUMEN

Este trabajo pretende construir e implementar un convertidor DDB (Double Dual Boost) en lazo abierto para aplicaciones PV. Se realiza una investigación sobre el convertidor DDB, su topología, conexión y comportamiento y se definen parámetros para su construcción. Se realiza el diseño, simulación y construcción de las diferentes secciones del convertidor DDB. Se implementan los circuitos de acondicionamiento de señal necesarios para medir variables y recibir comandos de control. Por medio del software PSIM se programa el microcontrolador TMS320F28335 con el fin de medir variables y enviar señales PWM para manipular el convertidor DDB.

En el trabajo desarrollado se evidenció el funcionamiento del convertidor DDB que ofrece alta eficiencia en la conversión de energía, con una mayor elevación en el voltaje a la salida y reducción del rizado en la corriente de entrada a comparación de una topología de convertidor Boost clásico.

Palabras clave: Aplicaciones fotovoltaicas, convertidores de potencia, convertidor DDB, Fusion 360, MATLAB-Simulink, programación de DSP.

	INFORME FINAL DE TRABAJO DE GRADO	Código	FDE 089
		Versión	03
		Fecha	2015-01-22

RECONOCIMIENTOS

Quiero agradecer primeramente a Dios por permitirme y ayudarme a realizar este trabajo de grado de la mejor manera. Agradecer a mis asesores el profe Elkin Henao y Cristian Escudero por corregirme, guiarme e instruirme durante el desarrollo del proyecto. A los docentes y personal del Laboratorio de Electrónica y Energías Renovables en Parque i por asesorarme y brindarme las herramientas y equipos necesarios durante el desarrollo de mis actividades. Y finalmente a mi madre que siempre estuvo pendiente de todo el proceso y avances en el trabajo.

Este trabajo fue apoyado por “Minciencias” y la “Fundación Centro de Investigación Y Desarrollo Tecnológico en Ciencias Aplicadas – CIDTCA” a través de la convocatoria “934-2023 Convocatoria de Estancias Posdoctorales Orientadas por Misiones”; este trabajo forma parte del proyecto de investigación “Desarrollo de una unidad de gestión de energía eléctrica bajo esquema de una microrred DC como herramienta de acceso universal de energía en contexto de la transición energética”. POSDOC24 No 2024-003 (código Minciencias 96709, código CIDTCA 112721-329-2023)

 Institución Universitaria	INFORME FINAL DE TRABAJO DE GRADO	Código	FDE 089
		Versión	03
		Fecha	2015-01-22

ACRÓNIMOS

DDBC → Double dual boost converter (Convertidor double dual boost)

DSP → Procesador de Señales Digitales

Duty → Ciclo de trabajo

Fusion 360 → Software de diseño de PCB

MATLAB[®] → *Software* de programación para analizar, desarrollar y crear modelos de sistemas numéricos.

PCB → Placa de circuito impreso

PSIM → Software de simulación de circuitos electrónicos

PV → Energía solar fotovoltaica

Simulink[®] → Es un sistema de diseño de diagramas de bloques para modelos asociado a *MATLAB*.

 Institución Universitaria	INFORME FINAL DE TRABAJO DE GRADO	Código	FDE 089
		Versión	03
		Fecha	2015-01-22

TABLA DE CONTENIDO

1.	INTRODUCCIÓN	7
	OBJETIVOS.....	9
	General	9
	Específicos.....	9
2.	MARCO TEÓRICO	10
	Microred Eléctrica.....	10
	Energías Renovables	10
	Energía Solar fotovoltaica.....	11
	Sistemas de Almacenamiento de Energía	11
	Supercapacitores	12
	Baterías eléctricas.....	12
	Convertidores de potencia	12
	Convertidores DC-DC (boost, Buck, Buck-boost).....	13
	Convertidor DDB.....	13
	Microcontroladores.....	14
	Equipos utilizados	15
	Fuente de voltaje BK Precision 1672	15
	Generador de funciones BK Precision 4079 y OWON AG1012.....	16
	Osciloscopio Tektronix MDO3024 y R&S RTE1204.....	17
	Carga electrónica BK Precision 8601	18
3.	METODOLOGÍA.....	19
	Construcción del convertidor DDB	19
	Revisión del convertidor Boost clásico	19
	Verificación del funcionamiento del convertidor Boost clásico	20
	Construcción el convertidor Boost espejo.....	22
	Verificación del funcionamiento del convertidor Boost espejo	26
	Conexión del convertidor DDB	27
	Implementación de circuitos de acondicionamiento de señal.....	29

	INFORME FINAL DE TRABAJO DE GRADO	Código	FDE 089
		Versión	03
		Fecha	2015-01-22

Programación del microcontrolador	32
Conexión final del convertidor DDB	36
4. RESULTADOS Y DISCUSIÓN.....	38
Pruebas de elevación de voltaje del convertidor DDB	38
Pruebas del rizado en la corriente de entrada	43
Pruebas de eficiencia en la transferencia de potencia.....	47
5. CONCLUSIONES, RECOMENDACIONES Y TRABAJO FUTURO	52
Conclusiones.....	52
Recomendaciones.....	54
Trabajo futuro.....	54
REFERENCIAS	55

	INFORME FINAL DE TRABAJO DE GRADO	Código	FDE 089
		Versión	03
		Fecha	2015-01-22

1. INTRODUCCIÓN

La preocupación por el cambio climático y los gases de efecto invernadero generado por el uso de combustibles fósiles, ha generado la necesidad de promover fuentes de energía renovable y sostenible. El uso de energía solar ha ganado bastante popularidad en los últimos años (Rabaia et al., 2021), motivado por el fácil acceso, la evolución de las tecnologías de extracción de energía y la posibilidad del aprovechamiento en microrredes eléctricas.

Una microrred eléctrica es un sistema que puede producir, almacenar y distribuir energía a diferentes elementos en el sistema. Para garantizar su funcionamiento y operación eficiente se requieren diferentes elementos interconectados en conjunto, como paneles solares, banco de baterías, supercapacitores y convertidores de potencia (Jithin et al., 2023; Kumar et al., 2020).

Los convertidores de potencia juegan un papel importante dentro de la microrred ya que son los encargados de transferir y regular la energía variando los niveles de tensión o corriente de los elementos de la microrred. Dentro de la microrred se pueden utilizar diferentes tipos de convertidores de potencia de acuerdo con las necesidades de voltaje o corriente, es decir, el convertidor seleccionado depende de si las variables eléctricas se deben elevarla, reducir, rectificar o invertir (Ansari et al., 2021; Iskender & Genc, 2020).

Para extraer la energía DC del panel solar y transferirla a la microrred, es común utilizar un convertidor DC-DC, el cual ajusta el voltaje del panel solar al voltaje requerido en el bus DC de la microrred (Li & He, 2011). La potencia de un panel fotovoltaico depende de las condiciones ambientales y la corriente del panel fotovoltaico puede contener valores altos de rizado debido a la conmutación de los convertidores DC-DC (Zhao et al., 2021). Por lo

	INFORME FINAL DE TRABAJO DE GRADO	Código	FDE 089
		Versión	03
		Fecha	2015-01-22

tanto, es necesario obtener la máxima potencia posible a la salida del panel y del convertidor, con el fin de maximizar la transferencia de energía del panel a la microrred (Jotham Jeremy et al., 2020).

En este aspecto, un convertidor Boost clásico es una buena opción. Sin embargo, el rizado de corriente puede ser muy alto, lo cual afecta la extracción de la máxima potencia. El rizado de corriente provoca fluctuaciones en la corriente del panel fotovoltaico, alejando su operación del punto óptimo de máxima potencia en la curva I-V, que representa la relación entre la corriente y el voltaje del panel, lo que reduce la eficiencia en la extracción de energía del panel. Por otro lado, el convertidor Boost ofrece gran elevación de voltaje, pero a mayor ganancia en voltaje menor es la eficiencia del convertidor.

Una topología de convertidor elevador que resulta ser una buena alternativa para aplicaciones fotovoltaicas es el convertidor DDB (Double Dual Boost Converter). Esta topología está formada por dos convertidores elevadores conectados en antiparalelo en los puertos de entrada, y la salida de ambas etapas de conmutación están conectadas en serie junto con el voltaje del panel (voltaje de entrada del convertidor) (Arizaga-Ayala et al., 2021; Valdez-Resendiz et al., 2023) lo que cancela la ondulación de la corriente del panel y proporciona una mayor elevación de voltaje a la salida con respecto a la entrada con alta eficiencia, por ende, ofrece mayor transferencia de energía y menos pérdidas en la transferencia.

Este trabajo propone la implementación de un convertidor DDB en lazo abierto para aplicaciones fotovoltaicas con el fin de comprobar y analizar en pruebas de laboratorio las ventajas de su aplicación.

	INFORME FINAL DE TRABAJO DE GRADO	Código	FDE 089
		Versión	03
		Fecha	2015-01-22

OBJETIVOS

General

Implementar un convertidor DDB (Double Dual Boost) en lazo abierto para aplicaciones PV.

Específicos

- Construir el convertidor DDB para aplicaciones PV.
- Implementar los circuitos de acondicionamiento de señal del convertidor, para medir variables y recibir comandos de control.
- Programar la lectura de variables y envío de PWM en una DSP para manipular el convertidor DDB.
- Validar la operación del convertidor DDB para aplicaciones PV en diferentes puntos de operación.

El documento está organizado de la siguiente manera:

La sección 2 describe los conceptos teóricos que se necesitarán para comprender el uso del convertidor DDB en aplicaciones PV. En la sección 3 se presenta la construcción del convertidor DDB, la fabricación de los circuitos de acondicionamiento de señal, programación del microcontrolador para enviar señales PWM a los convertidores y para leer variables análogas, al final de la sección se muestra el desarrollo de las pruebas de laboratorio realizadas. En la sección 4 se presentan los resultados obtenidos de cada prueba de laboratorio, así como las dificultades que se tuvieron en el desarrollo del trabajo. Finalmente, en la sección 5 se describen las conclusiones obtenidas sobre la implementación del convertidor DDB en aplicaciones PV, la implantación de los circuitos de control y acondicionamiento de señal, además se describen las actividades futuras que se pueden realizar con el convertidor DDB.

	INFORME FINAL DE TRABAJO DE GRADO	Código	FDE 089
		Versión	03
		Fecha	2015-01-22

2. MARCO TEÓRICO

Microred Eléctrica

Una microrred es una red local de producción y distribución de energía que puede funcionar de manera autónoma o conectada a la red eléctrica principal (Alzahrani et al., 2017). Estas redes están compuestas por un sistema de generación, generalmente basado en energía renovable, un sistema de almacenamiento de energía, y un sistema de distribución que suministra energía a las cargas conectadas (El-Shahat & Sumaiya, 2019; Zambroni de Souza & Castilla, 2019). Las microrredes eléctricas tienen diversas aplicaciones, como la distribución de energía en áreas remotas donde la red eléctrica convencional no llega, y en instalaciones industriales y comerciales, donde se busca asegurar un suministro de energía confiable y reducir el impacto de las interrupciones de la red en operaciones críticas (Jirdehi et al., 2020).

Energías Renovables

Las energías renovables son fuentes de energía que se obtienen de recursos naturales que son inagotables o se renuevan rápidamente en escalas de tiempo humanas. Estas fuentes de energía incluyen la energía solar, eólica, hidroeléctrica, geotérmica (Barragán, 2020; Sayed et al., 2023; Twidell, 2021).

- **Energía solar:** Se obtiene del sol, utilizando tecnologías como paneles o colectores solares para convertir la luz solar en electricidad.
- **Energía eólica:** Se genera a partir del viento, utilizando aerogeneradores para convertir la energía cinética del viento en electricidad.
- **Energía hidroeléctrica:** Se obtiene del movimiento del agua, utilizando presas y turbinas para convertir la energía cinética del agua en electricidad.

	INFORME FINAL DE TRABAJO DE GRADO	Código	FDE 089
		Versión	03
		Fecha	2015-01-22

- **Energía geotérmica:** Se deriva del calor interno de la Tierra, aprovechando el calor natural del subsuelo para generar electricidad o proporcionar calefacción.

Las energías renovables son consideradas más sostenibles que las fuentes de energía no renovables, como el petróleo, el carbón o el gas natural, ya que no agotan los recursos naturales y tienen un menor impacto ambiental en términos de emisiones de gases de efecto invernadero y contaminación (Cobacango, 2022; Hernández, 2020). Además, las energías renovables ofrecen la posibilidad de mayor independencia energética y pueden contribuir a la mitigación del cambio climático.

Energía Solar fotovoltaica

La energía solar es aquella que se obtiene a partir de la radiación electromagnética del sol captada en forma de luz, calor y rayos ultravioleta (Patil, 2022; Sampaio & González, 2017).

La energía solar fotovoltaica consiste en obtener directamente la electricidad a partir de la radiación solar, esto se consigue gracias a la instalación de paneles solares fotovoltaicos, que están compuestos por células fotoeléctricas, también llamadas células solares o células fotovoltaicas, que son dispositivos electrónicos que permiten transformar la energía lumínica en energía eléctrica, lo que genera energía solar fotovoltaica (Lima et al., 2022; Maka & Alabid, 2022).

Sistemas de Almacenamiento de Energía

Es necesario implementar un sistema de almacenamiento en una microrred eléctrica con el fin de almacenar la energía sobrante cuando la producción de energía es grande, y poder contar con esta como un método de respaldo cuando hay fallo en la red eléctrica principal (Olabi et al., 2021). Hay diferentes tipos de sistemas de almacenamiento de energía:

	INFORME FINAL DE TRABAJO DE GRADO	Código	FDE 089
		Versión	03
		Fecha	2015-01-22

Supercapacitores

Los supercapacitores, también llamados ultracapacitores, están formados por pares de placas conductoras separadas por un medio dieléctrico. Su funcionamiento es muy similar al de un condensador a gran escala. Sin embargo, el nombre de supercapacitor indica su mayor capacidad (medida en Faradios), pudiéndose cargar y descargar en brevísimos periodos de tiempo (Raza et al., 2018).

Se utilizan generalmente como apoyo energético para cubrir picos de demanda sin generar sobrecargas a la red y para cubrir interrupciones de suministro de poca duración.

Baterías eléctricas

Una batería eléctrica, también llamada pila o acumulador eléctrico, es un artefacto compuesto por celdas electroquímicas capaces de convertir la energía química en su interior en energía eléctrica. Así, las baterías generan corriente continua y, de esta manera, sirven para alimentar distintos circuitos eléctricos, dependiendo de su tamaño y potencia (Yang et al., 2018). Existen muchos tipos de baterías, atendiendo a los elementos empleados en su fabricación, tales como: alcalinas, de plomo-ácido, níquel y polímero de litio.

Convertidores de potencia

Un convertidor de potencia es un dispositivo electrónico diseñado para transformar la energía eléctrica de dos formas diferentes, alterna y continua, modificando sus características de tensión, corriente o frecuencia, y tiene aplicaciones en energías renovables, en la electrónica de consumo, en el sector industrial, entre otros.

Los convertidores de potencia utilizan dispositivos semiconductores (Nguyen & Kwak, 2020), como diodos y transistores. Estos dispositivos son capaces de conmutar entre dos

	INFORME FINAL DE TRABAJO DE GRADO	Código	FDE 089
		Versión	03
		Fecha	2015-01-22

estados, lo que le permite al convertidor tener diferentes configuraciones de circuitos, con el fin de alterar la energía eléctrica que fluye a través de ellos.

Existen cuatro tipos de convertidores de potencia según el formato de las energías de entrada y salida:

- Convertidores AC-DC: También llamados rectificadores, transforman corriente alterna en corriente continua (Yodwong et al., 2020).
- Convertidores DC-DC: Transforman un valor de corriente continua de entrada, en otro valor de corriente continua a la salida (Paez et al., 2019).
- Convertidores DC-AC: también llamados inversores, transforman corriente continua en corriente alterna (Vázquez & Vaquero, 2024).
- Convertidores AC-AC: Transforman el valor eficaz de la tensión de entrada en otro valor a la salida, conservando o alterando la frecuencia (Samanta & Rathore, 2018).

Convertidores DC-DC (boost, Buck, Buck-boost)

- **Convertidor Boost:** También conocido como elevador, aumenta el nivel de voltaje de entrada a un nivel de voltaje más alto en la salida.
- **Convertidor Buck:** También conocido como reductor, reduce el nivel de voltaje de entrada a un nivel de voltaje más bajo en la salida.
- **Convertidor Buck-Boost:** También conocido como reductor-elevador, puede reducir o elevar el voltaje de entrada.

Convertidor DDB

Un DDBC (Double Dual Boost Converter) es una topología de convertidor DC-DC que combina características de convertidores boost y dual boost para proporcionar una mayor flexibilidad y eficiencia en la conversión de energía. Este tipo de convertidor es especialmente útil en aplicaciones donde se requieren altos niveles de elevación de voltaje

	INFORME FINAL DE TRABAJO DE GRADO	Código	FDE 089
		Versión	03
		Fecha	2015-01-22

y una gestión eficiente de la energía, como en sistemas fotovoltaicos, vehículos eléctricos y otros sistemas de energía renovable (Henaó-Bravo et al., 2021).

Esta topología consiste en conectar un convertidor boost y otro convertidor boost en antiparalelo, y su funcionamiento cancela la ondulación en la corriente del panel fotovoltaico, lo que conduce al aumento en la extracción de energía (Arizaga-Ayala et al., 2021).

Microcontroladores

Un microcontrolador es un circuito integrado diseñado para ejecutar tareas específicas de control en dispositivos electrónicos.

Los microcontroladores tienen aplicación en microrredes eléctricas, para la medición y control de variables eléctricas, permiten la comunicación entre diferentes sistemas y el control inteligente mediante algoritmos avanzados (Özer et al., 2017).

Algunos de los microcontroladores más usados son:

- **Arduino:** Es una plataforma de desarrollo de hardware y software de código abierto que permite a los usuarios crear fácilmente proyectos electrónicos interactivos. Es especialmente popular entre aficionados, estudiantes y profesionales debido a su simplicidad y flexibilidad.
- **DSP:** Una DSP (Digital Signal Processor o Procesador de Señales Digitales) es un tipo de microprocesador diseñado específicamente para procesar señales digitales en tiempo real. Se utilizan ampliamente en aplicaciones donde se requiere un procesamiento rápido y eficiente de datos, como en comunicaciones, audio, video, radar, y control industrial.
- **FPGA:** Una FPGA (Field-Programmable Gate Array, o Matriz de Puertas Programable en Campo) es un tipo de circuito integrado que puede ser configurado por el usuario después de la fabricación. Esto permite a los diseñadores de hardware programar y

	INFORME FINAL DE TRABAJO DE GRADO	Código	FDE 089
		Versión	03
		Fecha	2015-01-22

reprogramar la FPGA para realizar tareas específicas y adaptarla a diferentes aplicaciones como en telecomunicaciones e industria automotriz.

Una DSP resulta ser una muy buena herramienta para aplicaciones PV debido a diferentes características y funciones que permiten un procesamiento más eficiente y preciso de las señales eléctricas como su precisión y rapidez de procesamiento de señales en tiempo real, su capacidad para realizar algoritmos avanzados de control y optimización, su eficiencia en el manejo de datos en distintas tareas de manera simultánea, su comunicación y conectividad a través de múltiples interfaces de comunicación (Mondal et al., 2022; Shuvo et al., 2020).

Equipos utilizados

Para realizar pruebas de laboratorio se hará uso de los siguientes equipos del Laboratorio de Electrónica y Energías Renovables:

Fuente de voltaje BK Precision 1672

La fuente de voltaje de la Figura 1 es una fuente de voltaje DC de salida triple que provee dos salidas de voltaje variable de 0 a 32V y corriente de 0 a 3A cada una, y una salida de voltaje fijo de 5V y corriente de 3A. Esta fuente será usada para alimentar los circuitos de los convertidores de potencia y para simular el voltaje de entrada de los convertidores producido por un panel solar.



Figura 1: Fuente de voltaje BK Precision 1672

Generador de funciones BK Precision 4079 y OWON AG1012

Los generadores de señales de las Figuras 2 y 3 serán usados para generar las señales PWM que se enviarán a los MOSFET de los convertidores de potencia. Estos generadores de señales cuentan con dos puertos de salida y diferentes formas de onda que se pueden seleccionar y configurar.



Figura 2: Generador de funciones BK Precision 4079

	INFORME FINAL DE TRABAJO DE GRADO	Código	FDE 089
		Versión	03
		Fecha	2015-01-22



Figura 3: Generador de funciones OWON AG1012

Osciloscopio Tektronix MD03024 y R&S RTE1204

Los osciloscopios de las Figuras 4 y 5 son osciloscopios digitales de señal mixta que cuentan con cuatro canales analógicos para medir corriente o voltaje. Los osciloscopios serán usados para medir voltaje y corriente y calcular la potencia a la entrada y salida de los convertidores.



Figura 4: Osciloscopio Tektronix MD03024



Figura 5: Osciloscopio R&S RTE1204

Carga electrónica BK Precision 8601

La carga electrónica de la Figura 6 es una carga electrónica DC programable entre cuatro modos de operación como voltaje, corriente, potencia o resistencia. Será utilizada en el modo de resistencia para representar la carga a la salida de los convertidores.



Figura 6: Carga electrónica BK Precision 8601

	<p style="text-align: center;">INFORME FINAL DE TRABAJO DE GRADO</p>	Código	FDE 089
		Versión	03
		Fecha	2015-01-22

3. METODOLOGÍA

Construcción del convertidor DDB

El convertidor DDB está formado por un convertidor Boost clásico y de un convertidor Boost espejo. El convertidor Boost espejo es una topología de convertidor Boost clásico, a diferencia de que el circuito está invertido con respecto a la fuente de entrada y de salida, es decir, el inductor está conectado en serie con el nodo negativo de la fuente de entrada y el transistor MOSFET está conectado entre el inductor y la tierra del circuito.

Para llevar a cabo la construcción del convertidor DDB se corrobora primero el funcionamiento de los convertidores Boost clásico y Boost espejo construidos por separado.

Revisión del convertidor Boost clásico

El convertidor Boost clásico cuenta con la sección de potencia, fuentes de alimentación, sistema habilitador del circuito, "Driver" para los MOSFET y generador de PWM como se observa en el plano de la Figura 7 perteneciente al Laboratorio de Electrónica y Energías Renovables.

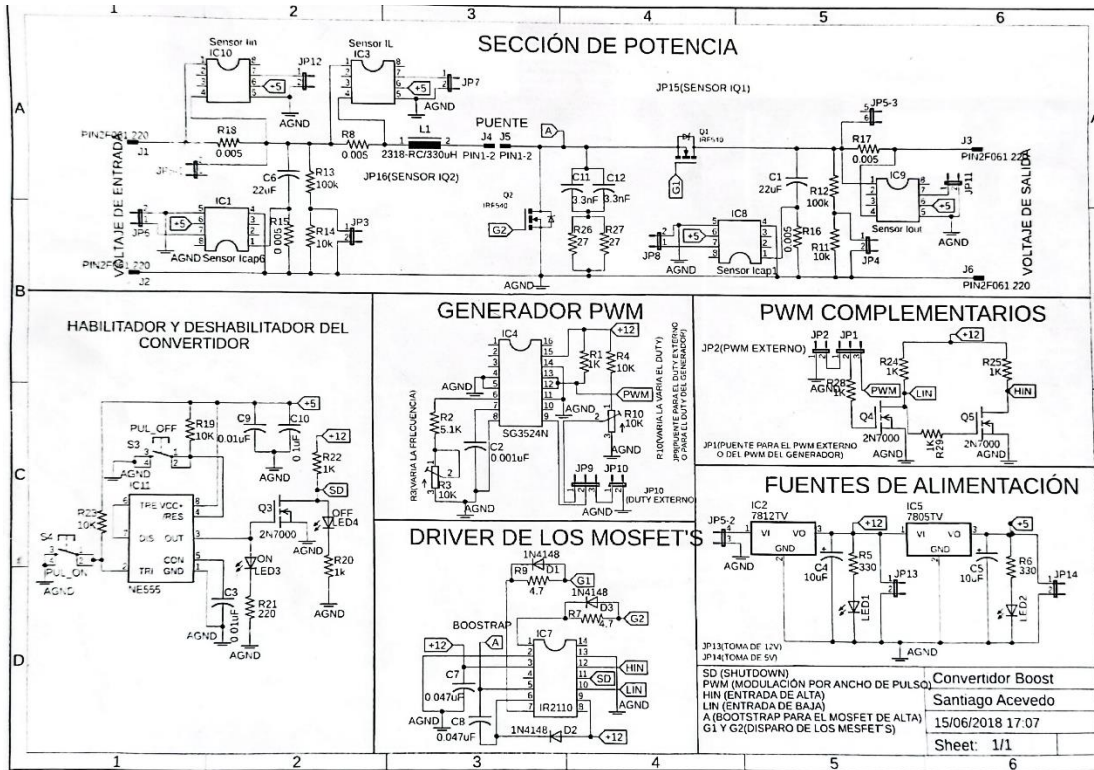


Figura 7: Esquemático del convertidor Boost

Verificación del funcionamiento del convertidor Boost clásico

Primero se alimenta el circuito conectando un voltaje de 15V desde la fuente de voltaje, luego se conecta un generador de señales con una señal PWM con 5Vpp de amplitud, 2.5V de offset, 100kHz de frecuencia y un duty del 50%, y se conecta una carga resistiva de 100Ω a la salida del convertidor. Por último, se conecta un voltaje de potencia de 5V a la entrada del convertidor y se habilita el funcionamiento del circuito, se verifica el voltaje a la salida del convertidor. El convertidor conectado se observa en la Figura 8.

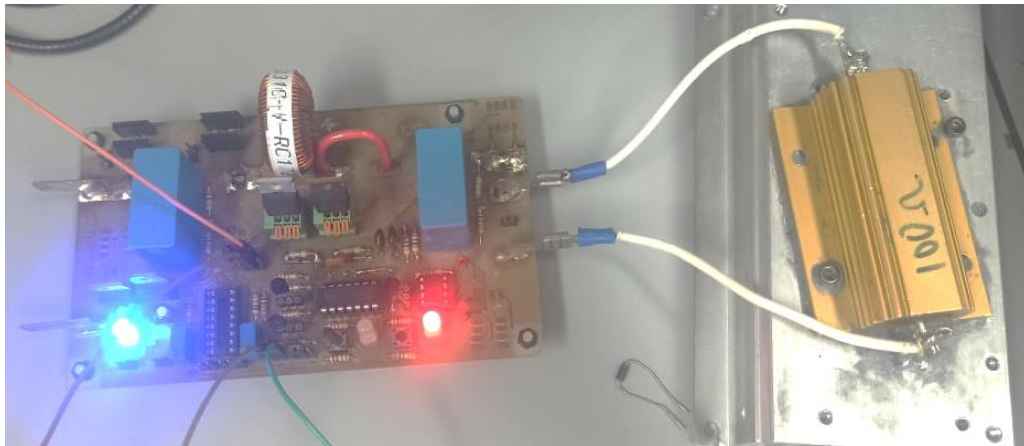


Figura 8: Convertidor Boost clásico

Según (Valderrama et al., 2013) el voltaje de salida v_{dc} del convertidor Boost clásico está dado por la ecuación [1], siendo v_{pv} el voltaje de entrada del convertidor y D el duty de los Mosfet.

$$v_{dc} = \frac{v_{pv}}{1 - D} \quad [1]$$

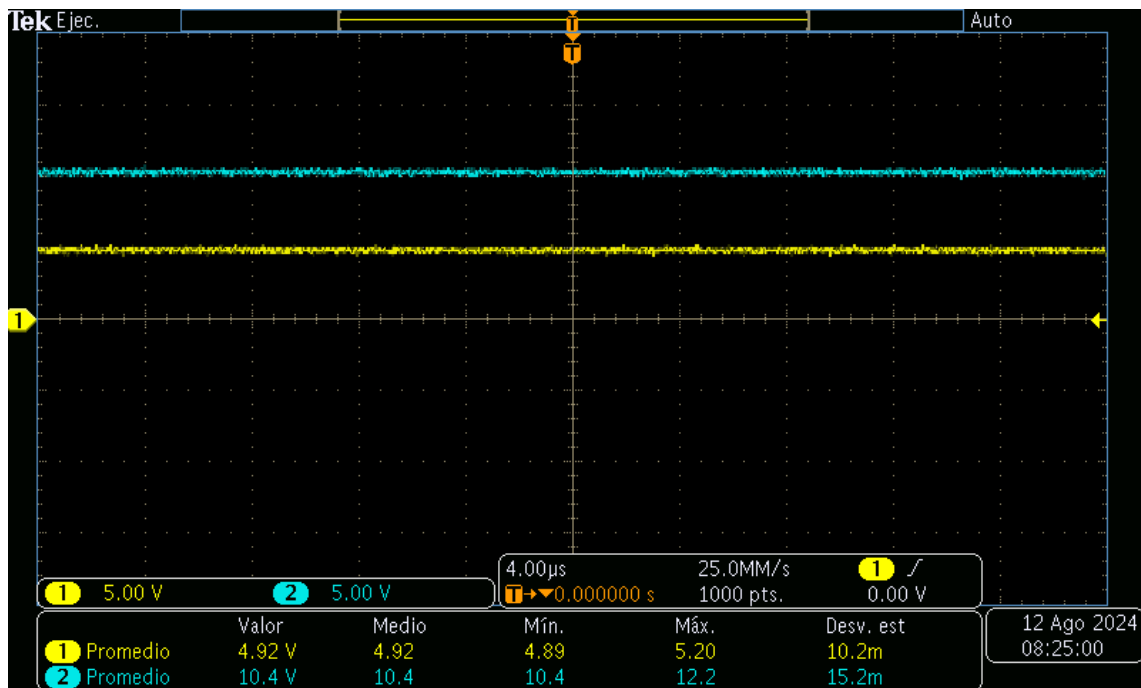


Figura 9: Voltajes de salida y entrada del convertidor Boost

En la Figura 9 se muestran los voltajes de salida y entrada del convertidor Boost. La señal amarilla son los 5V de entrada y la señal azul es el voltaje de salida del convertidor que muestra 10.4V. Por medio de la ecuación [1] se tiene que el voltaje teórico de salida es de 10V, por ende, se valida el funcionamiento del convertidor.

Construcción el convertidor Boost espejo

La Figura 10 muestra el esquema del convertidor Boost espejo simulado en software PSIM. La fuente de voltaje V_{pv} modela el voltaje del panel, el capacitor C_{pv} se conecta para reducir la ondulación del voltaje de entrada. El circuito también cuenta con un inductor (L_1) y una resistencia shunt (R_{L1}) para medir su corriente. Q_1 y Q_2 representan los transistores de potencia tipo Mosfet. V_{dc} y R_L representan el voltaje y la carga a la salida del convertidor y el capacitor C_1 se encarga de reducir la ondulación del voltaje de salida. Por medio de la fuente de voltaje tipo "diente de sierra" V_{SAW} , el amplificador operacional OPA_1 y la compuerta negadora NOT_1 se generan las señales PWM de control u_1 y u_2 para los Mosfets.

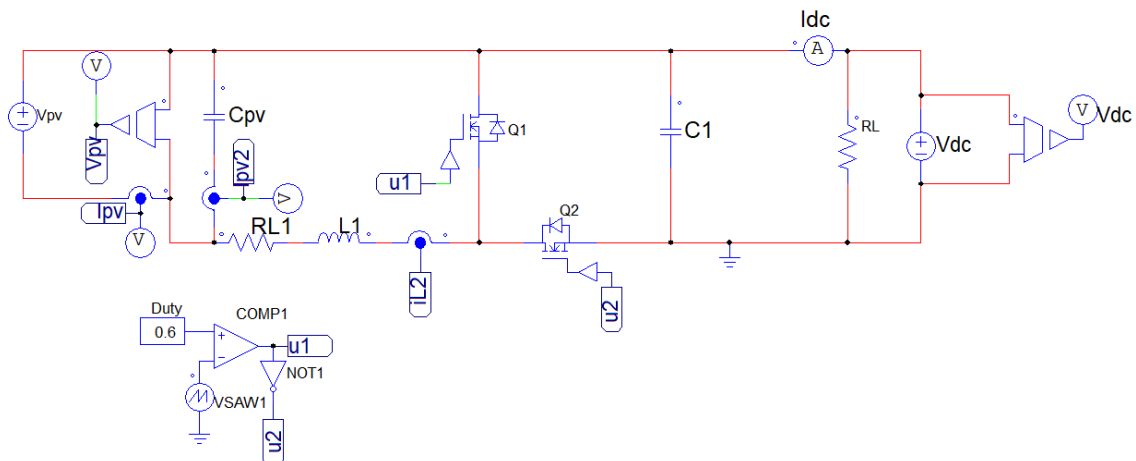


Figura 10: Esquema del convertidor Boost espejo en PSIM

Luego de validar la operación del convertidor en simulación, para la construcción del convertidor Boost espejo, el diseño del circuito se realiza en software Fusion 360, incluyendo la sección de potencia, fuentes de alimentación para los circuitos, habilitador del sistema, conmutador de PWM, “Driver” para los Mosfet, circuitos de acondicionamiento de señal para voltajes y corrientes y diferentes puntos de medición. El esquemático se puede ver en las Figuras 11 y 12, y la vista de board (BRD) en la Figura 13. Luego se fabrica el convertidor con los equipos de prototipado de PCB del Laboratorio de Electrónica y Energías Renovables como se ve en la Figura 14.

Para la construcción del convertidor se tuvo en cuenta los valores y referencias de los componentes del convertidor Boost clásico de la Figura 7, ya que este convertidor espejo es una topología de convertidor Boost clásico con modificaciones en el diseño del circuito.

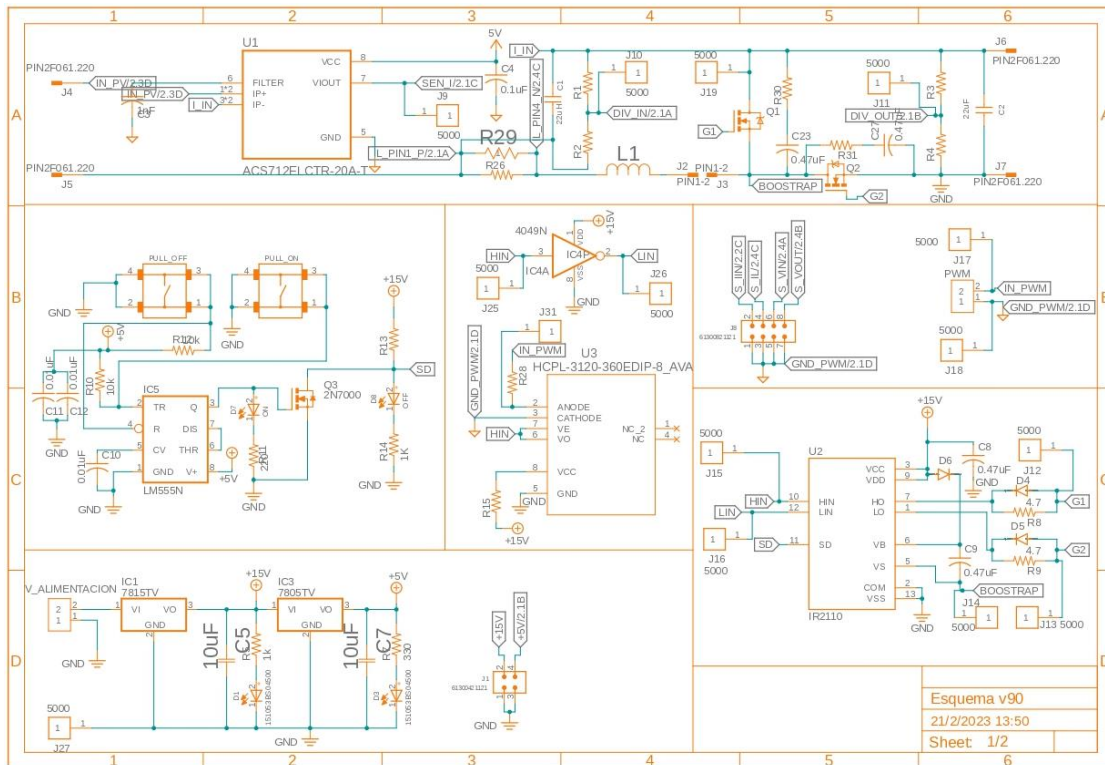


Figura 11: Diseño del convertidor Boost espejo en Fusion 360. Sección de potencia

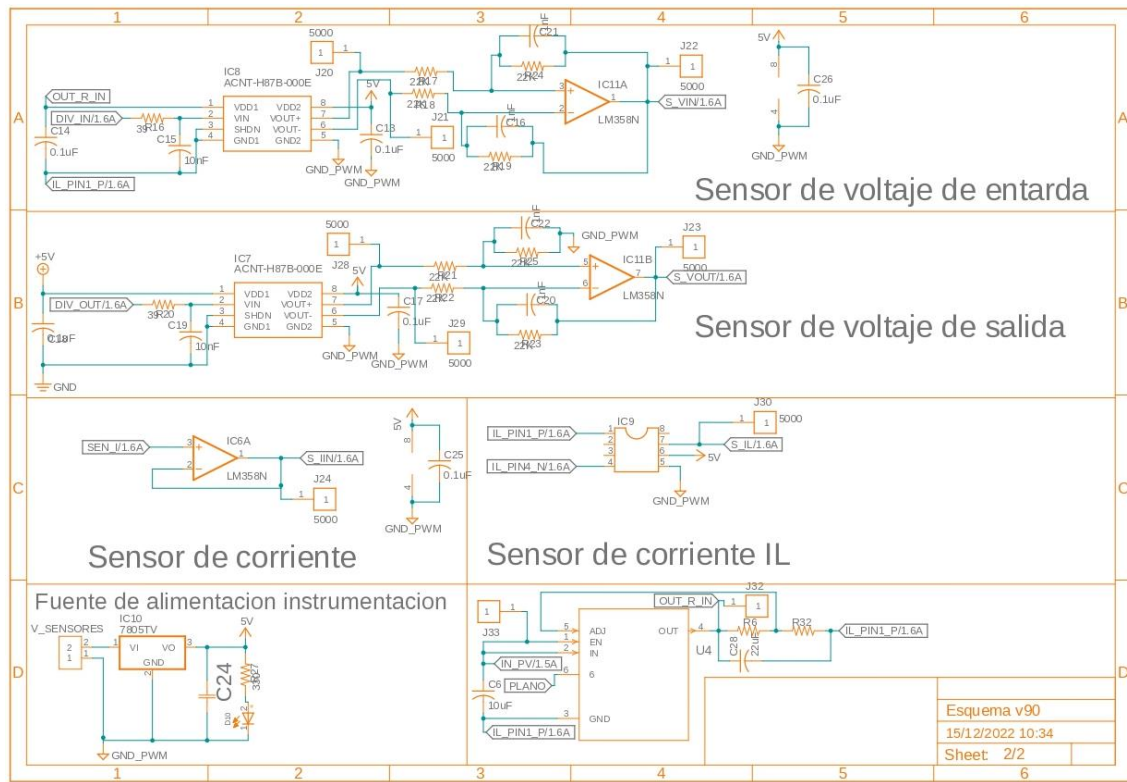


Figura 12: Diseño del convertidor Boost espejo en Fusion 360. Sensores y fuente de alimentación

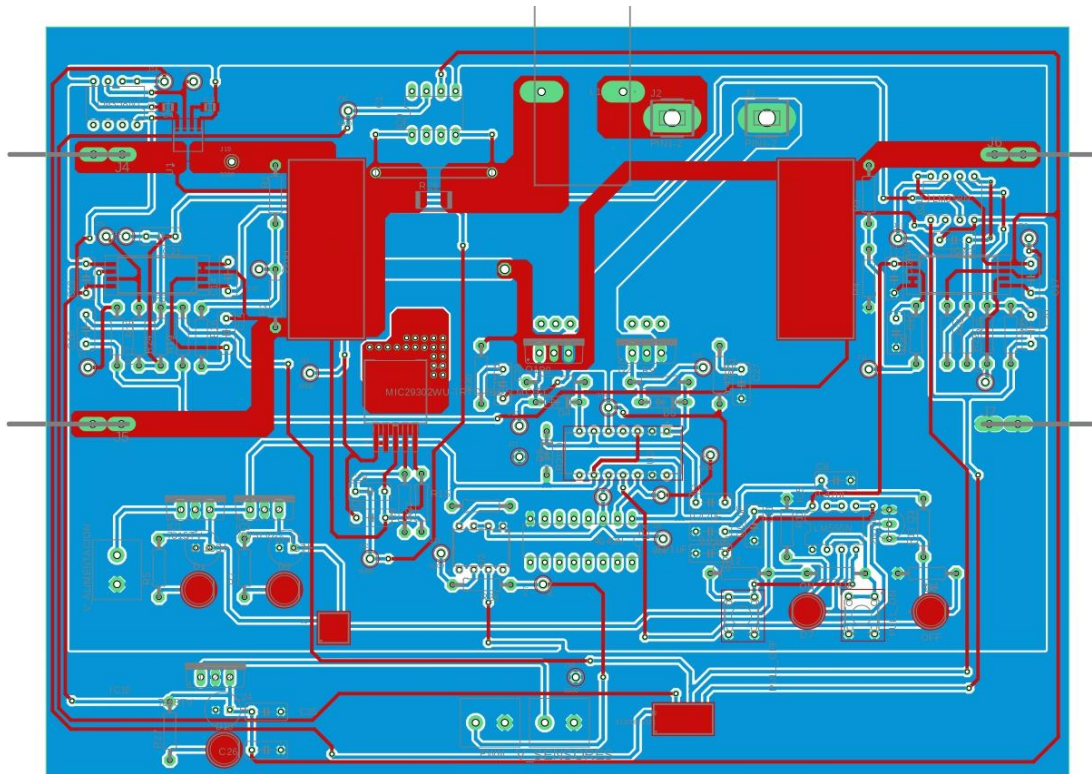


Figura 13: Diseño del convertidor Boost espejo en Fusion 360. Vista de Board (BRD)

	INFORME FINAL DE TRABAJO DE GRADO	Código	FDE 089
		Versión	03
		Fecha	2015-01-22

En la Figura 13 se observa la vista de Board (BRD) del convertidor Boost espejo. En color azul se ven las pistas (conexiones) que irán en la parte inferior de la tarjeta (bottom), y en color rojo se ven las pistas que irán en la parte superior de la tarjeta (top) donde se encuentran los dispositivos de montaje superficial (SMD por sus siglas en inglés). También se observa la silueta de cada componente, que es el lugar donde va ubicado en la tarjeta.

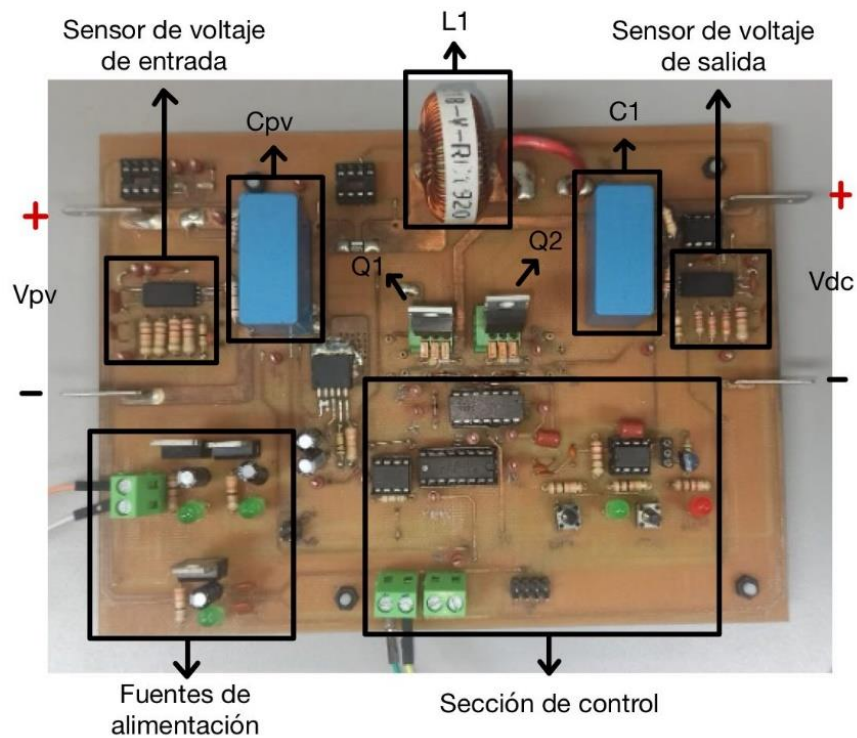


Figura 14: Construcción el convertidor Boost espejo

En el circuito construido de la Figura 14 se implementó para la sección de potencia un inductor L_1 de $330\mu H$ y dos capacitores C_{pv} y C_1 de $22\mu F$. Para las fuentes de alimentación se utilizaron los reguladores de voltaje $LM7815$ y $LM7805$ de $15V$ y $5V$ respectivamente. En la sección de control se encuentra un "Driver" $IR2110$ para los Mosfet, un circuito habilitador del sistema implementando un $NE555$, un optoacoplador $HCPL 3120$ para aislar la señal PWM de entrada y una compuerta negadora $CD4049$ para

	INFORME FINAL DE TRABAJO DE GRADO	Código	FDE 089
		Versión	03
		Fecha	2015-01-22

conmutar los PWM. Finalmente, se implementa un *ACNT – H87B – 000E* para los sensores de voltaje a la entrada y a la salida del convertidor.

Verificación del funcionamiento del convertidor Boost espejo

Primero se alimenta el circuito de acondicionamiento con un voltaje de 18V desde la fuente de voltaje y se conecta una señal PWM con 5Vpp de amplitud, 2.5V de offset, 100kHz de frecuencia y un duty del 50% desde el generador de señales. Luego se conecta una carga resistiva de 100Ω a la salida del convertidor y una fuente de potencia de 5V a la entrada del convertidor. Por último, se habilita el funcionamiento del circuito y se verifica el voltaje a la salida del convertidor. La conexión final del convertidor se observa en la Figura 15

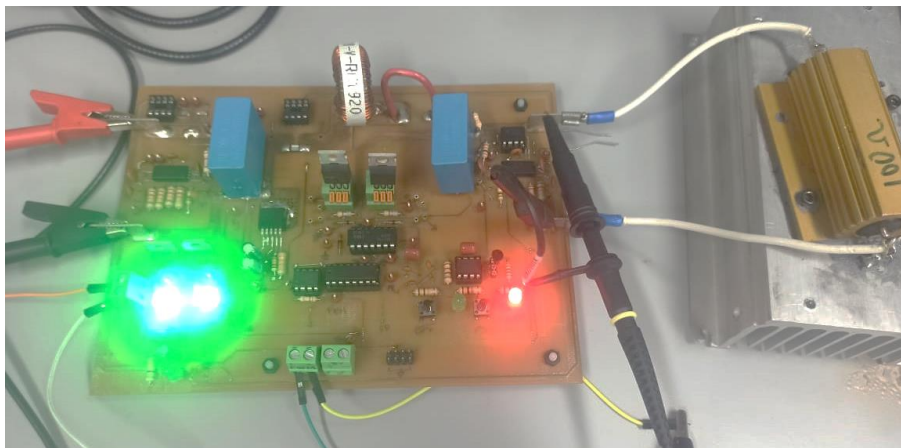


Figura 15: Convertidor Boost espejo

La Figura 16 muestra los voltajes de salida y entrada del convertidor Boost espejo. En amarillo se ven los 5V de entrada y en azul el voltaje de salida del convertidor de 9.65V. Usando la ecuación [1] del convertidor Boost clásico, el voltaje teórico de salida es de 10V, aproximadamente igual al voltaje de salida real. Con esto se valida el funcionamiento del convertidor Boost espejo.

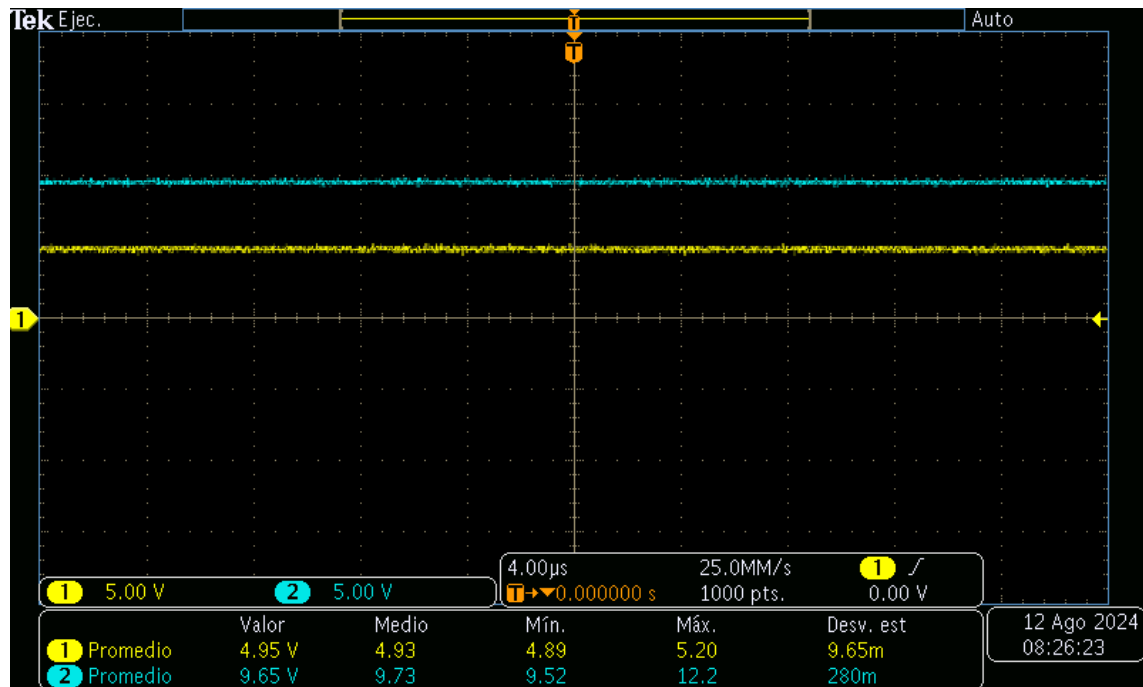


Figura 16: Voltaje de salida y entrada del convertidor Boost espejo

Conexión del convertidor DDB

Después de verificar el funcionamiento de los dos convertidores por separado se realiza la conexión de ambos convertidores juntos como se muestra en el esquema de la Figura 17.

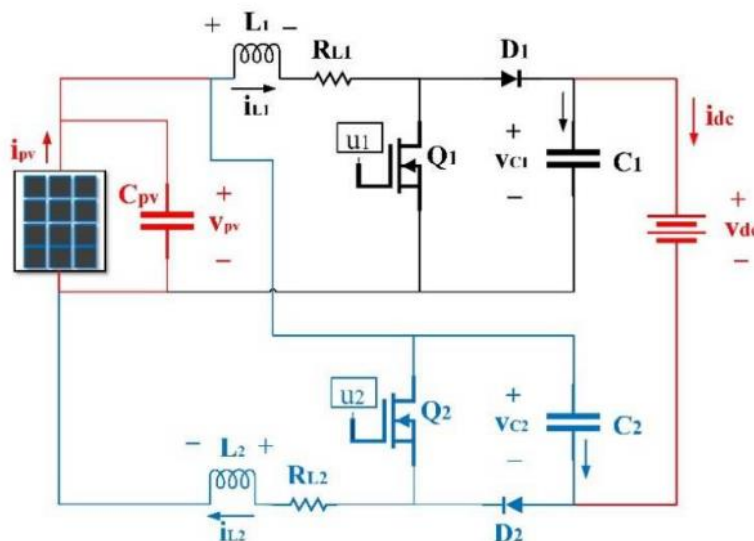


Figura 17: Esquemático de conexión del convertidor DDB (Henao-Bravo et al., 2021)

	INFORME FINAL DE TRABAJO DE GRADO	Código	FDE 089
		Versión	03
		Fecha	2015-01-22

Los valores de los elementos y referencias utilizadas se encuentran en la Tabla 1.

Tabla 1: Componentes del convertidor DDB

BOOST CLASICO	BOOST ESPEJO	VALOR O REFERENCIA
L1	L2	330μH
CPV1	CPV2	22μF - 100V
C1	C2	22μF - 100V
Q1	Q2	IRF3710
Q3	Q4	IRF3110
RL1	RL2	5mΩ

Las pruebas serán realizadas en lazo abierto con una carga resistiva de 100Ω a la salida y el voltaje producido por el panel solar será entregado por una fuente de voltaje DC. Se conectan las fuentes de alimentación y señales PWM ya mencionadas para cada convertidor. El convertidor fue construido con 4 transistores tipo Mosfet (dos para cada convertidor independiente), esto con el fin de poder utilizar el convertidor DDB de manera bidireccional en otras aplicaciones. Según (Henao-Bravo et al., 2021) la siguiente es la ecuación del voltaje de salida del convertidor DDB:

$$v_{dc} = v_{c1} - v_{pv} + v_{c2} \quad [2]$$

La Figura 18 muestra la conexión del convertidor DDB siguiendo el esquema de la Figura 17. Los convertidores están conectados en paralelo, lo que significa que la entrada V_{pv} para cada convertidor es la misma. Para el convertidor Boost los Mosfet, el inductor y los capacitores a la entrada y la salida se denotan Q_1, Q_3, L_1, C_{pv1} y C_1 respectivamente, y para el convertidor Boost espejo Q_2, Q_4, L_2, C_{pv2} y C_2 respectivamente.

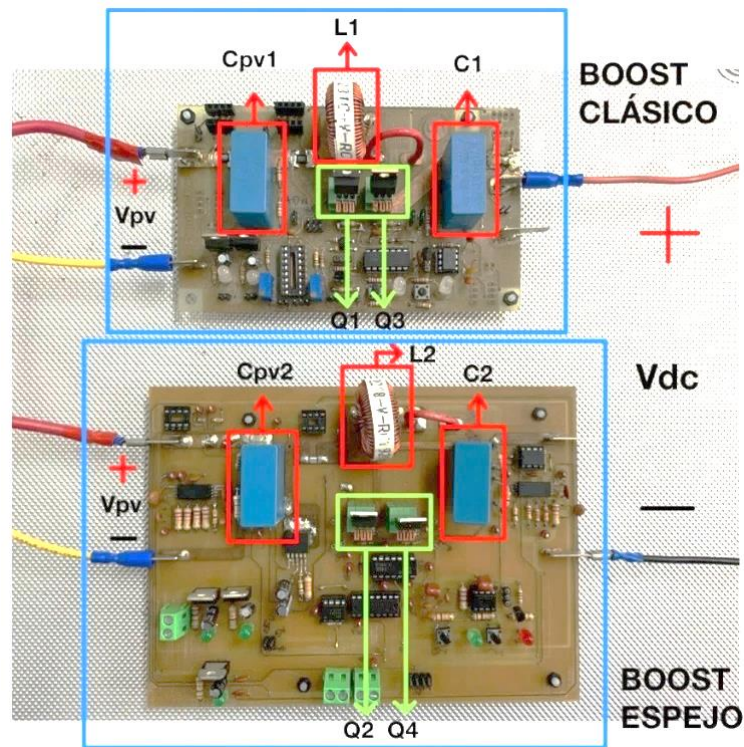


Figura 18: Conexión del convertidor DDB

Implementación de circuitos de acondicionamiento de señal

Para el circuito de acondicionamiento de voltaje, se utilizó el sensor *ACNT – H87B – 000E* (Figura 19) que es un sensor de voltaje optoacoplado. En la aplicación del convertidor Boost, es recomendable aislar el circuito de potencia del de control para proteger los circuitos de señales y el microcontrolador de las altas corrientes que pueden generarse en la sección de potencia. Además, este sensor ofrece una alta velocidad de conmutación, lo que lo hace ideal para aplicaciones que requieren velocidad de operación y un corto tiempo de respuesta.

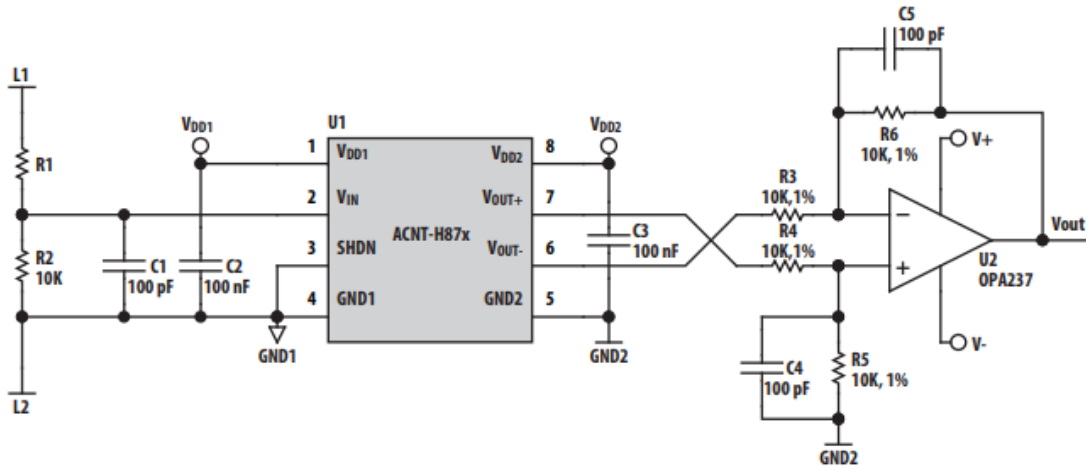


Figura 19: Circuito de acondicionamiento del sensor ACNT-H87B-000E (BROADCOM, 2017)

Para el circuito de acondicionamiento de corriente, se usó el sensor *CS712ELCTR – 20A – T* (Figura 20) que es un sensor de efecto Hall, es decir, capaz de medir la corriente eléctrica sin tener contacto directo con el conductor. Esto proporciona aislamiento entre la salida y la entrada para proteger los demás circuitos de la sección de potencia. Además, el sensor tiene una salida analógica proporcional, lo que ofrece mayor precisión y linealidad.

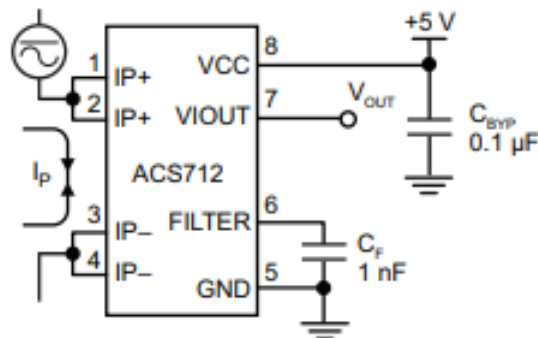


Figura 20: Circuito de acondicionamiento del sensor ACS712ELCTR-20A-T (Allegro MicroSystems, 2024)

En la Figura 21 se muestra el diseño en software Fusion 360 de los circuitos de acondicionamiento de señal para voltaje y corriente de entrada y salida del convertidor Boost clásico.

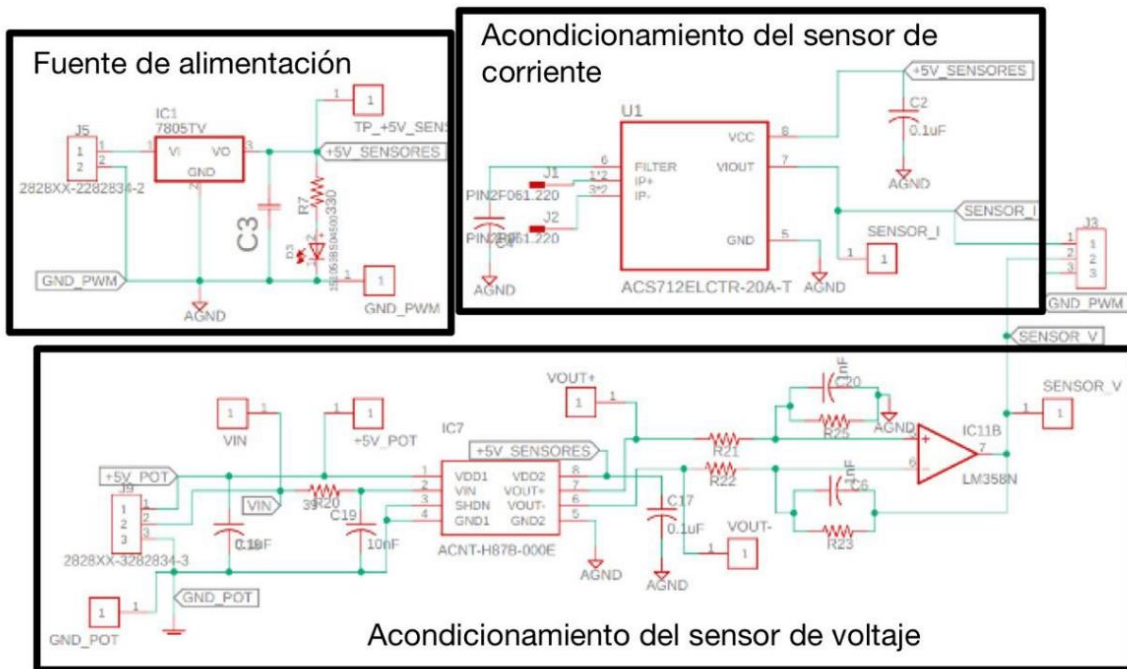


Figura 21: Diseño de los circuitos de acondicionamiento de señal del convertidor Boost en Fusion 360

El diseño de la tarjeta cuenta con una fuente de alimentación utilizando un regulador de voltaje *LM7805* de 5V. El acondicionamiento del sensor de corriente *ACS712ELCTR-20A-T* requiere una alimentación de 5V, un capacitor para el voltaje de alimentación y un capacitor de filtro. El acondicionamiento del sensor de voltaje *ACNT-H87B-000E* requiere de dos alimentaciones de 5V con capacitores para la entrada y la salida, una resistencia y un capacitor para la señal de entrada al sensor, un comparador diferencial para las dos señales de salida del sensor, y resistencias y capacitores para las señales de salida.

Los circuitos de acondicionamiento de señal del convertidor Boost espejo fueron diseñados y construidos en la misma tarjeta del convertidor como se ve en la Figura 12. También se implementaron los acondicionamientos de señal mostrados en las Figuras 19 y 20 y adicionalmente un sensor de corriente para el inductor. La tarjeta construida se observa en la Figura 22 y posteriormente se conecta al convertidor DDB.

	INFORME FINAL DE TRABAJO DE GRADO	Código	FDE 089
		Versión	03
		Fecha	2015-01-22

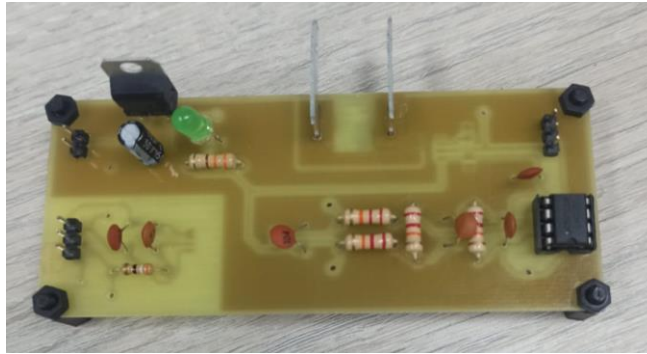


Figura 22: Tarjeta de acondicionamiento de señal

Programación del microcontrolador

Se realiza la programación de una DSP TMS320F28335 (Figura 23) con ayuda del software PSIM para la generación de señales PWM y adquisición de señales análogas. Se realiza el esquema de cada circuito en el software PSIM y luego se exporta el código al software Code Composer Studio, para ser ejecutado en el microcontrolador.

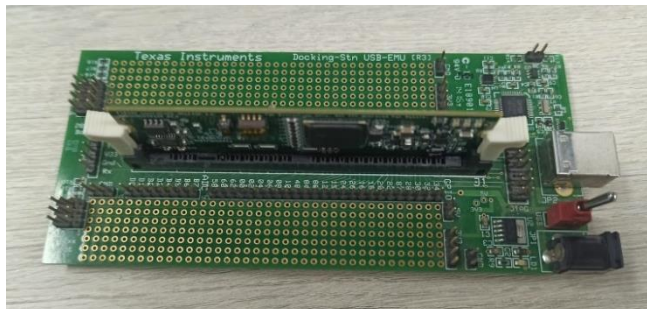


Figura 23: DSP TMS320F28335

La Figura 24 muestra el circuito generador de PWM. Para generar la señal, se utiliza el bloque 1-ph PWM, configurando los parámetros destacados en la Figura 25, mientras que los demás se dejan en sus valores predeterminados. La fuente de voltaje Duty impone el duty de la señal; dado que este valor se interpreta como un porcentaje, la fuente toma valores entre 0V y 1V.

En la Figura 26 se observa la configuración correspondiente al bloque F28335 Board Config, donde se configuran los pines del microcontrolador como PWM. En este caso, se seleccionan los pines GPIO0 y GPIO1, que corresponden al PWM 1.

Finalmente, en el bloque DSP Clock F28335, se configura la frecuencia del microcontrolador, la cual se fija en 150 MHz, como se muestra en la Figura 27.

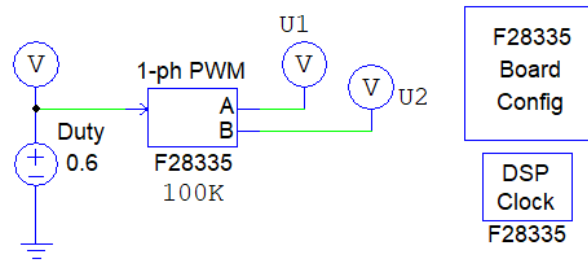


Figura 24: Circuito generador de PWM

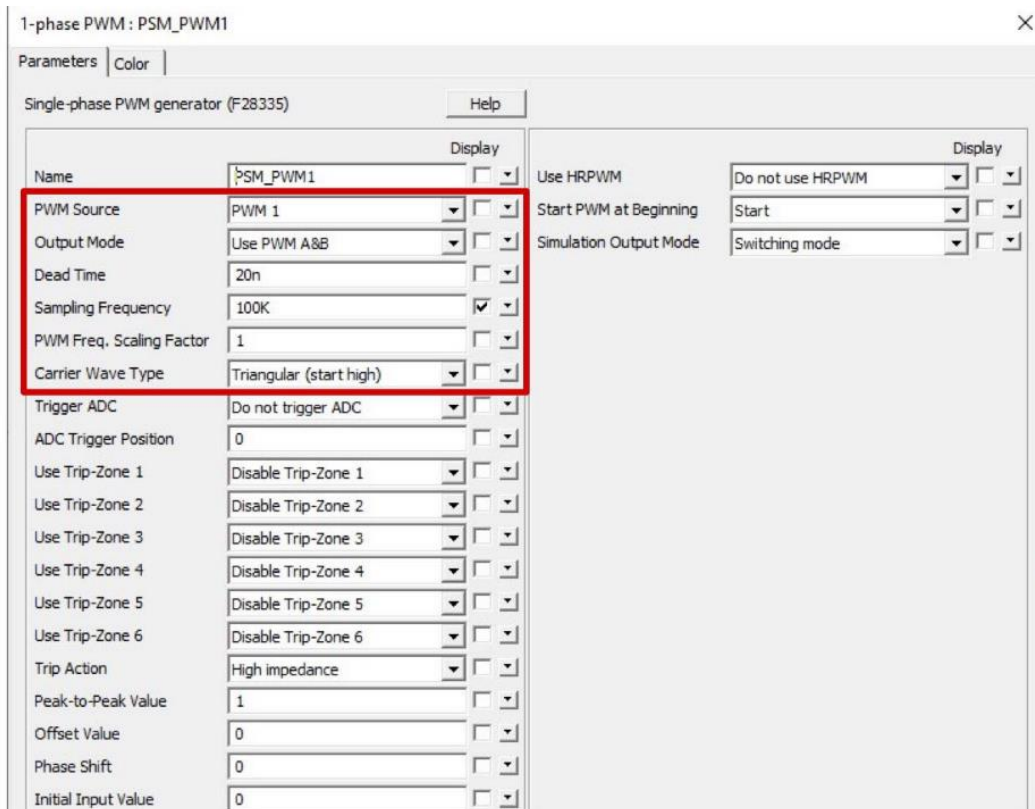


Figura 25: Bloque 1-ph PWM

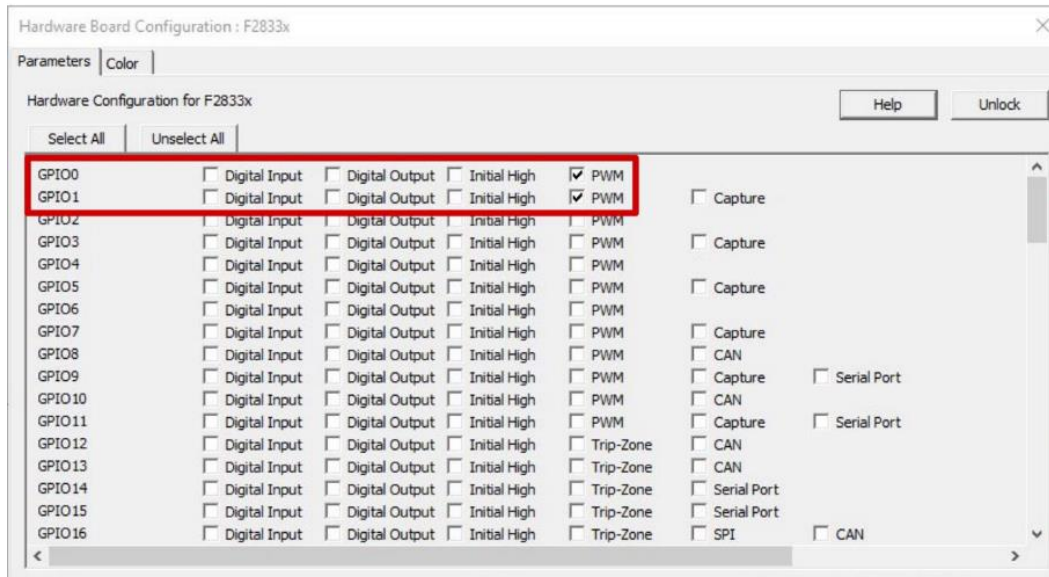


Figura 26: Bloque F28335 Board Config

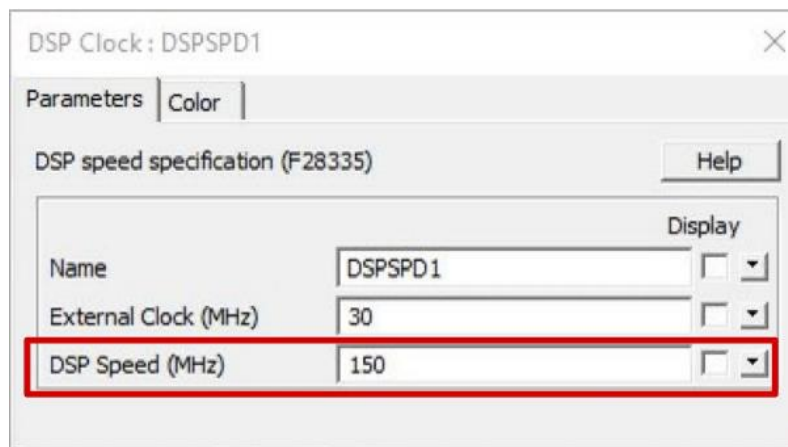


Figura 27: Bloque DSP Clock F28335

La señal PWM resultante es una señal de amplitud 3.3V, frecuencia de 100MHz, un duty del 60% y una señal complementaria con un duty del 40%. Ambas señales se observan en la Figura 28.



Figura 28: Señal PWM

La Figura 29 muestra el esquema del circuito de adquisición de señales analógicas mediante de los pines ADC del microcontrolador. Se utiliza el bloque *ADC F28335*, configurando los canales *A0* y *A1* como se muestra en la Figura 30. Las señales de entrada *V1* y *V2* provienen de fuentes de voltaje AC limitadas entre 0V y 3V, ya que el microcontrolador seleccionado solo acepta voltajes positivos dentro de ese rango. El bloque *DSP Clock F28335* se configura de la misma manera que se muestra en la Figura 27.

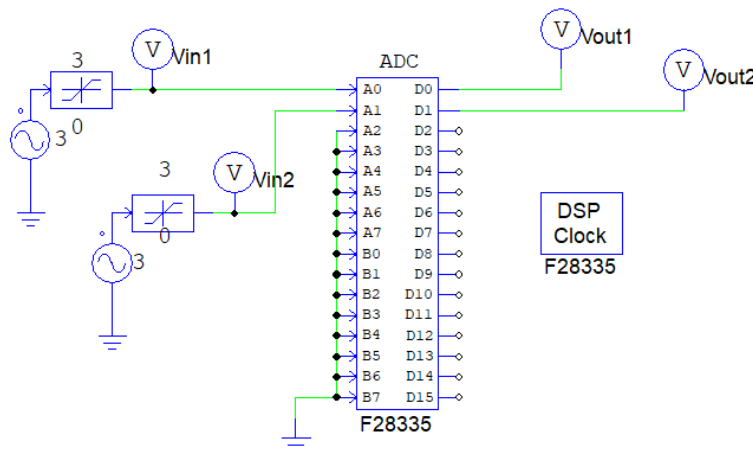


Figura 29: Circuito de adquisición de señales análogas

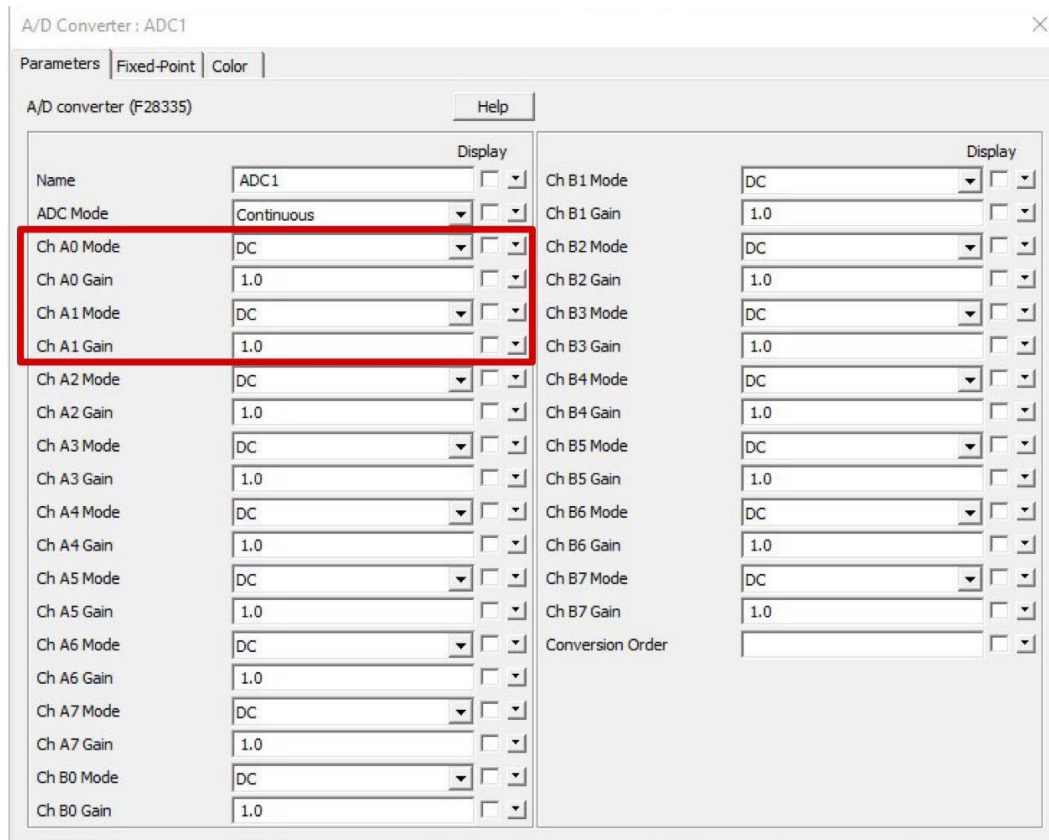


Figura 30: Bloque ADC F28335

Conexión final del convertidor DDB

La Figura 31 muestra la conexión final del convertidor DDB. A la salida del convertidor se conecta una carga resistiva de 100Ω. Los sensores de corriente y voltaje se conectan a la entrada del convertidor Boost clásico, los pines ADC del microcontrolador se conectan a las salidas de los sensores, y los pines PWM a la sección de control del convertidor.

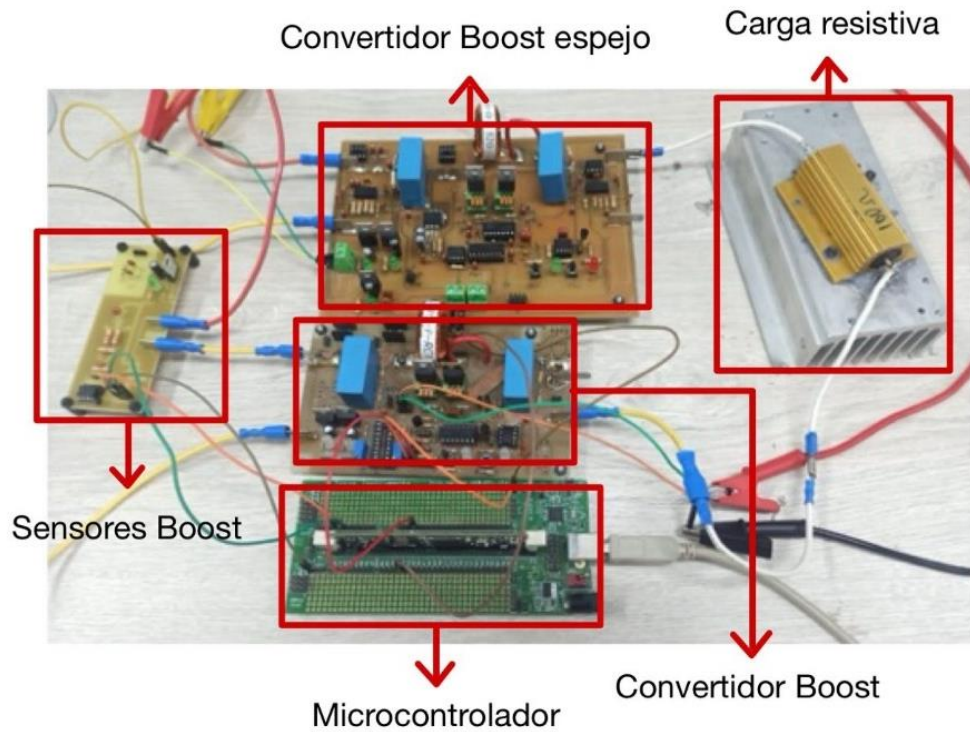


Figura 31: Conexión final del convertidor DDB.

4. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Pruebas de elevación de voltaje del convertidor DDB

Luego de realizar la construcción el convertidor DDB se realizó una primera prueba, usando un voltaje de entrada de 5V, un duty para el convertidor Boost clásico y Boost espejo del 30% y una carga resistiva de 100Ω para la salida. El voltaje de salida es 9.2V como se puede ver en el osciloscopio (Figura 32). El voltaje calculado de salida es de 9.28V, aproximadamente igual al voltaje obtenido en la prueba.

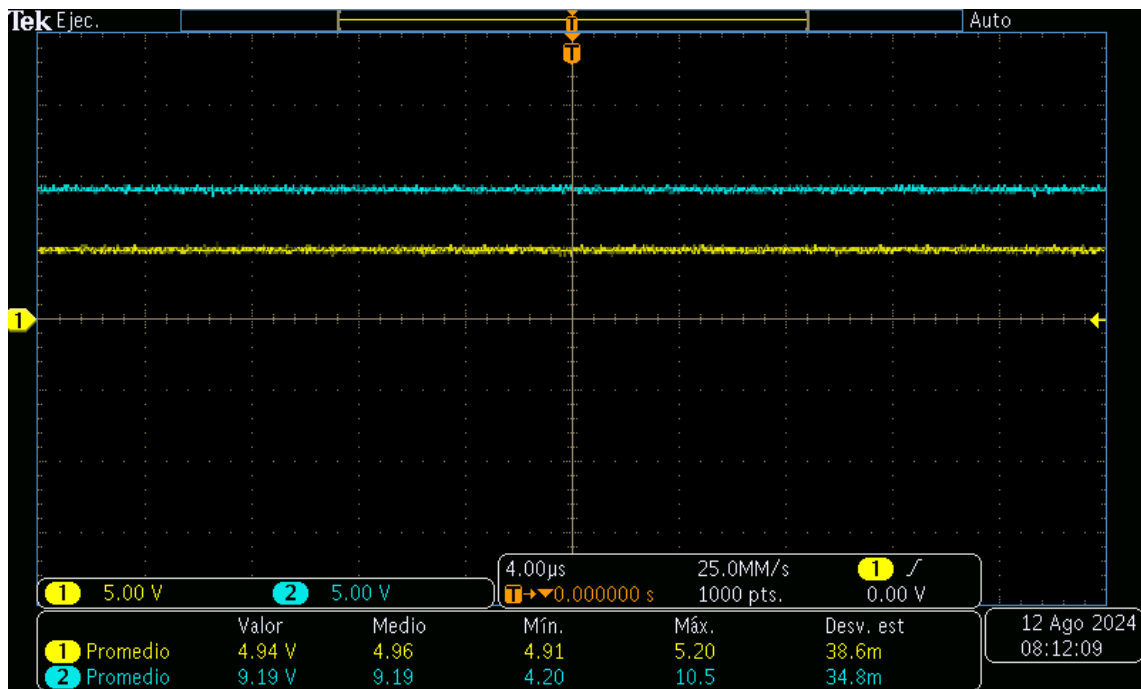


Figura 32: Voltaje de salida de 9.2V.

Para una segunda prueba, se dejó el mismo valor de la carga resistiva, del voltaje de entrada, y del duty del convertidor Boost clásico, y el duty del convertidor Boost espejo se fijó en 40%. El voltaje de salida es de 10.25V como se observa en el osciloscopio (Figura 33).

El voltaje calculado de salida es de 10.47V, aproximadamente igual al voltaje obtenido en la prueba.

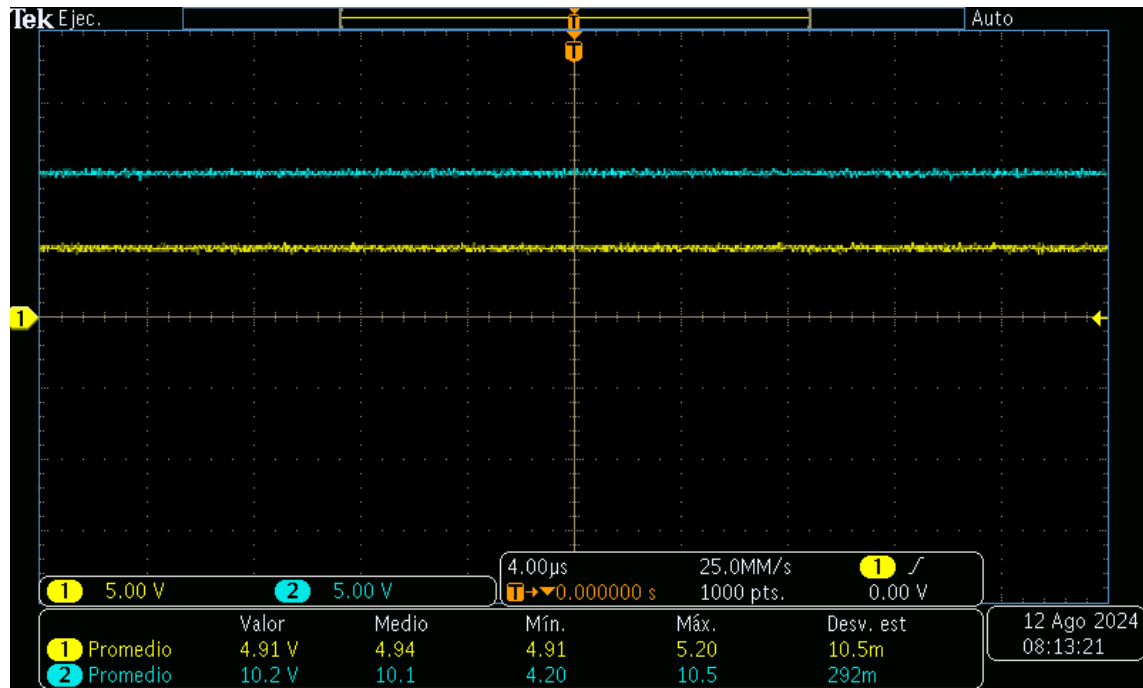


Figura 33: Voltaje de salida de 10.25V.

Con estas dos primeras pruebas comprobamos el funcionamiento del convertidor DDB a niveles bajos de tensión y de duty para los convertidores.

Para las siguientes pruebas solo se cambió el duty del convertidor Boost espejo, dejando fijo el voltaje de entrada en 5V, la carga resistiva en 100Ω y el duty del convertidor Boost clásico en 30%.

Con el duty al 50% se obtuvo un voltaje de salida de 11.84V (Figura 34) y el calculado fue de 12.14V. Con el duty al 60% se obtuvo un voltaje de salida de 14.25V (Figura 35) y el calculado fue de 14.64V. Con el duty al 70% se obtuvo un voltaje de salida de 18.1V (Figura 36) y el calculado fue de 18.8V. Con el duty al 80% se obtuvo un voltaje de salida de 25.2V (Figura 37) y el calculado fue de 27.14V.

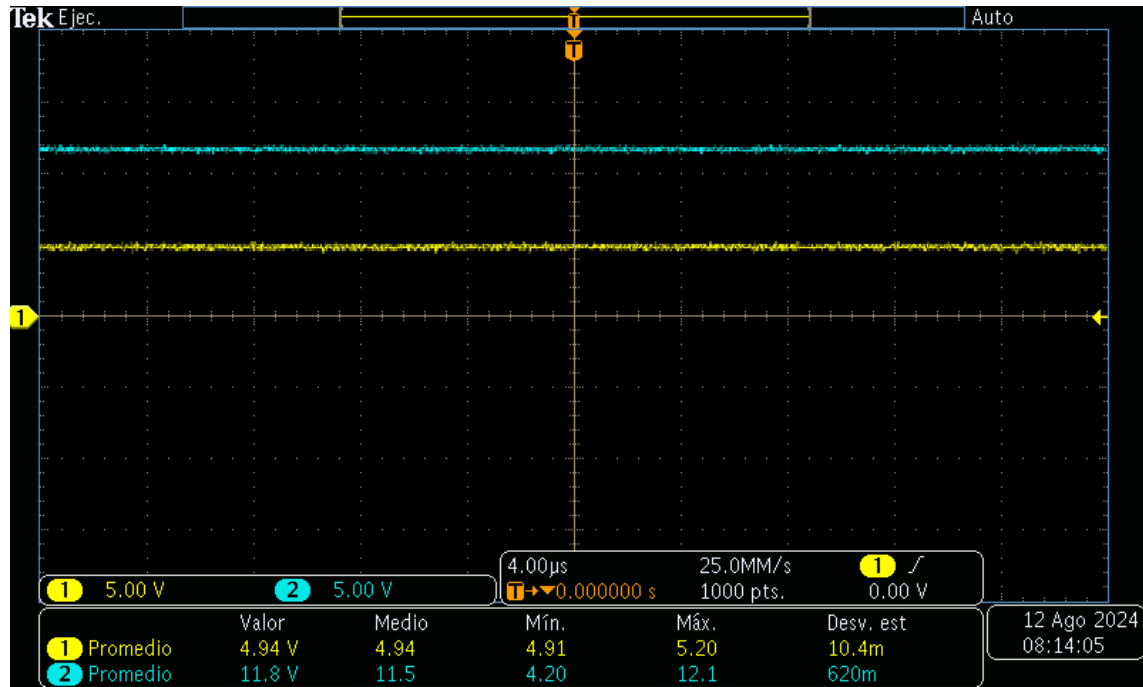


Figura 34: Voltaje de salida de 11.84V con duty al 50%.

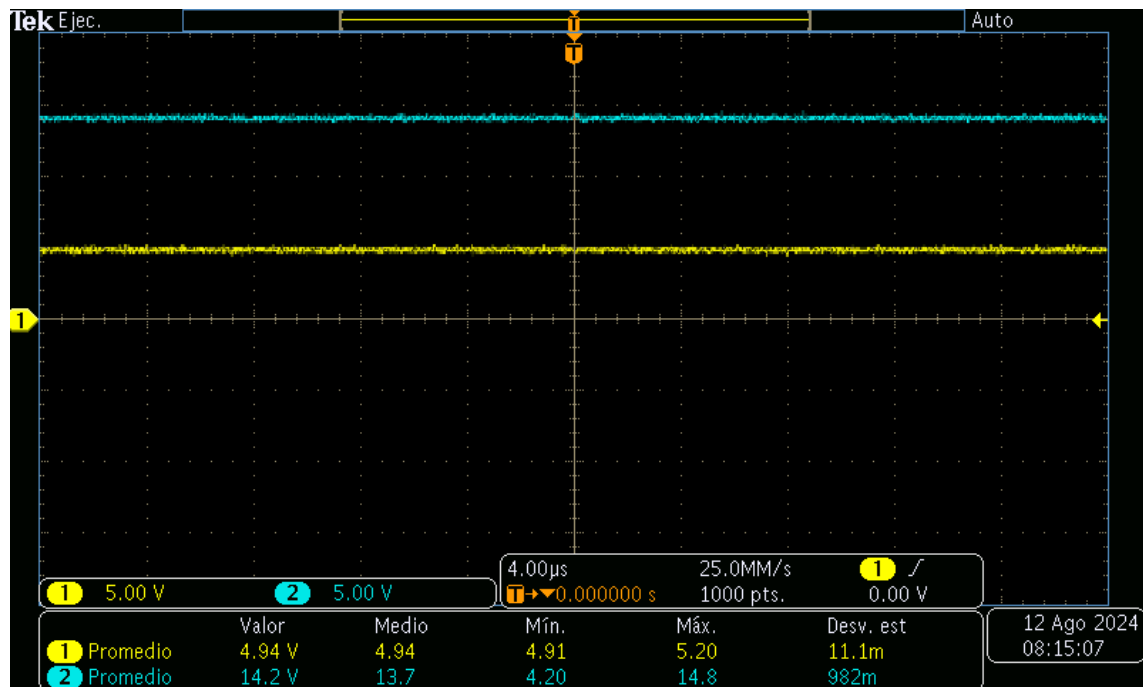


Figura 35: Voltaje de salida de 14.25V con duty al 60%.

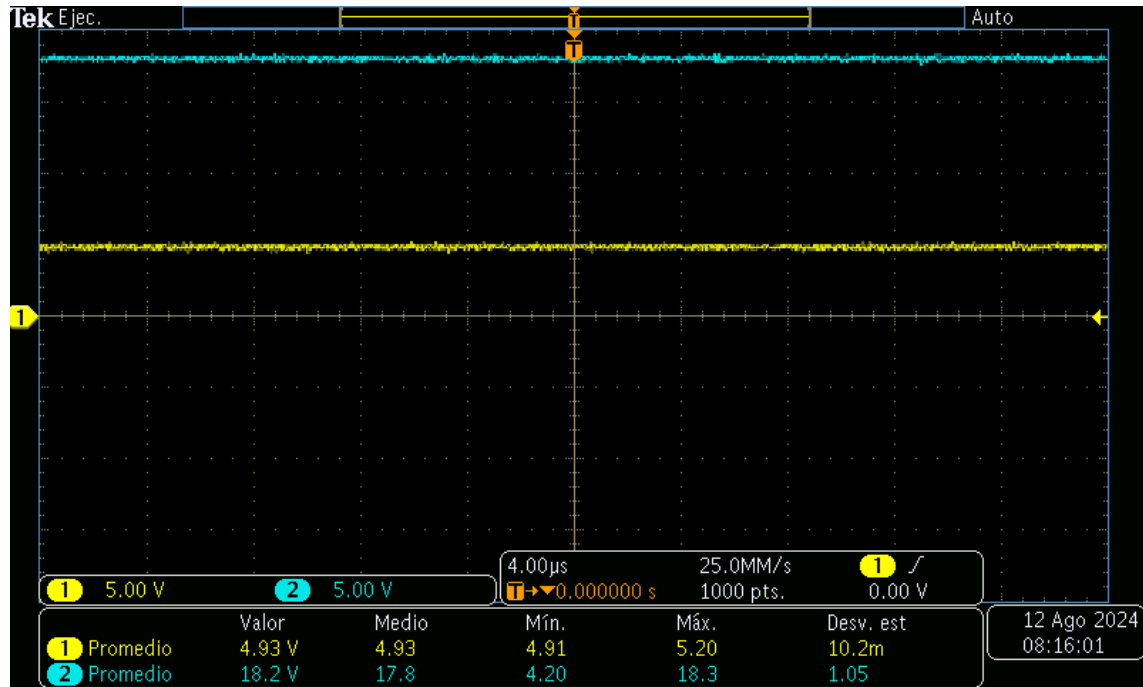


Figura 36: Voltaje de salida de 18.1V con duty al 70%.

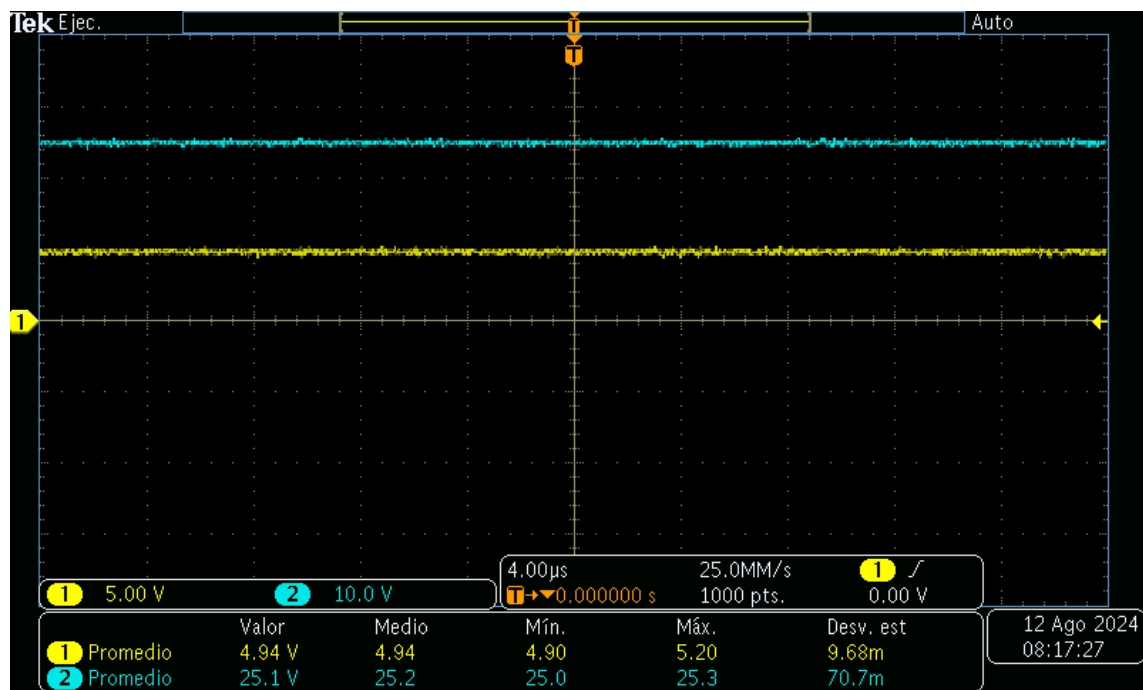


Figura 37: Voltaje de salida de 25.2V con duty al 80%.

En estas cuatro pruebas se observó que el convertidor DDB tiene un comportamiento correcto durante el cambio en la elevación de voltaje de salida del convertidor Boost espejo.

Para una siguiente prueba se mantuvo el voltaje de entrada en 5V y la carga resistiva en 100Ω , el duty de ambos convertidores se fijó en 50%. El voltaje de salida es de 15.2V (Figura 38), aproximadamente igual al voltaje de salida calculado que es de 15V.

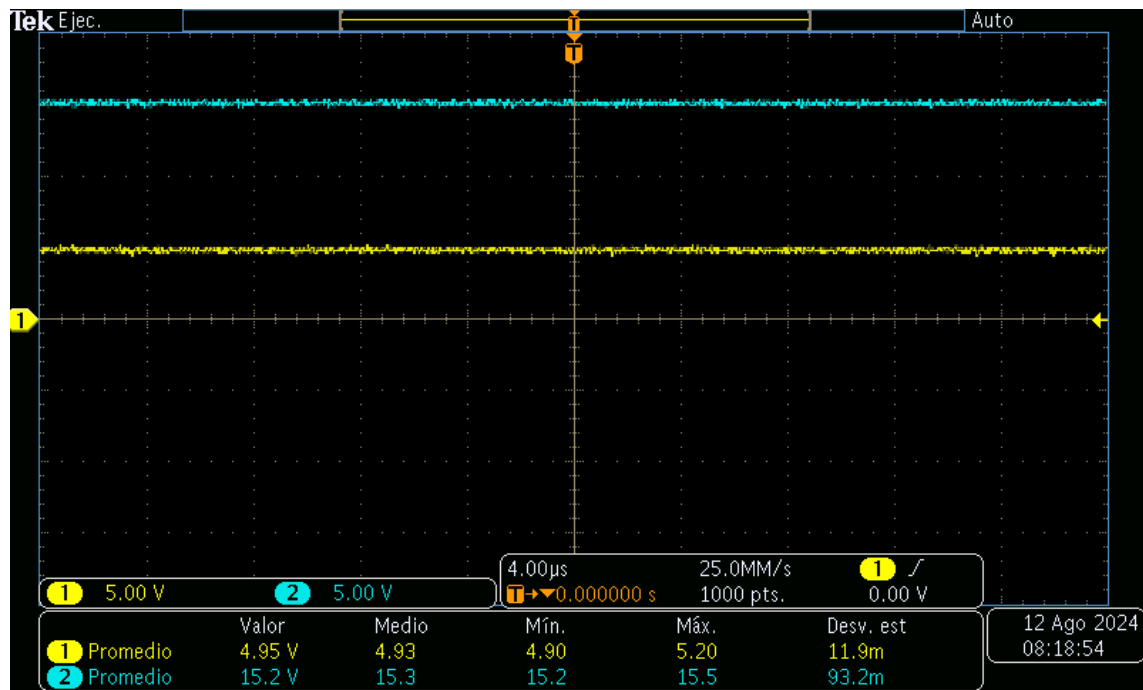


Figura 38: Voltaje de salida de 15.2V.

La prueba que supone el mayor voltaje a la salida obtenido se realizó manteniendo el mismo voltaje de entrada de 5V, la carga resistiva de 100Ω , el duty del convertidor Boost clásico en 50% y el del convertidor Boost espejo en 80%.

El voltaje de salida obtenido en esta prueba es de 30V como se observa en el osciloscopio (Figura 39). Este voltaje concuerda con el voltaje teórico, y refleja una elevación del voltaje de entrada del 600%.

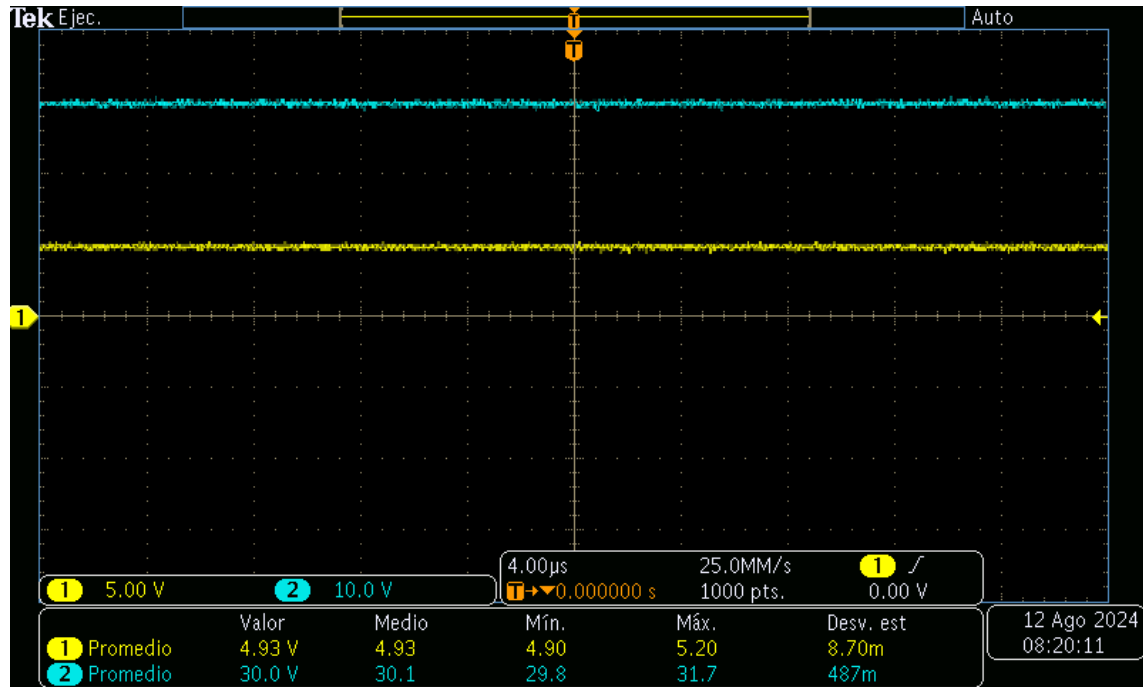


Figura 39: Voltaje de salida de 30V.

Con esta prueba se observó que el convertidor DDB eleva el voltaje de manera adecuada, de acuerdo con la ecuación [2], cuando se le exige una alta elevación de voltaje a la salida con respecto a la entrada.

Se realizaron más pruebas de laboratorio aumentando el duty del convertidor Boost clásico por encima del 50% en las cuales no se obtuvo éxito. Una vez el convertidor DDB se enciende, el convertidor Boost clásico entra en corto, mostrando 0V en el voltaje de salida.

Pruebas del rizado en la corriente de entrada

Con el fin de comparar la reducción del rizado en la corriente de entrada del convertidor DDB con respecto al convertidor Boost clásico, se realizó en ambos convertidores una

prueba para medir el rizado, en la que se implementó un voltaje de 5V a la entrada y una carga resistiva de 100Ω a la salida.

En el osciloscopio (Figura 40) se observa el rizado de la corriente de entrada del convertidor Boost clásico, que es de aproximadamente 5.8mA.

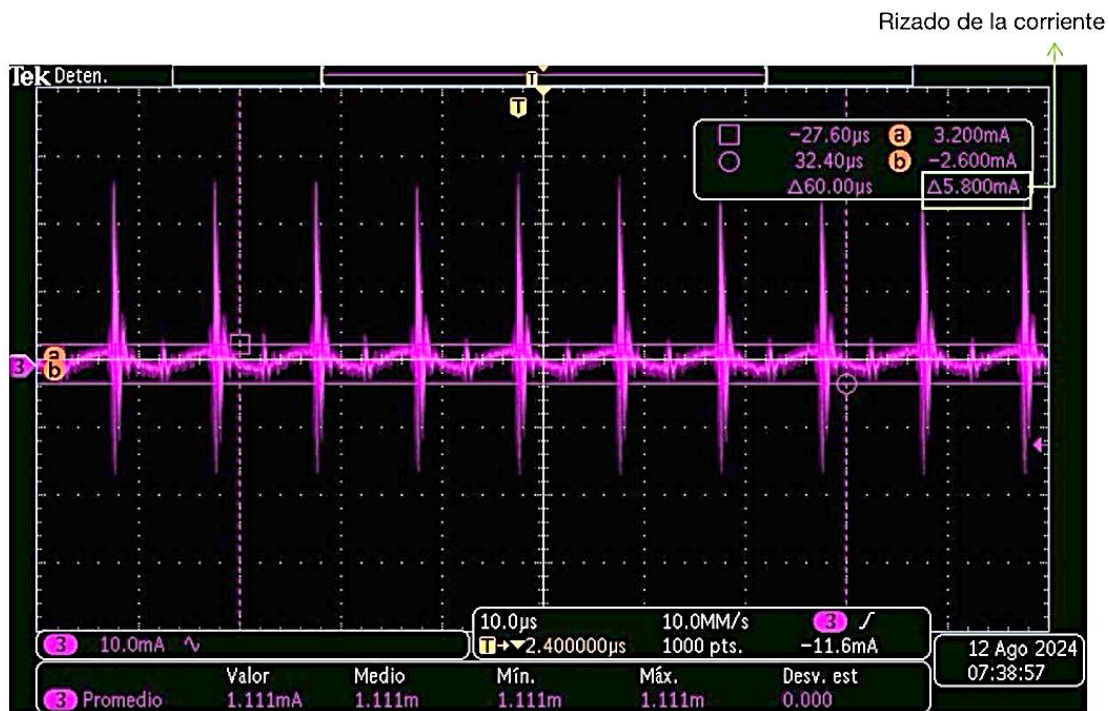


Figura 40: Rizado de la corriente de entrada del convertidor Boost clásico

Posteriormente, en el software MATLAB se aplicó un filtro pasa bajas a la corriente para poder observar el rizado de manera más precisa. En la Figura 41, se muestra la señal original en color azul y la señal filtrada en color rojo.

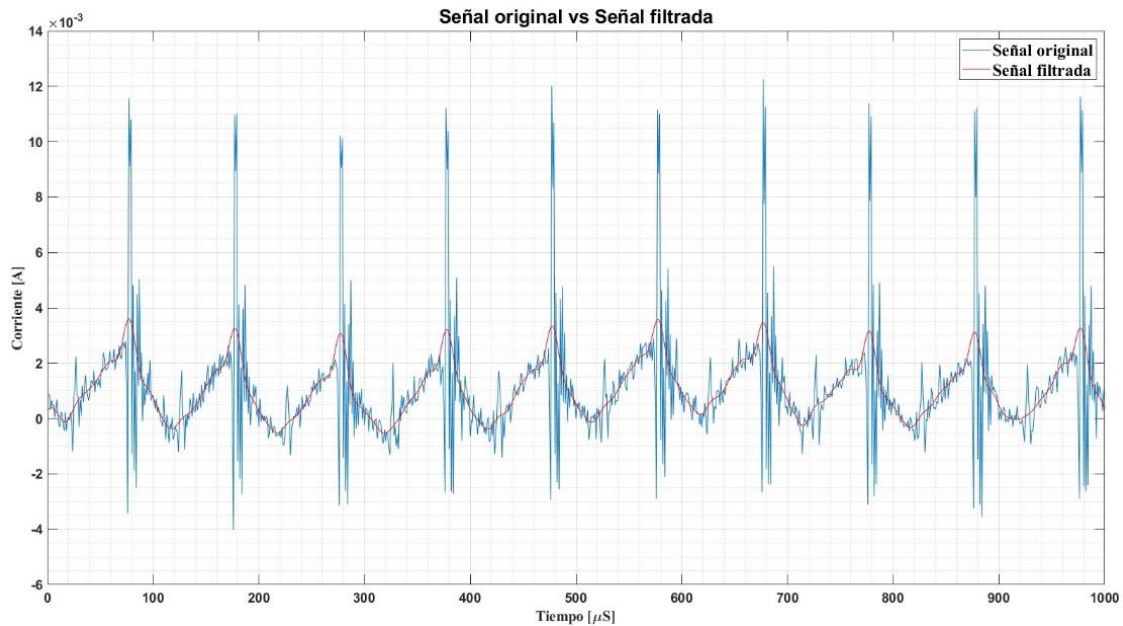


Figura 41: Filtro pasa bajas de la corriente del Boost clásico

Por otro lado, en la Figura 42 se observa el rizado en la corriente de entrada del convertidor DDB, que es aproximadamente de 2.4mA.

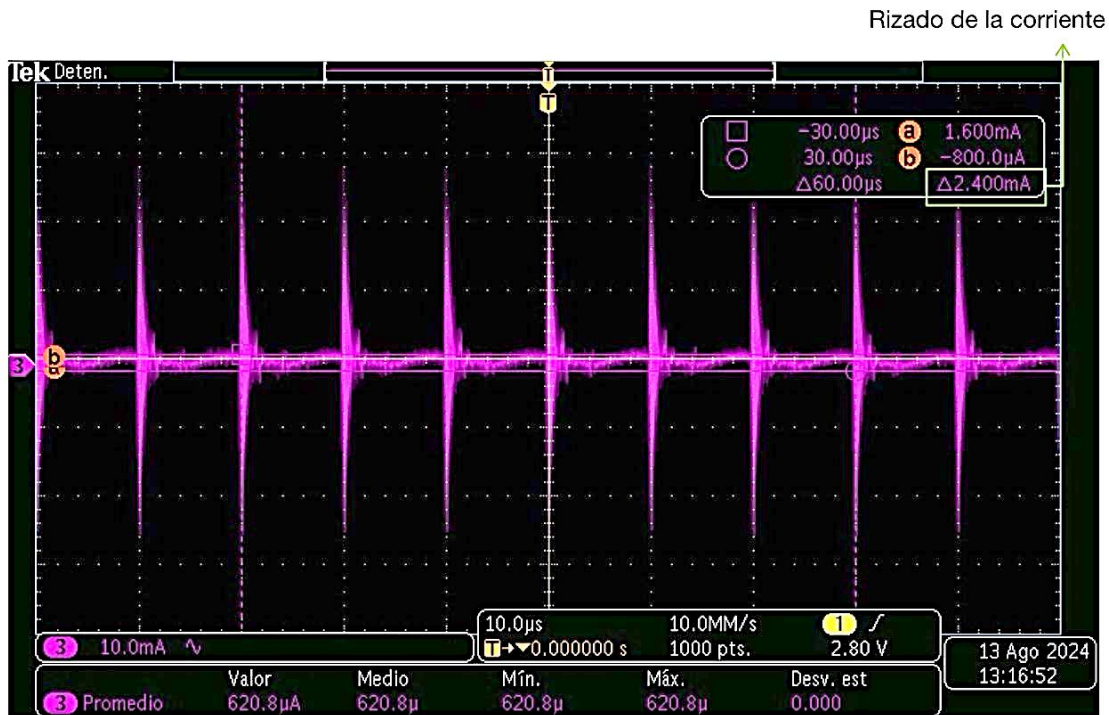


Figura 42: Rizado de la corriente de entrada del convertidor DDB

También se le aplicó un filtro pasa bajas en MATLAB como se observa en la Figura 43, de color azul se encuentra la señal original y de color rojo la señal filtrada.

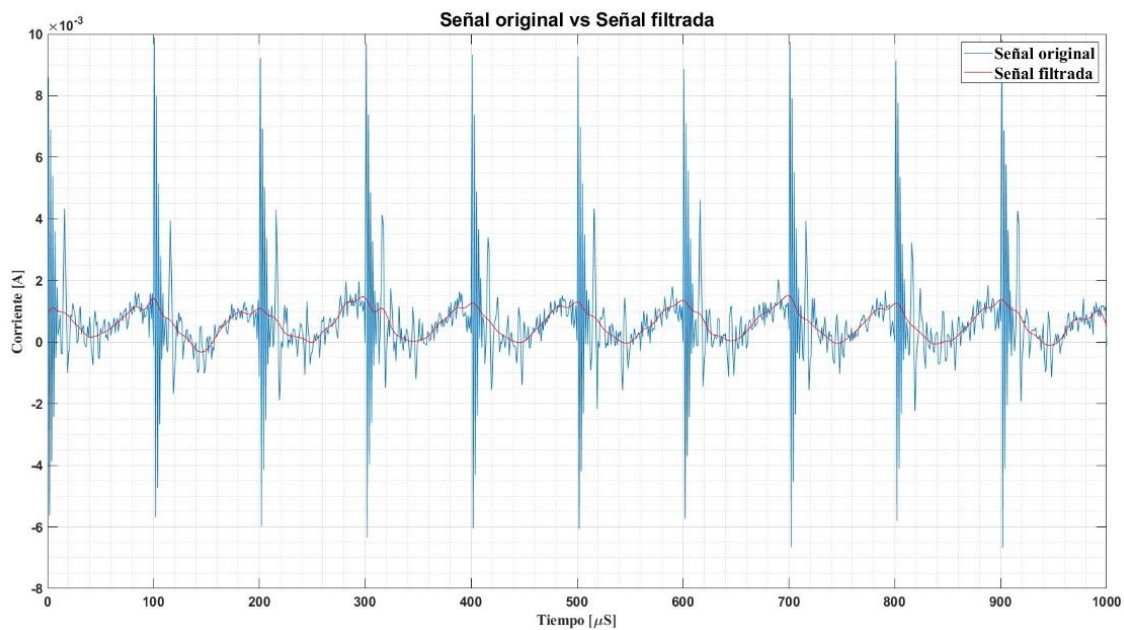


Figura 43: Filtro pasa bajas de la corriente del DDBC

Finalmente, en la Figura 44 se muestra una comparación entre las corrientes filtradas de los dos convertidores. La corriente del convertidor Boost está representada en color azul, mientras que la corriente del convertidor DDB está en color rojo.

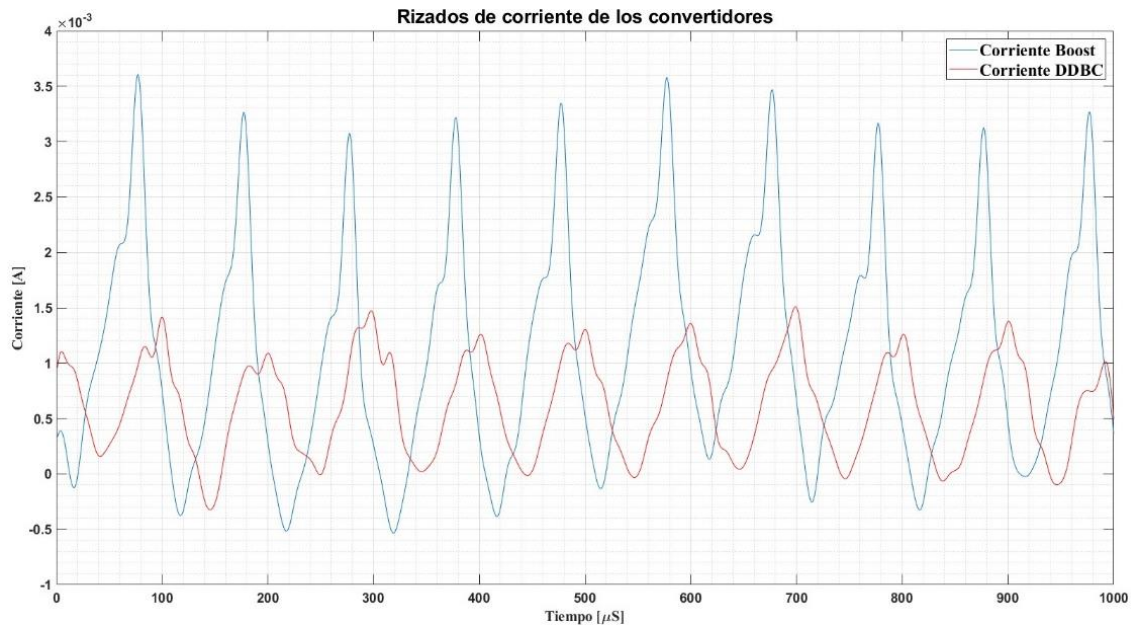


Figura 44: Comparación de las corrientes filtradas de los dos convertidores

Al comparar la Figura 44 y los valores mencionados anteriormente de los rizados en las corrientes de entrada de cada convertidor, se observa claramente que el rizado es menor en el convertidor DDB que en el convertidor Boost.

Pruebas de eficiencia en la transferencia de potencia

Finalmente, se realizaron pruebas para comparar la eficiencia en la transferencia de potencia de los convertidores Boost y DDB. Primero, se realizaron tres pruebas para identificar el punto de operación de mayor transferencia de potencia del convertidor DDB. La eficiencia de los convertidores se puede evaluar usando la siguiente ecuación, donde η es la eficiencia, P_{out} la potencia de salida y P_{in} la potencia de entrada:

	INFORME FINAL DE TRABAJO DE GRADO	Código	FDE 089
		Versión	03
		Fecha	2015-01-22

$$\eta = \frac{P_{out}}{P_{in}} \quad [3]$$

Tabla 2: Pruebas de eficiencia del convertidor DDB

PRUEBA	DUTY	RL (Ω)	Pin (W)	Pout (W)	EFICIENCIA
1	35%	100Ω	61	52,7	86%
2	40%	50Ω	76,6	63,2	83%
3	40%	40Ω	53	47,7	89%

La Tabla 2 los resultados de las pruebas realizadas, destacando que la prueba #3 es la que presenta la mayor eficiencia en la transferencia de potencia del convertidor DDB.

En la Figura 45 se observan las señales de voltaje (amarillo), corriente (morado) y potencia (naranja) de entrada del convertidor DDB durante esta prueba, evidenciando una potencia de entrada de 53W.

En la Figura 46 se presentan las señales de voltaje (amarillo), corriente (azul) y potencia (rojo) de salida del convertidor DDB, donde se muestra que la potencia de salida es de 47.7W.

Finalmente, utilizando la ecuación [3], la eficiencia del convertidor en esta prueba se calcula en un 89%.

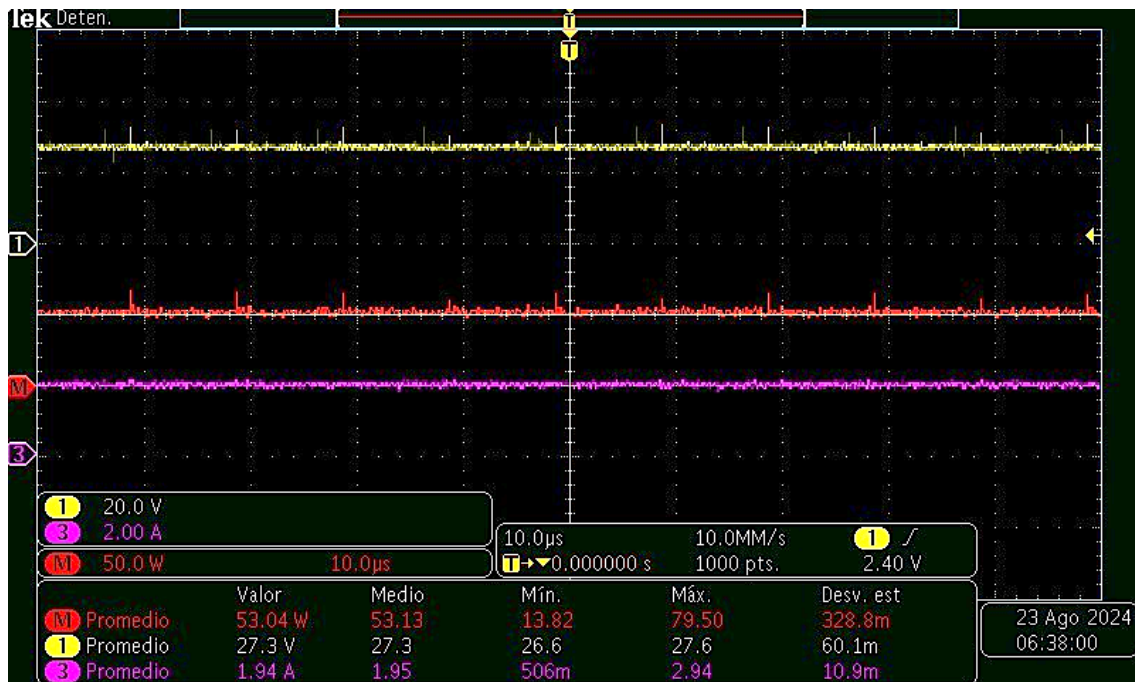


Figura 45: Voltaje, corriente y potencia de entrada del DDB

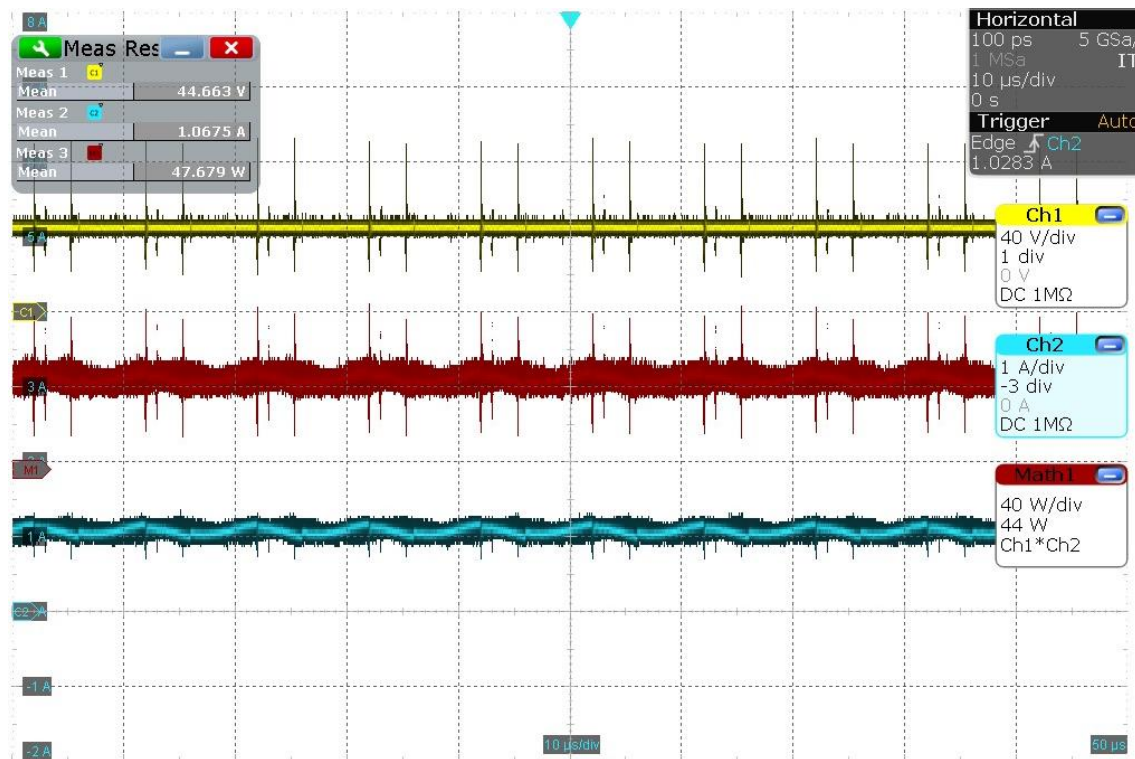


Figura 46: Voltaje, corriente y potencia de salida del DDB

A continuación, se realiza una prueba en el convertidor Boost con el objetivo de igualar la elevación de voltaje lograda en la prueba #3 del convertidor DDB. Para ello, se utiliza un voltaje de entrada de 27V y se intenta obtener un voltaje de salida de aproximadamente 45V. Sin embargo, al variar el duty hasta el 70%, el convertidor solo eleva el voltaje de 27V a 33V.

En las Figuras 47 y 48 se muestran las señales de voltaje, corriente y potencia de entrada y salida del convertidor Boost. Utilizando la ecuación [3], y con una potencia de entrada de 37.7W y una potencia de salida de 25.7W, se calcula que la eficiencia del convertidor Boost para esta prueba es del 68%.

Estos resultados demuestran que el convertidor DDB es más eficiente en la transferencia de potencia que el convertidor Boost clásico."

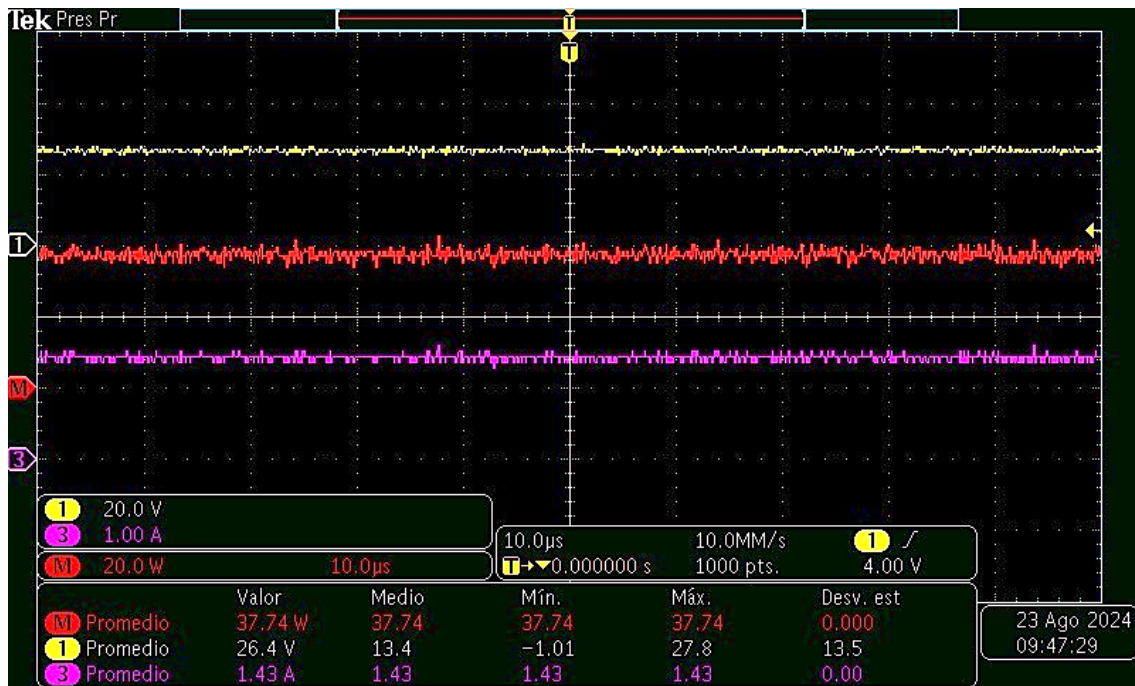


Figura 47: Voltaje, corriente y potencia de entrada del Boost

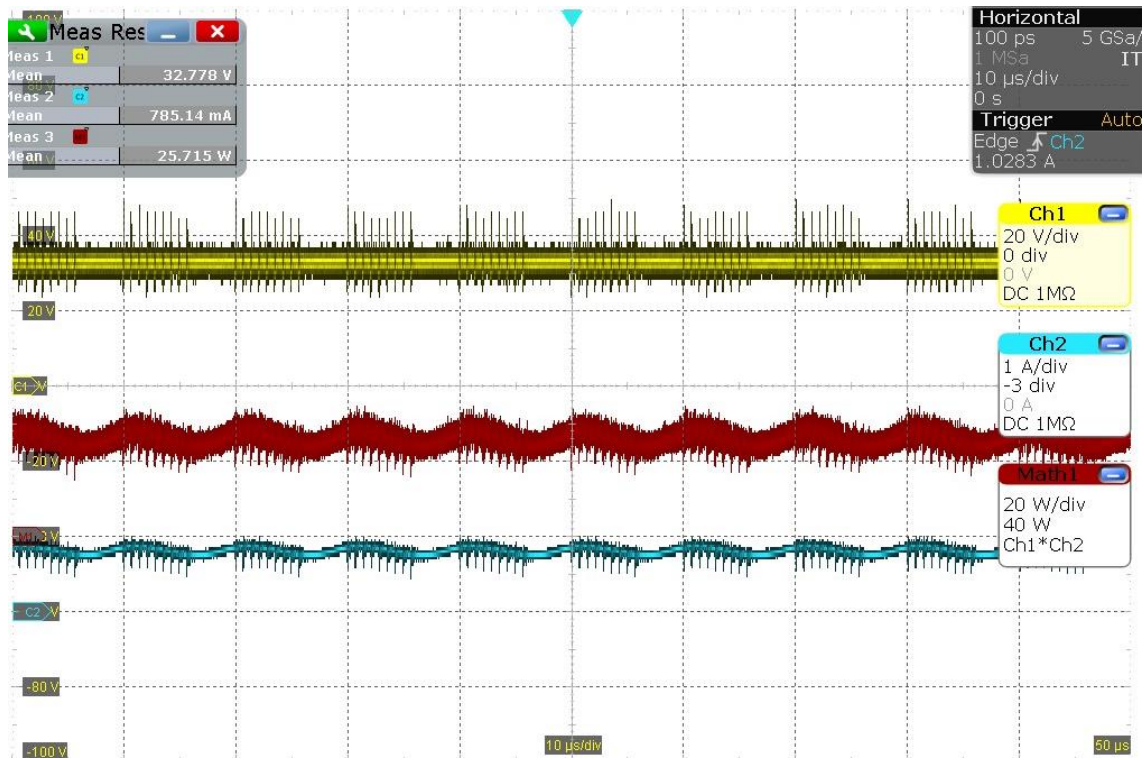


Figura 48: Voltaje, corriente y potencia de salida del Boost

	INFORME FINAL DE TRABAJO DE GRADO	Código	FDE 089
		Versión	03
		Fecha	2015-01-22

5. CONCLUSIONES, RECOMENDACIONES Y TRABAJO FUTURO

En este trabajo se implementó un convertidor DDB en lazo abierto para aplicaciones PV, que está compuesto por un convertidor Boost clásico y un convertidor Boost espejo, con el fin de verificar su eficiencia a la hora de elevar el voltaje a la salida con respecto a la entrada. Adicionalmente se implementaron circuitos de acondicionamiento de señal para el convertidor DDB para ser visualizadas en un software especializado, y por medio de una DSP se enviaron señales PWM al convertidor DDB.

Conclusiones

1. Tras la construcción e implementación del convertidor DDB en lazo abierto, se verificó su funcionamiento y su buena capacidad en el aumento de voltaje, logrando una elevación de hasta un 600% a la salida con respecto a la entrada. Sin embargo, no fue posible probar la capacidad máxima del convertidor DDB, ya que el convertidor Boost clásico comenzó a presentar fallas a medida que se le exigía una mayor elevación de voltaje, operando solo hasta un duty del 50% antes de colapsar.

Cuando el convertidor Boost está conectado al convertidor DDB, el circuito Bootstrap del driver *IR2110* del convertidor Boost es sometido a un nivel de tensión superior al que puede operar, debido a que la tierra del convertidor Boost está aislada de la del DDB. Para corregir este problema en el futuro, se podría considerar utilizar un driver diferente que permita que el circuito Bootstrap opere a un mayor nivel de tensión de manera segura.

	INFORME FINAL DE TRABAJO DE GRADO	Código	FDE 089
		Versión	03
		Fecha	2015-01-22

Adicionalmente, se comprobó la reducción del rizado en la corriente de entrada del convertidor DDB y una mayor eficiencia en la transferencia de potencia en comparación con un convertidor Boost clásico.

2. La implementación de los circuitos de acondicionamiento de señal permite un seguimiento y análisis adecuado de las variables de voltaje y corriente del convertidor DDB, con el objetivo de, en el futuro, implementar una técnica de control sobre el convertidor. Adicionalmente, los sensores seleccionados proporcionan aislamiento en la medición, lo que permite proteger la etapa de control de la etapa de potencia.

3. La implementación de una DSP en el sistema para generar señales PWM ofrece flexibilidad y una respuesta rápida, permitiendo ajustar dinámicamente diferentes parámetros de la señal, como la frecuencia o el ciclo de trabajo. Además, al poder leer variables analógicas provenientes del convertidor, es posible implementar técnicas de control que modifiquen la señal PWM.

4. Al operar el convertidor DDB en diferentes puntos de funcionamiento, se concluye que es apto para aplicaciones PV. Al disminuir el rizado de la corriente de entrada, se prolonga la vida útil del panel y se optimiza la extracción de energía al mantener la operación cerca del punto de máxima potencia. Además, ofrece una mayor eficiencia en la conversión de potencia en comparación con un convertidor Boost clásico.

	INFORME FINAL DE TRABAJO DE GRADO	Código	FDE 089
		Versión	03
		Fecha	2015-01-22

Recomendaciones

1. Realizar más pruebas de laboratorio llevando cada uno de los convertidores a su punto máximo y mínimo con el fin de conocer sus correctos puntos de operación y evitar inconsistencias en el funcionamiento del sistema.
2. Realizar pruebas de laboratorio utilizando un voltaje de potencia de alrededor 12V simulando así el voltaje que entrega un panel fotovoltaico.
3. Revisar a fondo el funcionamiento del convertidor Boost clásico con el fin de saber la causa de su colapso en el funcionamiento del convertidor DDB.

Trabajo futuro

1. Implementar el convertidor DDB en aplicaciones PV reales, con un panel fotovoltaico en la entrada y un bus DC o diferentes cargas a la salida y observar su funcionamiento.
2. Implementar diferentes técnicas de control con base a las señales de voltaje y corriente de cada uno de los convertidores variando el duty del PWM.
3. Diseñar y fabricar en una misma tarjeta el convertidor DDB, incluyendo el convertidor Boost clásico y Boost espejo, los circuitos de acondicionamiento de señal y demás sistemas que se consideren necesarios.

	INFORME FINAL DE TRABAJO DE GRADO	Código	FDE 089
		Versión	03
		Fecha	2015-01-22

REFERENCIAS

- Allegro MicroSystems. (2024). *Fully Integrated, Hall-Effect-Based Linear Current Sensor IC with 2.4 kVRMS Isolation and a Low-Resistance Current Conductor*.
- Alzahrani, A., Ferdowsi, M., Shamsi, P., & Dagli, C. H. (2017). Modeling and Simulation of Microgrid. *Procedia Computer Science*, 114, 392–400.
<https://doi.org/10.1016/j.procs.2017.09.053>
- Ansari, S., Chandel, A., & Tariq, M. (2021). A Comprehensive Review on Power Converters Control and Control Strategies of AC/DC Microgrid. *IEEE Access*, 9, 17998–18015.
<https://doi.org/10.1109/ACCESS.2020.3020035>
- Arizaga-Ayala, F. J., Ramirez, J. M., & Rosas-Caro, J. C. (2021). Estudio del Convertidor CD-CD Double Dual Boost con Control de Bidireccionalidad. *Identidad Enegetica*, 6.
- Barragán, R. (2020). *LA GENERACIÓN DE ENERGÍA ELÉCTRICA PARA EL DESARROLLO INDUSTRIAL EN EL ECUADOR A PARTIR DEL USO DE LAS ENERGÍAS RENOVABLES*. Universidad Internacional SEK.
- BROADCOM. (2017). *ACNT-H87B, ACNT-H87A, ACNT-H870 Precision Optically Isolated Voltage Sensor in a 15-mm Stretched SO-8 Package*.
- Cobacango, M. (2022). *Cambio climático, energías renovables y minería: una lectura desde el ecomarxismo*. Universidad Andina Simón Bolívar.
- El-Shahat, A., & Sumaiya, S. (2019). DC-Microgrid System Design, Control, and Analysis. *Electronics*, 8(2), 124. <https://doi.org/10.3390/electronics8020124>
- Henao-Bravo, E. E., Ramos-Paja, C. A., & Villegas-Ceballos, J. P. (2021). A Double Dual Boost Converter with High Gain and Ripple Cancellation for PV Systems. *2021 IEEE 5th Colombian Conference on Automatic Control (CCAC)*, 49–55.
<https://doi.org/10.1109/CCAC51819.2021.9633323>
- Hernández, Y. (2020). Cambio climático: Causas y Consecuencias. *RenovaT*, 4(1), 38–53.
- Iskender, I., & Genc, N. (2020). *Power Electronic Converters in DC Microgrid* (pp. 115–137).
https://doi.org/10.1007/978-3-030-23723-3_6
- Jirdehi, M. A., Tabar, V. S., Ghassemzadeh, S., & Tohidi, S. (2020). Different aspects of microgrid management: A comprehensive review. *Journal of Energy Storage*, 30, 101457.
<https://doi.org/10.1016/j.est.2020.101457>

 Institución Universitaria	INFORME FINAL DE TRABAJO DE GRADO	Código	FDE 089
		Versión	03
		Fecha	2015-01-22

- Jithin, K., Purayil Haridev, P., Mayadevi, N., Pillai Harikumar, R., & Prabhakaran Mini, V. (2023). A Review on Challenges in DC Microgrid Planning and Implementation. *Journal of Modern Power Systems and Clean Energy*, 11(4), 1375–1395. <https://doi.org/10.35833/MPCE.2022.000053>
- Jotham Jeremy, L., Ooi, C. A., & Teh, J. (2020). Non-isolated conventional DC-DC converter comparison for a photovoltaic system: A review. *Journal of Renewable and Sustainable Energy*, 12(1). <https://doi.org/10.1063/1.5095811>
- Kumar, J., Agarwal, A., & Singh, N. (2020). Design, operation and control of a vast DC microgrid for integration of renewable energy sources. *Renewable Energy Focus*, 34, 17–36. <https://doi.org/10.1016/j.ref.2020.05.001>
- Li, W., & He, X. (2011). Review of Nonisolated High-Step-Up DC/DC Converters in Photovoltaic Grid-Connected Applications. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, 58(4), 1239–1250. <https://doi.org/10.1109/TIE.2010.2049715>
- Lima, G. A. M. de, Souza, V. O., & Lopes, R. S. (2022). Tecnologias emergentes para produção de células solares fotovoltaicas: uma revisão. *Research, Society and Development*, 11(17), e139111736068. <https://doi.org/10.33448/rsd-v11i17.36068>
- Maka, A. O. M., & Alabid, J. M. (2022). Solar energy technology and its roles in sustainable development. *Clean Energy*, 6(3), 476–483. <https://doi.org/10.1093/ce/zkac023>
- Mondal, S., Biswas, S. P., & Nahin, N. I. (2022). Advanced Switching Sequences for a Multiphase Interleaved DC-DC Boost Converter Using TMS320F28335 DSP Control Card. *2022 12th International Conference on Electrical and Computer Engineering (ICECE)*, 296–299. <https://doi.org/10.1109/ICECE57408.2022.10088612>
- Nguyen, M. H., & Kwak, S. (2020). Enhance Reliability of Semiconductor Devices in Power Converters. *Electronics*, 9(12), 2068. <https://doi.org/10.3390/electronics9122068>
- Olabi, A. G., Onumaegbu, C., Wilberforce, T., Ramadan, M., Abdelkareem, M. A., & Al – Alami, A. H. (2021). Critical review of energy storage systems. *Energy*, 214, 118987. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2020.118987>
- Özer, T., Oğuz, Y., & Çimen, H. (2017). Energy Flow Control with Using Arduino Microcontroller in Off-Grid Hybrid Power Generation System Including Different Solar Panels and Fuel Cell. *Measurement and Control*, 50(9–10), 186–198. <https://doi.org/10.1177/0020294017729957>
- Paez, J. D., Frey, D., Maneiro, J., Bacha, S., & Dworakowski, P. (2019). Overview of DC–DC Converters Dedicated to HVdc Grids. *IEEE Transactions on Power Delivery*, 34(1), 119–128. <https://doi.org/10.1109/TPWRD.2018.2846408>

	INFORME FINAL DE TRABAJO DE GRADO	Código	FDE 089
		Versión	03
		Fecha	2015-01-22

- Patil, A. (2022). A Review Paper on Solar Energy-Generated Electricity. *International Journal for Research in Applied Science and Engineering Technology*, 10(6), 2905–2910.
<https://doi.org/10.22214/ijraset.2022.44369>
- Rabaia, M. K. H., Abdelkareem, M. A., Sayed, E. T., Elsaid, K., Chae, K.-J., Wilberforce, T., & Olabi, A. G. (2021). Environmental impacts of solar energy systems: A review. *Science of The Total Environment*, 754, 141989. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2020.141989>
- Raza, W., Ali, F., Raza, N., Luo, Y., Kim, K.-H., Yang, J., Kumar, S., Mehmood, A., & Kwon, E. E. (2018). Recent advancements in supercapacitor technology. *Nano Energy*, 52, 441–473.
<https://doi.org/10.1016/j.nanoen.2018.08.013>
- Samanta, S., & Rathore, A. K. (2018). A New Inductive Power Transfer Topology Using Direct AC–AC Converter With Active Source Current Waveshaping. *IEEE Transactions on Power Electronics*, 33(7), 5565–5577. <https://doi.org/10.1109/TPEL.2017.2750081>
- Sampaio, P. G. V., & González, M. O. A. (2017). Photovoltaic solar energy: Conceptual framework. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 74, 590–601.
<https://doi.org/10.1016/j.rser.2017.02.081>
- Sayed, E., Olabi, A., Alami, A., Radwan, A., Mdallal, A., Rezk, A., & Abdelkareem, M. (2023). Renewable Energy and Energy Storage Systems. *Energies*, 16(3), 1415.
<https://doi.org/10.3390/en16031415>
- Shuvo, S., Hossain, E., & Khan, Z. R. (2020). Fixed Point Implementation of Grid Tied Inverter in Digital Signal Processing Controller. *IEEE Access*, 8, 89215–89227.
<https://doi.org/10.1109/ACCESS.2020.2993985>
- Twidell, J. (2021). *Renewable Energy Resources*. Routledge.
<https://doi.org/10.4324/9780429452161>
- Valderrama, F., Moreno, H., & Vega, H. (2013). Análisis, simulación y control de un convertidor de potencia DC- DC tipo boost. *INGENIUM*, 12(24), 44–55.
- Valdez-Resendiz, J. E., Mayo-Maldonado, J. C., Alejo-Reyes, A., & Rosas-Caro, J. C. (2023). Double-Dual DC-DC Conversion: A Survey of Contributions, Generalization, and Systematic Generation of New Topologies. *IEEE Access*, 11, 38913–38928.
<https://doi.org/10.1109/ACCESS.2023.3268230>
- Vázquez, N., & Vaquero, J. (2024). Inverters. In *Power Electronics Handbook* (pp. 293–343). Elsevier. <https://doi.org/10.1016/B978-0-323-99216-9.00001-9>

 Institución Universitaria	INFORME FINAL DE TRABAJO DE GRADO	Código	FDE 089
		Versión	03
		Fecha	2015-01-22


Yang, Y., Bremner, S., Menictas, C., & Kay, M. (2018). Battery energy storage system size determination in renewable energy systems: A review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 91, 109–125. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2018.03.047>

Yodwong, B., Guilbert, D., Phattanasak, M., Kaewmanee, W., Hinaje, M., & Vitale, G. (2020). AC-DC Converters for Electrolyzer Applications: State of the Art and Future Challenges. *Electronics*, 9(6), 912. <https://doi.org/10.3390/electronics9060912>

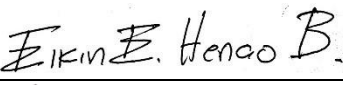
Zambroni de Souza, A. C., & Castilla, M. (Eds.). (2019). *Microgrids Design and Implementation*. Springer International Publishing. <https://doi.org/10.1007/978-3-319-98687-6>


Zhao, T., Zhang, X., Wang, M., Mao, W., Ma, M., Wang, F., & Wang, X. (2021). Analysis and Suppression of Resonant Current Envelope Ripple of LLC Converter in Cascaded Modular PV Solid-State Transformer. *IEEE Journal of Emerging and Selected Topics in Power Electronics*, 9(3), 3744–3757. <https://doi.org/10.1109/JESTPE.2020.2988989>

	INFORME FINAL DE TRABAJO DE GRADO	Código	FDE 089
		Versión	03
		Fecha	2015-01-22



FIRMA ESTUDIANTE





FIRMA ASESORES

FECHA ENTREGA: 27/08/2024

FIRMA COMITÉ TRABAJO DE GRADO DE LA FACULTAD _____

RECHAZADO ___ ACEPTADO ___ ACEPTADO CON MODIFICACIONES ___

ACTA NO. _____

FECHA ENTREGA: _____

FIRMA CONSEJO DE FACULTAD _____

ACTA NO. _____

FECHA ENTREGA: _____