



**ESCUELA SUPERIOR POLITÉCNICA DE CHIMBORAZO**  
**FACULTAD DE INFORMÁTICA Y ELECTRÓNICA**  
**CARRERA ELECTRÓNICA Y AUTOMATIZACIÓN**

**“Implementación de un prototipo Convertidor DC-DC Multipuerto  
basado en celdas de voltaje pulsante para vehículos eléctricos ligeros.”**

**Trabajo de Integración Curricular**

**Tipo:** Dispositivo Tecnológico

Presentado para optar al grado académico de:

**INGENIERO EN ELECTRÓNICA Y AUTOMATIZACIÓN**

**AUTOR:** JOSEPH ISRAEL MAZÓN MESÍAS

**DIRECTOR:** Ing. JORGE LUIS HERNÁNDEZ AMBATO, PhD.

Riobamba – Ecuador

2023

© 2023, Joseph Israel Mazón Mesías.

Se autoriza la reproducción total o parcial, con fines académicos, por cualquier medio o procedimiento, incluyendo cita bibliográfica del documento, siempre y cuando se reconozca el Derecho de Autor.

Yo, JOSEPH ISRAEL MAZÓN MESÍAS, declaro que el presente trabajo de integración curricular es de autoría propia y los resultados de este son auténticos. Los textos en el documento que provienen de otras fuentes están debidamente citados y referenciados.

Como autor asumo la responsabilidad legal y académica de los contenidos de este trabajo de integración curricular. El patrimonio intelectual pertenece a la Escuela Superior Politécnica de Chimborazo.

Riobamba, 21 de noviembre del 2023.

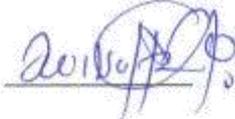
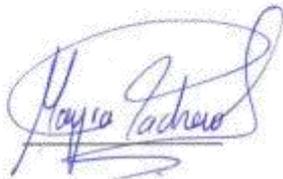
A handwritten signature in blue ink, appearing to read 'Mazón Joseph', is written over a horizontal line.

Joseph Israel Mazón Mesías

**180533976-7**

**ESCUELA SUPERIOR POLITÉCNICA DE CHIMBORAZO**  
**FACULTAD DE INFORMÁTICA Y ELECTRÓNICA**  
**CARRERA ELECTRÓNICA Y AUTOMATIZACIÓN**

El Tribunal de Trabajo de Integración Curricular certifica que: El Trabajo de Integración Curricular, Tipo: Dispositivo Tecnológico; **Implementación de un prototipo Convertidor DC-DC Multipuerto basado en celdas de voltaje pulsante para vehículos eléctricos ligeros.**; de responsabilidad del señor **JOSEPH ISRAEL MAZÓN MESÍAS**, ha sido minuciosamente revisado por los Miembros del Tribunal del Trabajo de Integración Curricular, el mismo que cumple con los requisitos científicos, técnicos, legales, en tal virtud el Tribunal autoriza su presentación.

	<b>FIRMA</b>	<b>FECHA</b>
Ing. Wilson Oswaldo Baldeón López <b>PRESIDENTE DEL TRIBUNAL</b>		2023-11-21
Ing. Jorge Luis Hernández Ambato <b>DIRECTOR DEL TRABAJO DE INTEGRACIÓN CURRICULAR</b>		2023-11-21
Ing. Mayra Alejandra Pacheco Cunduri <b>ASESORA DEL TRABAJO DE INTEGRACIÓN CURRICULAR</b>		2023-11-21

## **DEDICATORIA**

Dedico este Trabajo de Integración Curricular en primer lugar a Dios, mi principal guía y fuente de inspiración en cada paso de mi vida. Su constante dirección ha sido mi luz en este camino educativo.

A mis amados padres, José Mazón y Silvia Mesías, quiero expresar mi más profundo agradecimiento y dedicar este proyecto. Sus palabras de aliento, esfuerzo incansable y sacrificio han sido los pilares fundamentales que me han permitido superar los retos y obstáculos que se han presentado en mi camino académico y personal. Cada logro que he alcanzado es un reflejo de su amor incondicional y apoyo constante.

A mis amadas hermanas, Lisseth y Carla Mazón, gracias por su apoyo inquebrantable y por ser mis compañeras en cada etapa de mi vida.

A mi amada abuelita, Luz María Clelia Mesías Sánchez. Aunque ya no esté físicamente presente, su influencia y amor continúan guiando mi camino y este trabajo es un homenaje a su memoria.

Joseph Mazón

## **AGRADECIMIENTO**

Quiero expresar mi agradecimiento a la Escuela Superior Politécnica de Chimborazo por brindarme la oportunidad de cursar mi desarrollo académico en sus instalaciones. Agradezco a esta institución por ofrecerme un entorno para alcanzar mi meta educativa.

Mi gratitud se extiende de manera especial al Ing. Jorge Hernández, mi tutor en este Trabajo de Integración Curricular. Sus conocimientos, orientación y dedicación fueron fundamentales en cada paso del desarrollo de este proyecto. Siempre dispuesto a compartir su experiencia y brindar soluciones, su guía fue esencial para enfrentar los retos y superar obstáculos.

También deseo expresar mi agradecimiento al grupo de investigación GITEA por su colaboración en este proyecto. Su apoyo no solo fue crucial en términos de recursos, sino que también enriqueció mi experiencia al brindarme un espacio para intercambiar ideas y conocimientos con expertos en el campo.

A mis padres, José Mazón y Silvia Mesías, así como a mis hermanas Lisseth y Carla Mazón, les debo un profundo agradecimiento por su apoyo inquebrantable, el cual fue el motor que me impulsó a dar lo mejor de mí en cada etapa de mi formación. Sus consejos, sacrificios y aliento constante fueron fundamentales para alcanzar esta meta.

Además, quiero destacar a mis amigos, sus familias y a aquellas personas que Dios ha puesto en mi camino. Estuvieron a mi lado durante todo este proceso, brindándome su ánimo, comprensión y apoyo en momentos cruciales, lo cual contribuyó en gran medida a mi éxito académico y personal.

En este camino de crecimiento y aprendizaje, cada uno de ustedes ha dejado una huella significativa en mi vida y en este proyecto. Mi agradecimiento es profundo y sincero, y siento una gran bendición por haber contado con su valioso respaldo.

Joseph Mazón

## TABLA DE CONTENIDO

ÍNDICE DE TABLAS.....	xi
ÍNDICE DE ILUSTRACIONES.....	xii
RESUMEN.....	xvi
ABSTRACT.....	xvii
INTRODUCCIÓN.....	1
<b>CAPITULO I</b>	
<b>1. DIAGNÓSTICO DEL PROBLEMA.....</b>	<b>3</b>
<b>1.1. Planteamiento del problema.....</b>	<b>3</b>
<b>1.1.1. <i>Formulación del Problema</i>.....</b>	<b>3</b>
<b>1.1.2. <i>Sistematización del Problema</i>.....</b>	<b>3</b>
<b>1.2. Justificación.....</b>	<b>4</b>
<b>1.2.1. <i>Justificación Teórica</i> .....</b>	<b>4</b>
<b>1.2.2. <i>Justificación Aplicativa</i> .....</b>	<b>5</b>
<b>1.3. Objetivos.....</b>	<b>6</b>
<b>1.3.1. <i>Objetivo General</i>.....</b>	<b>6</b>
<b>1.3.2. <i>Objetivos Específicos</i> .....</b>	<b>6</b>
<b>CAPÍTULO II</b>	
<b>2. MARCO TEÓRICO .....</b>	<b>7</b>
<b>2.1. Vehículos Eléctricos .....</b>	<b>7</b>
<b>2.1.1. <i>Arquitectura y Características</i> .....</b>	<b>7</b>
<b>2.1.2. <i>Vehículos Eléctricos Ligeros</i> .....</b>	<b>9</b>
<b>2.1.3. <i>Sistema de Propulsión Eléctrica</i> .....</b>	<b>10</b>
<b>2.2. Convertidores DC-DC para Vehículos Eléctricos .....</b>	<b>11</b>
<b>2.2.1. <i>Convertidores DC-DC Basados en Fuentes de Voltajes Pulsantes</i> .....</b>	<b>12</b>
<b>2.2.2. <i>Full Bridge Unidireccional</i>.....</b>	<b>14</b>
<b>2.2.3. <i>Full Bridge Bidireccional / DAB</i>.....</b>	<b>17</b>
<b>2.2.4. <i>Convertidor DC-DC Multipuerto Aislado / TAB</i>.....</b>	<b>19</b>

2.3.	<b>Componentes de un Convertidor DC-DC Multipuerto Bidireccional.</b>	21
2.3.1.	<i>Transistores de Potencia</i>	21
2.3.2.	<i>Circuito Driver para Transistores de Potencia</i>	23
2.3.3.	<i>Transformadores de Alta Frecuencia</i>	24
2.3.4.	<i>Controladores de Convertidores DC-DC</i>	25
<b>CAPÍTULO III</b>		
3.	<b>MARCO METODOLÓGICO</b>	29
3.1.	<b>Requerimientos</b>	30
3.2.	<b>Caracterización y Dimensionamiento</b>	31
3.3.	<b>Simulación General</b>	34
<b>CAPÍTULO IV</b>		
4.	<b>PROPUESTA Y DISEÑO DE PROTOTIPO</b>	40
4.1.	<b>Selección de Hardware</b>	40
4.1.1.	<i>Tarjeta de Desarrollo</i>	40
4.1.2.	<i>Sensor de Voltaje</i>	42
4.1.3.	<i>Sensor de Corriente</i>	44
4.1.4.	<i>Transistores de Potencia</i>	45
4.1.5.	<i>Drivers para Transistores de Potencia.</i>	46
4.1.6.	<i>Fuentes Aisladas</i>	48
4.2.	<b>Selección de Software</b>	50
4.2.1.	<i>PSim</i>	50
4.2.2.	<i>EasyEDA</i>	51
4.2.3.	<i>Keil Studio Cloud</i>	52
4.2.4.	<i>Matlab / Simulink</i>	53
4.3.	<b>Construcción del Prototipo</b>	54
4.3.1.	<i>Diseño del Esquemático.</i>	54
4.3.2.	<i>Diseño de la PCB</i>	65
4.3.3.	<i>Implementación del Prototipo</i>	69
4.4.	<b>Programación del Microcontrolador</b>	72

4.4.1.	<i>Configuración de Ganancias del Lazo de Control</i> .....	74
<b>CAPÍTULO V</b>		
5.	<b>VALIDACIÓN DE PROTOTIPO</b> .....	80
5.1.	<b>Pruebas de Laboratorio</b> .....	80
5.2.	<b>Análisis de Costos del Prototipo</b> .....	84
<b>CAPÍTULO VI</b>		
6.	<b>CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES</b> .....	86
<b>BIBLIOGRAFÍA</b>		

## ÍNDICE DE TABLAS

<b>Tabla 1-2</b>	Características de diferentes modelos de LEV.....	9
<b>Tabla 1-3</b>	Requerimientos del convertidor DC-DC Multipuerto Bidireccional. ....	31
<b>Tabla 2-3</b>	Especificaciones del Transformador Planar Serie MTPL-2516-S24V.....	32
<b>Tabla 1-4</b>	Comparativa entre tarjetas de desarrollo. ....	41
<b>Tabla 2-4</b>	Tabla de Voltajes de Salida en el Puerto 2 y 3. ....	75
<b>Tabla 1-5</b>	Tabla de Costos del Prototipo Implementado. ....	85

## ÍNDICE DE ILUSTRACIONES

<b>Ilustración 1-1</b>	Diagrama Estructural del Prototipo a Implementar. ....	5
<b>Ilustración 1-2</b>	Clasificación General de Vehículos Eléctricos.....	7
<b>Ilustración 2-2</b>	Arquitectura general de la cadena cinemática de vehículos eléctricos: (a) BEV, (b) HEV, (c) EREV o REEV y (d) FCEV. ....	8
<b>Ilustración 3-2</b>	Diagrama funcional del sistema de propulsión eléctrico típico. ....	10
<b>Ilustración 4-2</b>	Clasificación de motores eléctricos para aplicaciones de EV y HEV.....	11
<b>Ilustración 5-2</b>	Clasificación de topologías de convertidores DC-DC. ....	12
<b>Ilustración 6-2</b>	Topología general de un Convertidor de Múltiple Entrada. ....	13
<b>Ilustración 7-2</b>	Configuración del circuito del PVSC y Diagrama conceptual del PVSC..	13
<b>Ilustración 1-2</b>	Circuito de un Convertidor Full-Bridge.....	14
<b>Ilustración 2-2</b>	Señales características de a) Voltaje Primario, b) Voltaje en el transistor $Q_1$ , c) Voltaje en el transistor $Q_2$ , d) Voltaje Rectificado de Salida, e) Corriente Primaria y f) Corriente en el Inductor $L_1$ . ....	17
<b>Ilustración 3-2</b>	Convertidor de Doble Puente Activo.....	18
<b>Ilustración 4-2</b>	Convertidor DC-DC Multipuerto. ....	20
<b>Ilustración 5-2</b>	MOSFET (de canal n) con diodo parásito en antiparalelo.....	22
<b>Ilustración 6-2</b>	Modelo de Transformador AF. ....	25
<b>Ilustración 7-2</b>	Arquitectura de un sistema controlado por un PID.....	26
<b>Ilustración 8-2</b>	Arquitectura e incidencia de controladores P, PI, PD.....	27
<b>Ilustración 1-3</b>	Etapas para la creación del prototipo. ....	29
<b>Ilustración 2-3</b>	Esquema general del Convertidor DC-DC Multipuerto Bidireccional. ....	30
<b>Ilustración 3-3</b>	Transformador Planar Serie MTPL-2516-S24V.....	31
<b>Ilustración 4-3</b>	Esquemático del Transformador Planar Serie MTPL-2516-S24V. ....	33
<b>Ilustración 5-3</b>	Parámetros del transformador MTPL-2516 en la simulación PSIM. ....	34

<b>Ilustración 6-3</b>	Convertidor DC-DC Multipuerto Bidireccional con topología Full Bridge, en el entorno PSIM. ....	35
<b>Ilustración 7-3</b>	Voltajes de Salida con los tres puertos activos. Voltaje de las Baterías (señal en color rojo) y Voltaje del Motor (señal en color azul).....	35
<b>Ilustración 8-3</b>	Corrientes en los Puertos 2 y 3, con los dos puertos bidireccionales activos. Corriente en el Puerto 2 (Señal en color rojo) y Corriente en el Puerto 3 (Señal en color azul). ....	36
<b>Ilustración 9-3</b>	Convertidor DC-DC Multipuerto Bidireccional con topología Full Bridge con el puerto 3 desactivado, en el entorno PSIM. ....	36
<b>Ilustración 10-3</b>	Voltaje de Salida cuando se encuentra deshabilitado el puerto 3; la señal en color rojo representa al Voltaje en las Baterías durante esta etapa.....	37
<b>Ilustración 11-3</b>	Corriente en el Puerto 2 cuando se encuentra deshabilitado el puerto 3; la señal en color rojo representa el comportamiento de la corriente en el puerto. ....	37
<b>Ilustración 12-3</b>	Convertidor DC-DC Multipuerto Bidireccional con topología Full Bridge cuando se encuentra deshabilitado el puerto 3, en el entorno PSIM. ....	38
<b>Ilustración 13-3</b>	Voltajes cuando se encuentra deshabilitado el puerto 3. Voltaje de las Baterías (Señal en color rojo) y Voltaje del Motor (Señal en color azul)..	38
<b>Ilustración 14-3</b>	Corrientes en los Puertos 2 y 3, cuando se encuentra deshabilitado el puerto 3. Corriente en el Puerto 2 (Señal en color rojo) y Corriente en el Puerto 3 (Señal en color azul). ....	38
<b>Ilustración 1-4</b>	Tarjeta de Desarrollo STM32F767ZIT6U.....	42
<b>Ilustración 2-4</b>	Sensor de Voltaje ACPL-C780-000E.....	42
<b>Ilustración 3-4</b>	Circuito recomendado para el Sensor de Voltaje ACPL-C780-000E.....	43
<b>Ilustración 4-4</b>	Sensor de Corriente ACS712.....	44
<b>Ilustración 5-4</b>	Conexión del Sensor de Corriente ACS712. ....	45
<b>Ilustración 6-4</b>	Encapsulado HiP247 del MOSFET SCTWA35N65G2V. ....	46
<b>Ilustración 7-4</b>	Símbolo Electrónico del MOSFET a usarse en el diseño. ....	46

<b>Ilustración 8-4</b>	Package SOIC-16 NB del SI8275ABD-IS1. ....	47
<b>Ilustración 9-4</b>	Asignación de Pins del Si8275. ....	47
<b>Ilustración 10-4</b>	Circuito de Conexión del Driver Si8273 con el Microcontrolador.....	48
<b>Ilustración 11-4</b>	Fuente Aislada RECOM Power RKZ.....	49
<b>Ilustración 12-4</b>	Fuente Aislada RECOM Power RKZ3.....	49
<b>Ilustración 13-4</b>	Diagrama de conexión del RECOM Power RKZ y RKZ3.....	50
<b>Ilustración 14-4</b>	Módulos de PSIM.....	51
<b>Ilustración 15-4</b>	Isologo de EasyEDA.....	51
<b>Ilustración 16-4</b>	Herramientas de diseño de Easy EDA.....	52
<b>Ilustración 17-4</b>	Isologo de Keil Studio Cloud. ....	53
<b>Ilustración 18-4</b>	Isologo de Matlab & Simulink. ....	53
<b>Ilustración 19-4</b>	Logo de Simulink .....	53
<b>Ilustración 20-4</b>	Esquemático de conexión del Convertidor DC-DC TAB.....	55
<b>Ilustración 21-4</b>	Esquemático de conexión del Driver 1.....	57
<b>Ilustración 22-4</b>	Esquemático de conexión del Driver 2.....	57
<b>Ilustración 23-4</b>	Esquemático de conexión del Driver 3.....	58
<b>Ilustración 24-4</b>	Esquemático de conexión del Driver 4.....	58
<b>Ilustración 25-4</b>	Esquemático de conexión del Driver 5.....	59
<b>Ilustración 26-4</b>	Esquemático de conexión del Driver 6.....	59
<b>Ilustración 27-4</b>	Esquemático de conexión de los Sensores de Voltaje.....	61
<b>Ilustración 28-4</b>	Esquemático de conexión del AD8534ARZ.....	61
<b>Ilustración 29-4</b>	Esquemático de conexión de los Sensores de Corriente.....	62
<b>Ilustración 30-4</b>	Esquemático de la conexión del Microcontrolador. ....	62
<b>Ilustración 31-4</b>	Esquemático de conexión del Conector de placa hembra (F1) y Conector de placa macho (M1). ....	63
<b>Ilustración 32-4</b>	Esquemático de conexión de Leds.....	64
<b>Ilustración 33-4</b>	Esquemático de conexión de las Fuentes de Alimentación de la Placa. ....	65
<b>Ilustración 34-4</b>	Serigráfica superior de la PCB principal del Convertidor TAB DC-DC... ..	66

<b>Ilustración 35-4</b>	Capa superior de la PCB principal del Convertidor TAB DC-DC. ....	67
<b>Ilustración 36-4</b>	Capa inferior de la PCB principal del Convertidor TAB DC-DC. ....	67
<b>Ilustración 37-4</b>	Serigrafía superior en PCB del Microcontrolador en Convertidor TAB DC-DC.....	67
<b>Ilustración 38-4</b>	Capa superior de la PCB del Microcontrolador del Convertidor TAB DC-DC.....	68
<b>Ilustración 39-4</b>	Capa inferior de la PCB del Microcontrolador del Convertidor TAB DC-DC. ....	68
<b>Ilustración 40-4</b>	Visión en 3D de la PCB principal del Convertidor TAB DC-DC. ....	69
<b>Ilustración 41-4</b>	Visión en 3D de la PCB del microcontrolador del Convertidor TAB DC-DC. ....	69
<b>Ilustración 42-4</b>	Proceso de soldadura de los elementos que conforman la PCB del Convertidor TAB DC-DC.....	70
<b>Ilustración 43-4</b>	Placa principal del Convertidor TAB DC-DC.....	70
<b>Ilustración 44-4</b>	PCB principal y del microcontrolador del Convertidor TAB DC-DC. ....	71
<b>Ilustración 45-4</b>	Conectores macho y hembra (lado izquierdo de la ilustración) - Prototipo Convertidor TAB DC-DC (lado derecho de la ilustración).....	71
<b>Ilustración 46-4</b>	Diagrama de Flujo de la Programación del Microcontrolador. ....	73
<b>Ilustración 47-4</b>	Señal de Voltaje de Salida en el puerto 2 (Baterías) y puerto 3 (Motor)...	74
<b>Ilustración 48-4</b>	Mapa de asignación polos y ceros. ....	78
<b>Ilustración 49-4</b>	Respuesta del sistema de control en lazo cerrado.....	79
<b>Ilustración 1-5</b>	Pruebas de laboratorio del Prototipo Convertidor TAB DC-DC. ....	80
<b>Ilustración 2-5</b>	PWM en los Transistores Mosfet. ....	81
<b>Ilustración 3-5</b>	Señales en el bobinado primario del transformador. ....	81
<b>Ilustración 4-5</b>	Señales de voltaje (amarilla) y corriente (verde) en el puerto 2 (Baterías).	82
<b>Ilustración 5-5</b>	Medición de la respuesta dinámica de corriente (señal verde) en el puerto 2 (Baterías). ....	82
<b>Ilustración 6-5</b>	Medición de la respuesta dinámica de voltaje (señal amarilla). ....	83

<b>Ilustración 7-5</b>	Diagrama de pastel del análisis de costo del prototipo.....	84
------------------------	---	----

## RESUMEN

En el marco del Trabajo de Integración Curricular presente, se planteó como objetivo: diseñar y desarrollar un prototipo de Convertidor DC-DC Multipuerto enfocado a su utilidad en vehículos eléctricos ligeros. Este proyecto se distingue por su enfoque innovador en la implementación de celdas de voltaje pulsante, una técnica disruptiva que promete optimizar la conversión de energía al modular tanto el voltaje de entrada como la frecuencia de conmutación de los transistores. La razón detrás de esta investigación es clara: los vehículos eléctricos ligeros se han convertido en una solución esencial para abordar los desafíos medioambientales y de movilidad urbana de la actualidad. Sin embargo, su autonomía y rendimiento dependen en gran medida de la eficiencia de sus sistemas de conversión de energía. Es aquí donde el prototipo desarrollado justifica su relevancia, ya que su eficiencia y control en la transferencia de potencia, se traducirá en un incremento notable en la autonomía y eficacia en su implementación en vehículos eléctricos ligeros. El proceso de desarrollo implica un minucioso ciclo de diseño, simulación y construcción del prototipo del convertidor DC-DC multipuerto. Cada fase de este proyecto se lleva a cabo con el propósito de garantizar la máxima eficiencia energética, rendimiento y versatilidad en aplicaciones de vehículos eléctricos ligeros. Los resultados obtenidos a través de pruebas rigurosas y análisis detallados ofrecerán una base sólida para validar la efectividad de esta propuesta. Este prototipo no solo aspira a ser una opción más en sistemas de conversión de energía, sino que también busca impulsar la investigación y desarrollo en los desafíos del presente y del futuro en términos de movilidad sostenible.

**Palabras clave:** <CONVERTIDOR MULTIPUERTO>, <VEHÍCULOS ELÉCTRICOS LIGEROS>, <CONVERTIDOR FULL BRIDGE>.

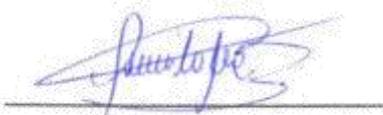


1795-DBRA-UPT-2023

## **ABSTRACT**

Within the outline of the present Curriculum Integration Work, the objective was to design and develop a prototype of a Multiport DC-DC Converter focused on its usefulness in light electric vehicles. This project is distinguished by its innovative approach to the implementation of pulsed voltage cells, a disruptive technique that promises to optimize power conversion by modulating both the input voltage and the switching frequency of the transistors. The reason behind this research is clear: light electric vehicles have become an essential solution to address today's environmental and urban mobility challenges. However, their autonomy and performance largely depend on the efficiency of their energy conversion systems. This is where the developed prototype justifies its relevance since its efficiency and control in power transfer will translate into a notable increase in autonomy and effectiveness in its implementation in light electric vehicles. The development process involves a meticulous cycle of design, simulation, and construction of the prototype of the multiport DCDC converter. Each phase of this project is carried out with the purpose of guaranteeing maximum energy efficiency, performance, and versatility in light electric vehicle applications. The results obtained through rigorous testing and detailed analysis will offer a solid basis to validate the effectiveness of this proposal. This prototype not only aspires to be another option in energy conversion systems, but also seeks to promote research and development in the challenges of the present and the future in terms of sustainable mobility.

**Keywords:** <MULTIPUERT CONVERTER>, <LIGHT ELECTRIC VEHICLES>, <FULL BRIDGE>.



Lic. Nelly Padilla P. Mgs

0603818717

**DOCENTE FIE**

## INTRODUCCIÓN

La creciente demanda de movilidad sostenible y la necesidad de reducir las emisiones de gases de efecto invernadero han impulsado el desarrollo de tecnologías avanzadas en el sector de vehículos eléctricos. Estos vehículos han emergido como una solución prometedora para abordar los desafíos medioambientales y energéticos actuales. Sin embargo, para lograr una adopción masiva de vehículos eléctricos, es esencial superar las limitaciones en términos de autonomía, eficiencia y rendimiento. En este contexto, el diseño de sistemas de conversión de energía altamente eficientes y versátiles se convierte en un componente esencial para garantizar el éxito de los vehículos eléctricos en el mercado.

El presente trabajo de investigación se centra en el diseño y desarrollo de un prototipo de convertidor DC-DC Multipuerto para vehículos eléctricos ligeros. Este convertidor multipuerto tiene como objetivo fundamental abordar la complejidad de la gestión energética en vehículos eléctricos al permitir una integración eficiente de múltiples fuentes de energía y sistemas de almacenamiento. Los tres puertos se definen como la alimentación de la red eléctrica, la batería y el motor eléctrico del vehículo. La integración de estos puertos en un solo sistema de conversión de energía proporciona una solución integral para optimizar el flujo de energía y maximizar la eficiencia del vehículo.

El enfoque central de este prototipo de convertidor DC-DC se basa en la topología Full-Bridge implementada en cada uno de los tres puertos. Esta elección topológica se deriva de su capacidad para proporcionar un control preciso de la conversión de energía, así como su capacidad bidireccional en cada puerto, permitiendo tanto la carga como la descarga de la batería y la recuperación de energía durante la frenada regenerativa. Además, la utilización de la tecnología "Tri-Active Bridge" (TAB) añade un nivel adicional de eficiencia y rendimiento al sistema, mejorando la calidad de la transferencia de energía y reduciendo las pérdidas de conmutación.

En este contexto, el convertidor DC-DC Multipuerto se erige como una pieza clave en la estrategia de electrificación vehicular. La versatilidad de su diseño permite la optimización de la energía proveniente de múltiples fuentes, como la red eléctrica, paneles solares y la propia batería del vehículo. Esto no solo se traduce en una mayor autonomía y eficiencia energética, sino también en una reducción de la dependencia de la red eléctrica convencional y una potencial disminución en los costos de operación y mantenimiento.

Un aspecto destacado de este prototipo radica en la aplicación de la tecnología "Trial Active Bridge" (TAB), la cual refuerza la eficiencia y flexibilidad del sistema. Esta innovadora técnica controla la conmutación de los transistores con mayor precisión, minimizando las pérdidas de energía y permitiendo una mayor confiabilidad en las operaciones de carga y descarga de la batería, así como en la entrega de energía al motor eléctrico. La capacidad bidireccional de cada puerto, junto con la funcionalidad del TAB, abre la puerta a una gestión energética más inteligente y adaptable, adaptándose a diferentes condiciones de conducción y requisitos de energía.

El ámbito de aplicación de este prototipo no se limita solo a vehículos eléctricos ligeros, sino que puede extenderse a otras áreas, como sistemas de almacenamiento de energía en red y aplicaciones industriales. La implementación exitosa de esta solución podría tener un impacto significativo en la viabilidad de la movilidad eléctrica en términos de eficiencia energética y sostenibilidad, contribuyendo a la reducción de las emisiones de gases de efecto invernadero y a la conservación de recursos naturales.

En resumen, el diseño y desarrollo de un prototipo de convertidor DC-DC de 3 puertos con topología Full-Bridge en cada puerto, respaldado por la tecnología "Trial Active Bridge", representa un paso importante en la evolución de los sistemas de conversión de energía para vehículos eléctricos ligeros. Esta investigación busca abordar desafíos cruciales en la gestión energética, maximizando la eficiencia, autonomía y versatilidad de estos vehículos. Además, la aplicación de esta tecnología podría tener un impacto positivo más amplio en la electrificación de la movilidad y en la transformación hacia un futuro más sostenible y energéticamente eficiente.

Este trabajo se posiciona en la vanguardia de la investigación en electrónica de potencia y sistemas de propulsión para vehículos eléctricos, al presentar un enfoque innovador y de alta eficiencia para la gestión de la energía en estos vehículos. Se espera que los resultados de esta investigación contribuyan significativamente al desarrollo y la implementación de tecnologías avanzadas que impulsen la adopción de vehículos eléctricos ligeros y fomenten la movilidad sostenible en un futuro próximo.

## CAPITULO I

### DIAGNÓSTICO DEL PROBLEMA

#### 1.1. Planteamiento del problema

##### 1.1.1. *Formulación del Problema*

¿Cómo se implementará el prototipo Convertidor DC-DC Multipuerto basado en celdas de voltaje pulsante para vehículos eléctricos ligeros?

##### 1.1.2. *Sistematización del Problema*

¿Qué topología debe tener el convertidor DC-DC multipuerto basados en celdas de fuente de voltaje pulsante y los métodos de diseño y fabricación de este tipo de convertidores?

¿Cuáles serán los requerimientos de potencia, voltajes, número de puertos y operación del convertidor DC-DC multipuerto basado en celdas de voltaje pulsante para su aplicación en un vehículo eléctrico ligero?

¿Qué características tendrá el convertidor DC-DC multipuerto bajo la consideración de los requerimientos planteados observando aspectos de perdidas, seguridad y control del sistema de conversión?

¿Cómo se validará el diseño del sistema de conversión DC-DC multipuerto diseñado considerando los aspectos necesarios para su aplicación en vehículos eléctricos ligeros?

¿Cómo se verificará la funcionalidad y rendimiento del convertidor DC-DC multipuerto implementado?

## **1.2. Justificación**

### **1.2.1. Justificación Teórica**

Según lo expuesto por las Naciones Unidas a causa de la actividad humana hasta 1 millón de especies se encuentran actualmente en riesgo de extinción. Lograr los objetivos bajo el Acuerdo de París para garantizar que el mundo limite el calentamiento global entre 1.5°C y 2°C sobre los niveles preindustriales requiere alcanzar cero emisiones netas de dióxido de carbono (CO<sub>2</sub>) entre el 2050 y el 2070, igualmente reducciones significativas de otros gases de efecto invernadero (BID y DDPLAC 2019).

Los gobiernos, académicos, grupos de expertos y agencias internacionales proponen que para alcanzar cero emisiones netas de CO<sub>2</sub> se debe: producir electricidad sin emisiones de carbono; llevar a cabo una electrificación masiva (por ejemplo, el despliegue de vehículos eléctricos y cocinas eléctricas) y hacer un cambio hacia la utilización de otros combustibles libres de carbono; aumentar la participación del transporte público y no motorizado; detener la deforestación y proteger y regenerar los ecosistemas naturales ricos en carbono (BID y DDPLAC 2019).

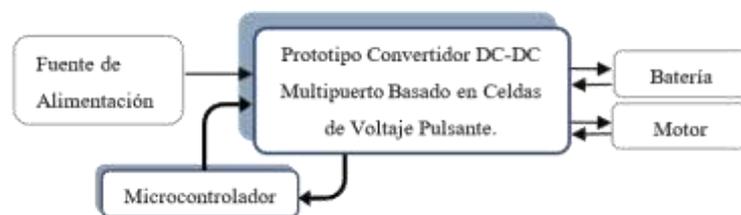
Una de mayores aportaciones para la transición a cero emisiones de CO<sub>2</sub> sería tener un sistema de autobuses eléctricos para el transporte en las áreas urbanas. Esta transición también permitiría reducir la congestión de tránsito, los accidentes y la contaminación local. El beneficio también sería en lo económico, ya que si los autobuses y taxis de las 22 ciudades más grandes de América Latina fuese eléctrica, la región podría ahorrar hasta 64 mil millones de dólares en costos de combustible (UN Environment 2018).

En un futuro inmediato la demanda de vehículos de máquina de combustión sería menor a la de los vehículos eléctricos (EV, por sus siglas en inglés) debido a la reducción de costos de producción. Por ejemplo, los precios de las baterías de litio han bajado cinco veces su precio entre 2010 y 2017, y se espera que se vuelvan aún más baratas (BID y DDPLAC 2019). Ecuador es el cuarto país con más ventas de autos de combustión menos contaminante, entre nueve países de América del Sur, según la Asociación de Empresas Automotrices del Ecuador (AEADE). La venta de autos híbridos y eléctricos alcanzó cifras récord en 2022, según la Cámara de la Industria Automotriz Ecuatoriana (CINAE). Las concesionarias vendieron 6.511 vehículos híbridos (HEV, por sus siglas en inglés) en el 2022 lo que representa un aumento de 66% frente a los 3.919 vehículos de este tipo vendidos en 2021, entre las marcas más vendidas se encuentran Kia y Toyota (Tapia 2023).

En su respuesta para mitigar el calentamiento global se han estado realizando en los últimos años cambios que permitan alcanzar los objetivos planteados para el 2030 en el Acuerdo de París. Entre estos cambios está la transición hacia una movilidad más responsable con el medio ambiente, por lo que la industria de los EV ha crecido de manera acelerada en los últimos años. El estudio, diseño e implementación de una de las partes más importantes de un EV presenta varios retos y oportunidades, que están motivadas por lograr un aporte en el estudio y creación de nuevas tecnologías para contribuir en el desarrollo de las energías sostenibles.

### 1.2.2. Justificación Aplicativa

Los Convertidor DC-DC son una parte fundamental de los EV y contribuyen principalmente en su proceso de carga. En el presente trabajo de integración curricular se diseñará e implementará una propuesta de convertidor DC-DC multipuerto enfocándolo a su aplicabilidad en vehículos eléctricos ligeros (LEV, por sus siglas en inglés). Los resultados obtenidos de la validación del prototipo a realizarse formarán parte del proyecto de investigación denominado “Convertidores DC/DC de Alta Eficiencia basado en dispositivos WBG para aplicaciones en Tecnología Vehicular Eléctrica (Con AE-TVE)”, el mismo que se desarrollará bajo supervisión del Grupo de Investigación en Tecnologías de Electrónica y Automatización (GITEA).



**Ilustración 1-1 :** Diagrama Estructural del Prototipo a Implementar.

**Realizado por:** (Mazón 2023).

En la Ilustración 1-1 se muestra como estará compuesto el Prototipo Convertidor DC-DC Multipuerto, cabe recalcar que, si bien sus características estarán destinadas para a su aplicación en LEV, las pruebas para la validación de este no serán implementándolo en un LEV sino en un laboratorio creando un ambiente que ejemplifique su aplicación. El Prototipo Convertidor DC-DC estará comandado por un microcontrolador, constará de un puerto unidireccional (en el cual se conectará una fuente de alimentación) y dos bidireccionales (uno destinado a conectar la batería y otro destinado a conectar el motor). La bidireccionalidad entre el puerto de baterías y motor se da debido a la característica regenerativa que tendrá el Prototipo, esto quiere decir ejemplificar cuando las baterías del LEV se recarguen al pisar el pedal del freno del LEV.

### **1.3. Objetivos**

#### **1.3.1. *Objetivo General***

Diseñar una propuesta de prototipo de Convertidor DC-DC Multipuerto basado en celdas de voltaje pulsante para vehículos eléctricos.

#### **1.3.2. *Objetivos Específicos***

Estudiar el estado del arte de los convertidores DC-DC multipuerto basados en celdas de fuente de voltaje pulsante y los métodos de diseño y fabricación de este tipo de convertidores.

Establecer los requerimientos de potencia, voltajes, número de puertos y operación del convertidor DC-DC multipuerto basado en celdas de voltaje pulsante para su aplicación en un vehículo eléctrico ligero.

Diseño electrónico del convertidor DC-DC multipuerto bajo la consideración de los requerimientos planteados observando aspectos de pérdidas, seguridad y control del sistema de conversión.

Implementación del sistema de conversión DC-DC multipuerto diseñado considerando aspectos necesarios para su aplicación en vehículos eléctricos ligeros.

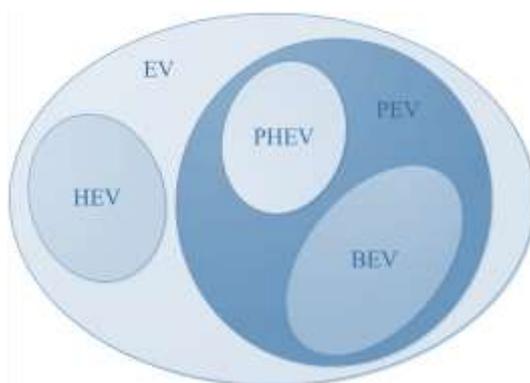
Evaluación de la funcionalidad y rendimiento del convertidor DC-DC multipuerto implementado bajo pruebas controladas de laboratorio apegadas a su aplicación en vehículos eléctricos ligeros.

## CAPÍTULO II

### MARCO TEÓRICO

#### 2.1. Vehículos Eléctricos

Un vehículo eléctrico (EV, por sus siglas en inglés), es aquel cuyo sistema está basado en uno o varios motores (eléctricos o de tracción) que garantizan su propulsión (Mahmoudi, Flah, Sbita 2014). Como se muestra en la Ilustración 1-2, se pueden clasificar principalmente en dos grupos: EVs enchufables (PEVs, por sus siglas en inglés), los cuales se subclasifican en EV Híbridos enchufables (PHEVs, por sus siglas en inglés) y EV de batería (BEVs, por sus siglas en inglés), y EVs no enchufables, que por lo general son EV Híbridos (HEVs, por sus siglas en inglés). Los BEVs usan baterías para alimentar su sistema de propulsión eléctrica, por otro lado, los PHEVs generalmente están equipados con baterías más pequeñas porque tiene un motor de combustión interna que puede propulsar directamente el vehículo y/o recargar la batería a bordo, lo que cual extiende el rango de movilidad en comparación con los BEVs (Damiano et al. 2012).

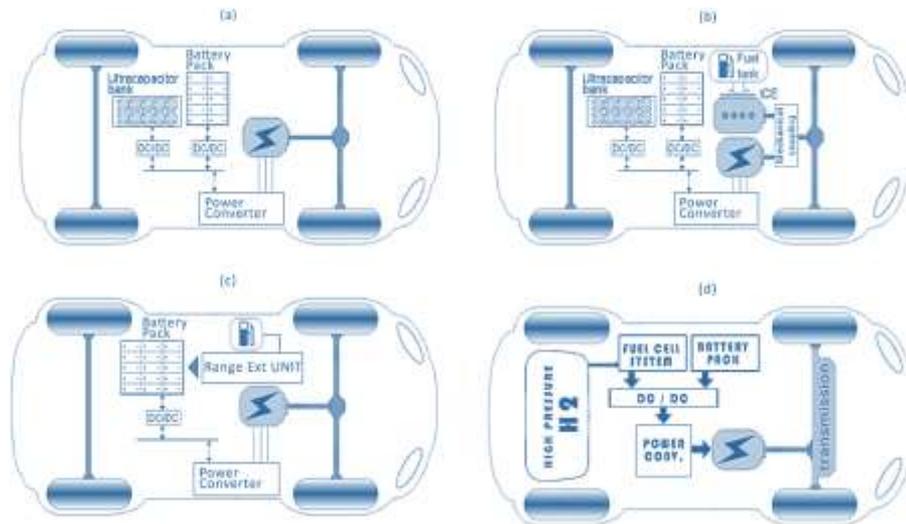


**Ilustración 1-2** : Clasificación General de Vehículos Eléctricos.

Fuente: (Damiano et al. 2012).

##### 2.1.1. Arquitectura y Características

Los BEVs utilizan baterías de alta capacidad y un motor eléctrico, para su propulsión. La arquitectura de esta clase de vehículos se muestra en la Ilustración 2-2 (a), un BEV se caracteriza porque obtiene toda la energía de su paquete de baterías y no tiene motor de combustión interna, ni depósito de combustible; sus baterías son recargadas cuando el vehículo es conectado a un punto de carga. Ejemplos de este tipo de vehículos son el Chevy Spark y el Mercedes-Benz Clase B (Mahmoudi, Flah, Sbita 2014).



**Ilustración 2-2** : Arquitectura general de la cadena cinemática de vehículos eléctricos:

(a) BEV, (b) HEV, (c) EREV o REEV y (d) FCEV.

**Fuente:** (Mahmoudi, Flah, Sbita 2014).

En cuanto a los HEVs, arquitectura mostrada en Ilustración 2-2 (b), usan una combinación de un Motor Eléctrico (EM, por sus siglas en inglés) a bajas velocidades y un Motor de Combustión Interna (ICE, por sus siglas en inglés) convencional. Cuando se usa el ICE las baterías comienzan a cargarse utilizando un alternador accionado por el mismo ICE; el EM permanece detenido. Los PHEVs incluye un nuevo sistema de carga de baterías que es alimentado externamente; mientras que el motor de combustión funciona como respaldo cuando las baterías se agotan. El Porsche Panamera Plug-in S E-Hybrid, es un claro ejemplo de este tipo de vehículos (Mahmoudi, Flah, Sbita 2014).

Los Vehículos Eléctricos de Autonomía Extendida (EREV o REEV, por sus siglas en inglés); según la arquitectura mostrada en la Ilustración 2-2 (c), su propulsión se realiza únicamente con un motor eléctrico alimentado por baterías de alta capacidad. Ejemplo de este tipo de vehículo es el Cadillac ELR de 2014, el AUDI A1 e-Tron y la Serie Limo-Green de Jaguar (Mahmoudi, Flah, Sbita 2014). En cuanto a los Vehículos Eléctricos de Pila de Combustible (FCEVs, por sus siglas en inglés), arquitectura mostrada en la Ilustración 2-2 (d), se utiliza un sistema de pila de combustible para alimentar su motor eléctrico. Las pilas de combustible de membrana electrolítica de polímero (PEM, por sus siglas en inglés) utilizan el combustible de hidrógeno almacenado en el vehículo y el oxígeno del aire para producir electricidad; este tipo de pilas convierten los combustibles directamente en electricidad mediante un proceso electroquímico que no necesita combustión. Los FCEVs se caracterizan por ser medios de transporte ecológicos de alta eficiencia y fiabilidad. El Mercedes-Benz Clase B F-CELL, el Honda FCEV-Concept y el Hyundai Tucson-ix35 FCEV, son ejemplos de este tipo de vehículos (Mahmoudi, Flah, Sbita 2014).

### 2.1.2. Vehículos Eléctricos Ligeros

Un vehículo eléctrico ligero (LEV, por sus siglas en inglés) no está actualmente definido con claridad y abarca una amplia gama de vehículos diferentes que van desde los micro móviles, como los scooters hasta los vehículos pequeños de cuatro ruedas. Sin embargo, los podemos describir como vehículos propulsados por un motor eléctrico cuya fuente de energía es una batería o una celda de combustible, cuya potencia alcanza hasta más de 30 kW y una clase de voltaje de entre 48 [V] y 144 [V]; pueden llegar a ser hasta vehículos de cuatro ruedas con espacio para objetos de carga en entornos industriales o para el transporte de pasajeros con cualquier tipo de equipaje. Los LEV de alta potencia más típicos son: los vehículos utilitarios ligeros (LUVs, por sus siglas en inglés), los vehículos eléctricos de baja velocidad (LSEV o MicroEVs, por sus siglas en inglés), las e-motorbikes y otros de uso profesional como las e-carretilas elevadoras y los carritos de golf (Ewert et al. 2020) (Infineon Technologies AG 2019).

**Tabla 1-2 :** Características de diferentes modelos de LEV.

LEV	Xiao Malcor	EVT Trike	Aixam eCity Pack
			
<b>Autonomía [km]</b>	30	70	75
<b>Asientos</b>	1	1	2
<b>Protección contra el clima</b>	No	No	Si
<b>Motor</b>	250 W	2×1,5[kW]	6 [kW]
<b>Baterías</b>	36[V]/7.8[Ah]	4×12[V]/50 [Ah]	12[V]/44 [Ah]

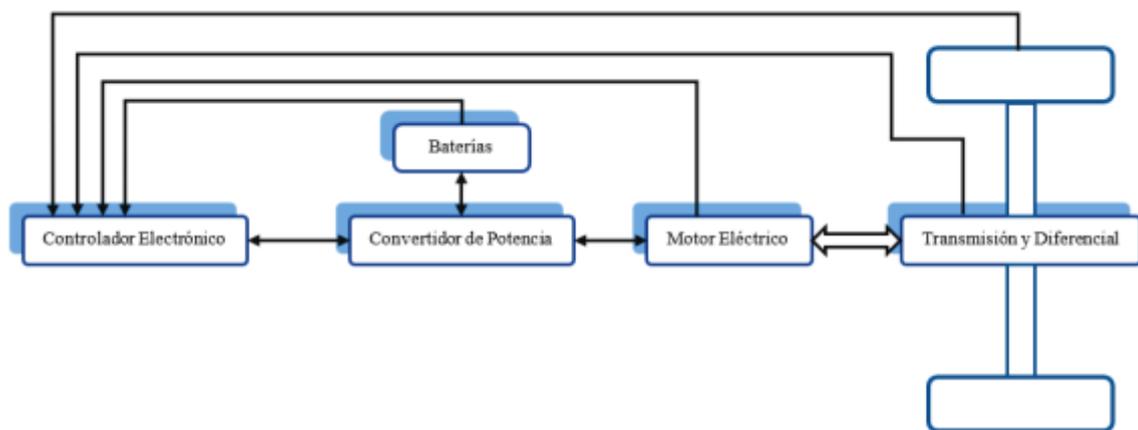
**Fuentes:** (Ewert et al. 2020) (Mini Pit Bikes 2019).

**Realizado por:** (Mazón 2023).

Dado que no es práctico suministrar electricidad mientras se conduce, los LEVs se basan en el transporte de energía eléctrica almacenada en baterías con aplicaciones de alimentación desde 200 W hasta más de 5 kW. Como se espera que la demanda de los LEVs siga creciendo, la eficiencia de los cargadores de baterías cobra especial importancia. Considerando que la inmensa mayoría de los LEVs vendidos cada año se instalan en países en desarrollo con redes eléctricas locales débiles, conlleva a que el porcentaje de eficiencia carga y descarga de baterías se traduzca en un importante ahorro de energía (Infineon Technologies AG 2019). En la Tabla 1-2 se muestran las características de tres LEVs: el Xiao Malcor tiene un motor eléctrico brushless con una potencia de 250 [W] y una Batería de 36 [V] a 7.8 [Ah]; el EVT Trike tiene dos motores de buje que alimentan cada una de las dos ruedas traseras con una potencia de 1,5 [kW] y cuatro baterías de 12[V] a 50[Ah] cada una; el Aixam eCity Pack tiene un motor MAVEL de 6 [kW] y una batería de litio lifeP04 de 12[V] a 44 [Ah] (Ewert et al. 2020).

### 2.1.3. Sistema de Propulsión Eléctrica

El núcleo de funcionamiento de un EVs es su sistema de propulsión eléctrica el cual consta de motor eléctrico, convertidores de potencia y controladores electrónicos. El motor eléctrico se encarga de convertir la energía eléctrica en energía mecánica para propulsar el vehículo y su acción regenerativa permite cargar las baterías a bordo. El convertidor de potencia se utiliza para suministrar al motor eléctrico el voltaje y la corriente necesaria. El controlador electrónico comanda el convertidor de potencia proporcionándole señales de control a los diferentes puertos (Ehsani et al. 2004).



**Ilustración 3-2** : Diagrama funcional del sistema de propulsión eléctrico típico.

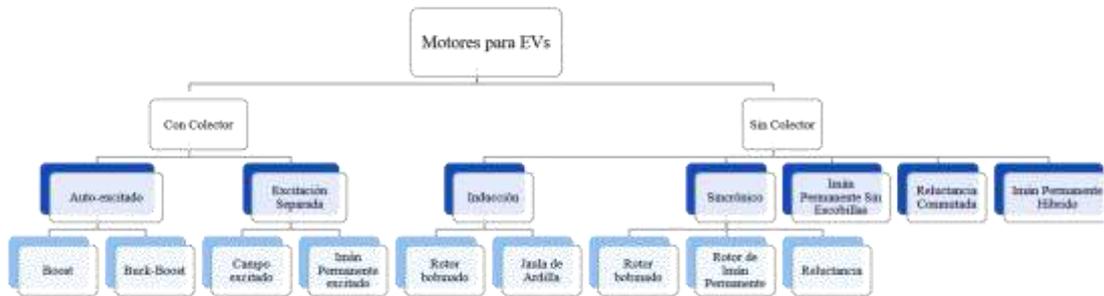
**Fuentes:** (Ehsani et al. 2004).

**Realizado por:** (Mazón 2023).

En la Ilustración 3-2 se muestra el diagrama de bloques funcional de un sistema de propulsión eléctrico. La elección de sistemas de propulsión eléctrico para EVs y HEVs depende de las características del vehículo, la fuente de energía y el perfil de conducción que incluye la aceleración, la velocidad máxima, la capacidad de ascenso, el frenado y la autonomía. El controlador electrónico está conformado por tres unidades funcionales: sensores, circuito de interfaz y procesador. Los sensores permiten traducir las magnitudes medibles (corriente, tensión, temperatura y velocidad) del EV en señales eléctricas a través del circuito de interfaz. Las señales de salida del controlador electrónico suelen amplificarse a través de los circuitos de interfaz para accionar los Mosfets del convertidor de potencia (Ehsani et al. 2004).

Los motores utilizados en un EV requieren arranques y paradas frecuentes, altos índices de aceleración/desaceleración, par elevado y ascenso de pendientes a baja velocidad, par reducido y velocidad de crucero a alta velocidad, y un rango de velocidades de funcionamiento muy amplio.

Como se muestra en la Ilustración 4-2 los tipos de motores para EVs pueden clasificarse en dos grupos principales los motores con conmutador y los motores sin conmutador (Ehsani et al. 2004).



**Ilustración 4-2** : Clasificación de motores eléctricos para aplicaciones de EV y HEV.

**Fuentes:** (Ehsani et al. 2004).  
**Realizado por:** (Mazón 2023).

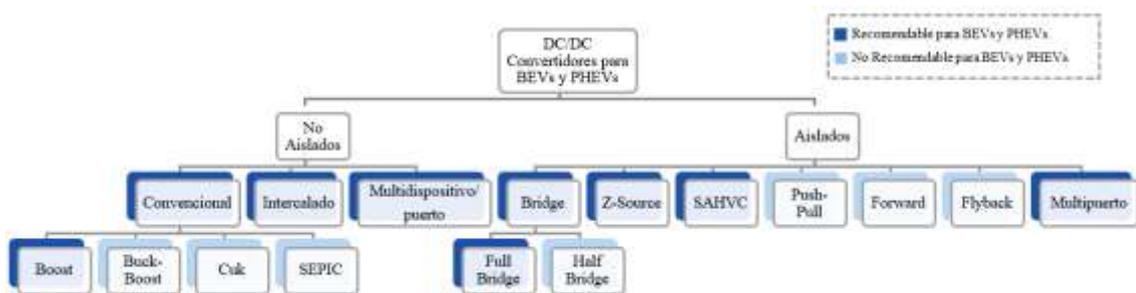
Los motores con conmutador son menos fiables e inadecuados para un funcionamiento sin mantenimiento y a alta velocidad. Este tipo de motores se dividen en motores de excitación en serie, los de excitación en derivación, los de excitación compuesta, los de excitación separada y los de excitación por imán permanente (PM, por sus siglas en inglés). Los motores con conmutador a pesar de tener una baja densidad de potencia específica se han caracterizado por la sencillez de su control y ocupan un lugar destacado en los sistemas de propulsión eléctrica. Por otra parte, y gracias a los avances tecnológicos se han obtenido motores eléctricos sin conmutador los cuales resultan más atractivos para su aplicación en EVs debido a que tienen un mayor rendimiento, una mayor densidad de potencia, un menor coste de funcionamiento, mayor fiabilidad y no requieren mantenimiento en comparación con los motores con conmutador (Ehsani et al. 2004).

## 2.2. Convertidores DC-DC para Vehículos Eléctricos

En la Ilustración 5-2, se muestra la clasificación de los convertidores DC-DC, partiendo desde una clasificación general (Aislados y No Aislados) e indicando las topologías más apropiadas para BEVs y PHEVs (Chakraborty et al. 2019).

Los convertidores DC-DC no aislados se utilizan mayormente en vehículos de media y alta potencia. Gracias a su arquitectura simple, rentabilidad y control asequible, los convertidores Boost DC-DC convencionales y los convertidores Boost DC-DC intercalados se usan comúnmente en BEV y PHEV. Este tipo de convertidores se utiliza para aplicaciones con voltajes bajos y medios, como es el caso del artículo “*Step-Up DC-DC Converters: A Comprehensive Review of Voltage-Boosting Techniques, Topologies, and Applications*” en el cual se emplea un

convertidor DC-DC Boost con una ganancia baja de voltaje DC (<4%). Para un nivel bajo de ganancia de voltaje en DC, hay cuatro tipos de convertidor que cumplen con esta característica: convertidor Boost, convertidor Buck-Boost, convertidor Cúk y convertidor SEPIC. Entre todos los convertidores no aislados, la topología del convertidor Boost es la más requerida para BEV y PHEV debido a que en este tipo de vehículos se requiere solo una ganancia de voltaje positiva (>1) para el accionamiento del motor. Por otro lado, los convertidores no aislados: Buck-Boost, Cúk y SEPIC se pueden usar tanto para la operación de aumento como de reducción de voltaje. Sin embargo, la alta corriente de entrada y el uso de un condensador de filtro de gran volumen hacen que la topología del convertidor Buck-Boost sea un inconveniente en las aplicaciones automotrices (Qiao et al. 2006). Mientras que, el convertidor Cúk y el SEPIC son convertidores de corriente – voltaje -corriente, lo que les hace adecuados para sistemas de almacenamiento de energía (ESSs) en vehículos eléctricos, siempre y cuando las entradas sean una batería y/o un supercondensador (Chakraborty et al. 2019).



**Ilustración 5-2** : Clasificación de topologías de convertidores DC-DC.

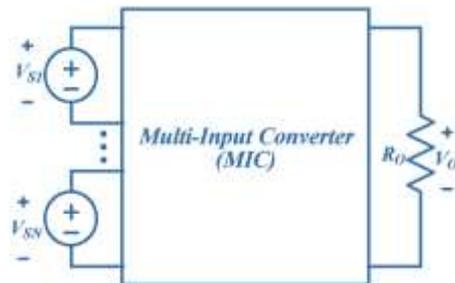
**Fuente:** (Chakraborty et al. 2019)  
**Realizado por:** (Mazón 2023).

Si se requiere un bus de voltaje DC de alta ganancia (> 4%), se puede emplear el convertidor Boost intercalado de 4 fases. Los convertidores Boost intercalados (IBC) tienen una topología mayormente utilizada en VEs, debido a que pueden aumentar el voltaje en una relación de 4:1, con ondas de corriente de entrada y ondas de voltaje de salida mínimas (Chakraborty et al. 2019).

### 2.2.1. *Convertidores DC-DC Basados en Fuentes de Voltajes Pulsantes*

El prototipo por diseñarse en el presente trabajo de titulación tendrá múltiples puertos, estos puertos podrían ser de entrada o salida de energía. En la Ilustración 6-2 se muestra la configuración general de un Convertidor de Múltiple Entrada (MIC, por sus siglas en inglés) el cual tiene varias fuentes de entrada y una sola carga. En un MIC todas las fuentes de entrada pueden suministrar potencia a la carga de forma individual o simultánea. En caso de que solo fuente de entrada alimente al MIC, éste transferirá potencia a la carga individualmente y

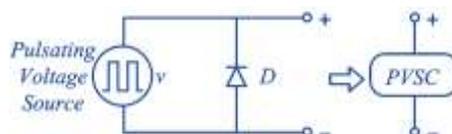
funcionará como lo hace un convertidor por modulación de ancho de pulso (PWM, por sus siglas en inglés). Si más de una fuente de entrada alimenta al MIC, todas estas fuentes entregarán potencia a la carga simultáneamente sin perturbar el funcionamiento entre ellas y no podrán transferir potencia de una de las fuentes de entrada a otra (Liu, Chen 2009).



**Ilustración 6-2** : Topología general de un Convertidor de Múltiple Entrada.

**Fuente:** (Liu, Chen 2009).

En general, un convertidor de modulación PWM puede utilizarse para extraer energía de un puerto de entrada y a su salida la forma de onda de tensión o corriente es un tren de impulsos de alta frecuencia procedente de la parte de entrada o de la parte de amortiguación de energía. Al filtrar esta forma de onda de tensión o corriente de tren de impulsos de alta frecuencia con la porción de salida, se puede obtener una tensión o corriente de corriente directa (DC, por sus siglas en inglés). Desde este punto de vista de la topología del circuito, el método para sintetizar un MIC puede inspirarse en la adición de una fuente de tensión o de corriente pulsante adicional a un convertidor PWM convencional (Liu, Chen 2009).



**Ilustración 7-2** : Configuración del circuito del PVSC y Diagrama conceptual del PVSC.

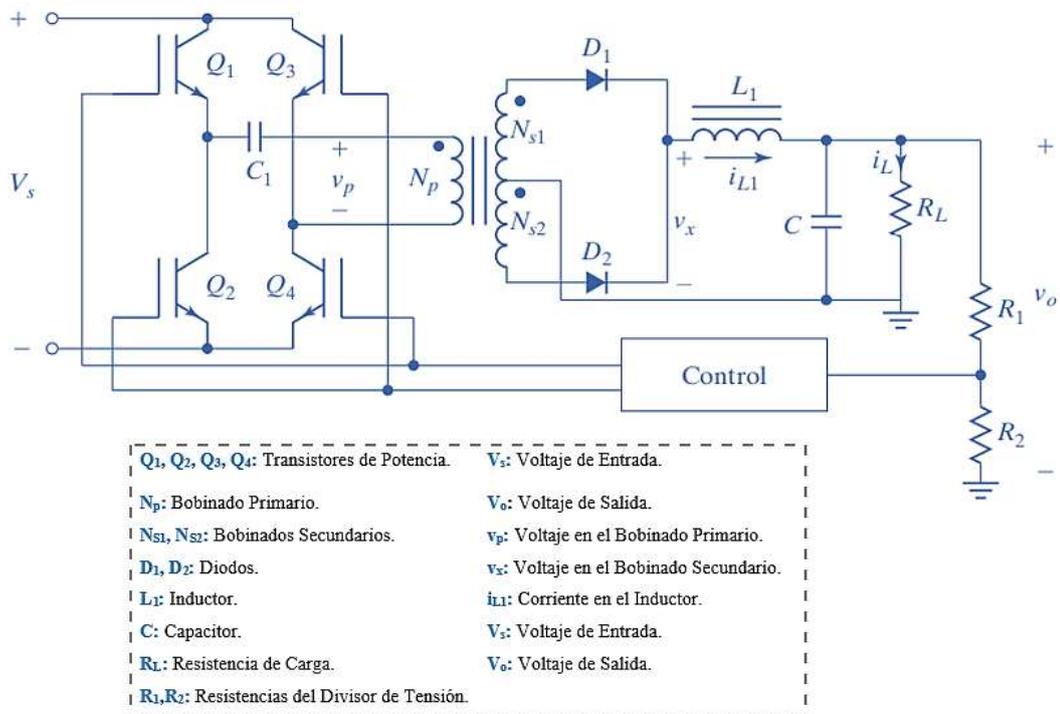
**Fuente:** (Liu, Chen 2009).

En la Ilustración 7-2 , la fuente de voltaje pulsante (PVSC, por sus siglas en inglés) es una fuente de tensión pulsante y el diodo en paralelo. Cuando se introduce un PVSC en un convertidor PWM para producir un convertidor de múltiple entrada, no puede conectarse en paralelo con ninguna rama del convertidor PWM; debido a que la tensión a través de la rama conectada quedará bloqueada por el PVSC introducido. Por lo tanto, un PVSC sólo puede conectarse en serie con una de las ramas de un convertidor PWM para desarrollar un MIC. En esta configuración de circuito, el diodo en paralelo del PVSC se complementa para hacer circular la posible diferencia de corriente entre la fuente de tensión pulsante y la rama conectada del convertidor PWM. De

acuerdo con las propiedades topológicas de los convertidores PWM, la fuente de tensión pulsante puede ser generada por una fuente de tensión continua en serie con un interruptor, una fuente de corriente continua en paralelo con un interruptor seguido de un condensador, o una fuente de tensión continua en serie con un interruptor seguido de un inductor y un condensador en secuencia (Liu, Chen 2009).

### 2.2.2. Full Bridge Unidireccional

La Ilustración 1-2 se muestra la configuración básica de un convertidor de puente completo (Full Bridge, por su denominación en inglés) con cuatro transistores de potencia. En el primer estado los interruptores  $Q_1$  y  $Q_4$  están encendidos, mientras que  $Q_2$  y  $Q_3$  están apagados; en el segundo estado todos los interruptores están apagados; el tercer estado es cuando los interruptores  $Q_1$  y  $Q_4$  están apagados, mientras que  $Q_2$  y  $Q_3$  están encendidos; y finalmente el cuarto estado es cuando todos los interruptores están apagados (Csaki et al. 1980). Para producir un voltaje de salida continuo su señal es aumentada (o disminuida), rectificada y filtrada. El condensador  $C_1$  se utiliza para equilibrar las integrales voltio-segundo durante los dos semiciclos y evitar que el transformador entre en saturación (Rashid 2014).



**Ilustración 1-2:** Circuito de un Convertidor Full-Bridge.

Fuente:(Rashid 2014).

Estados del convertidor Full Bridge Unidireccional:

- **Estado 1:** Q1 y Q4 están encendidos. A la tensión en el devanado secundario se la calcula mediante la siguiente ecuación:

$$V_{se} = \frac{N_s}{N_p} V_s$$

La tensión a través del inductor  $L_1$  viene dada entonces por:

$$v_{L1} = \frac{N_s}{N_p} V_s - V_o$$

La corriente del inductor  $i_{L1}$  aumenta linealmente a razón de:

$$\frac{di_{L1}}{dt} = \frac{v_{L1}}{L_1} = \frac{1}{L_1} \left[ \frac{N_s}{N_p} V_s - V_o \right]$$

con un pico de corriente en inductor  $I_{L1(pk)}$  en el instante  $t = kT$  dado por:

$$I_{L1(pk)} = I_{L1}(0) + \frac{1}{L_1} \left[ \frac{N_s}{N_p} V_s - V_o \right] kT$$

- **Estado 2:** Este estado transcurre en el instante  $kT < t \leq T/2$ , estado durante el que todos los dispositivos de conmutación están apagados. Los diodos  $D_1$  y  $D_2$  se ven obligados a conducir la corriente magnetizante dada al final del estado 1 y la velocidad de caída de  $i_{L1}$  viene dada por:

$$\frac{di_{L1}}{dt} = -\frac{V_o}{L_1} \quad \text{para } 0 < t \leq (0.5 - k)T$$

por lo tanto  $I_{L1}(0) = i_{L1}[t = (0.5 - k)T] = I_{L1(pk)} - V_o(0.5 - k)T/L_1$

- **Estado 3 y 4:** Durante el Estado 3,  $Q_2$  y  $Q_3$  están encendidos, mientras que  $Q_1$  y  $Q_4$  están apagados.  $D_1$  tiene polarización inversa y  $D_2$  conduce. La tensión a través del primario  $V_p$  es igual a  $V_s$ . El Estado 4 es similar al Estado 2, la tensión de salida  $V_o$  se puede hallar a partir de la integral de tiempo de la tensión del inductor  $v_{L1}$  sobre el periodo de conmutación  $T$ . Es decir:

$$V_o = 2 \times \frac{1}{T} \left[ \int_0^{kT} \left( \frac{N_s}{N_p} V_s - V_o \right) dt + \int_{T/2}^{T/2+kT} -V_o dt \right]$$

lo que da  $V_o$  como

$$V_o = \frac{N_s}{N_p} 2V_s k$$

La potencia de salida  $P_o$  viene dada por

$$P_o = \eta P_i = \eta V_s I_{p(avg)} k$$

$$I_{p(avg)} = \frac{P_o}{\eta V_s k}$$

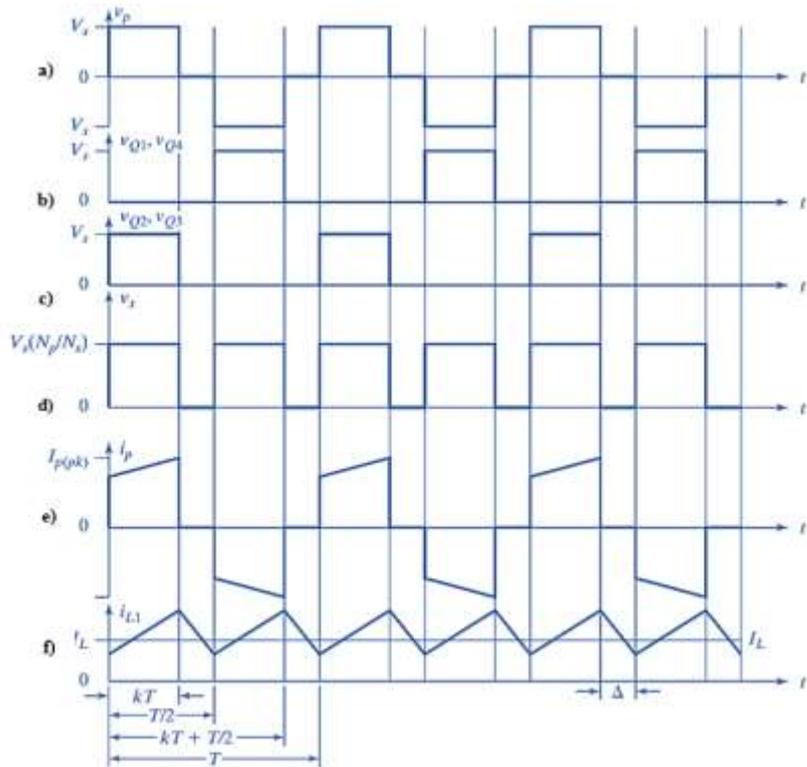
donde  $I_{p(avg)}$  es la corriente primaria media. Despreciando la corriente magnetizante, las corrientes de colector máximas para  $Q1$ ,  $Q2$ ,  $Q3$  y  $Q4$  vienen dadas por

$$I_{C(max)} = I_{p(avg)} = \frac{P_o}{\eta V_s k_{max}}$$

El voltaje de colector máximo para  $Q1$ ,  $Q2$ ,  $Q3$  y  $Q4$  durante la desconexión viene dado por:

$$V_{C(max)} = V_{s(max)}$$

El Convertidor Full Bridge se utiliza para aplicaciones de alta potencia que van de varios cientos a varios miles de kilovatios. Si bien es caro de construir es el que utiliza de forma más eficaz el núcleo magnético y los interruptores semiconductores (Rashid 2014).

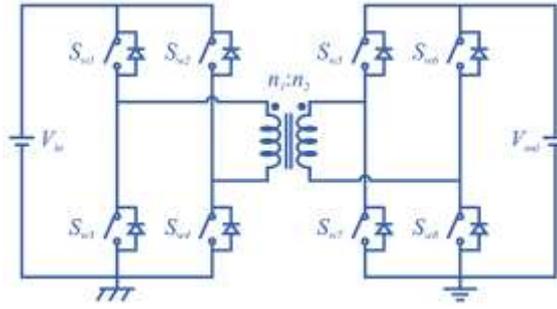


**Ilustración 2-2** : Señales características de a) Voltaje Primario, b) Voltaje en el transistor  $Q_1$ , c) Voltaje en el transistor  $Q_2$ , d) Voltaje Rectificado de Salida, e) Corriente Primaria y f) Corriente en el Inductor  $L_1$ .

Fuente:(Rashid 2014).

### 2.2.3. Full Bridge Bidireccional / DAB

El Convertidor de Doble Puente Activo (DAB, por sus siglas en inglés), se conforma por la combinación de dos convertidores de Full Bridge, interconectados por medio de un transformador de doble devanado. La inductancia de dispersión del transformador juega un papel fundamental en la transferencia de energía entre la entrada y la salida. La arquitectura del DAB, mostrada en la Ilustración 3-2, es la opción predominante en aplicaciones de alta potencia, bidireccionales y con necesidad de amplificación de tensión. Este sistema se compone de dos convertidores de puente completo enlazados mediante un transformador. No obstante, enfrenta ciertas limitaciones como la presencia de fluctuaciones considerables en las corrientes de entrada y salida, lo que impacta negativamente en la durabilidad de las baterías, además de requerir una cantidad considerable de componentes activos, lo que se traduce en un coste significativamente elevado (Roggia et al. 2013).



**Ilustración 3-2** : Convertidor de Doble Punteo Activo.

Fuente:(Roggia et al. 2013).

En la Ilustración 3-2,  $n_1$  y  $n_2$  representan las vueltas del transformador en sus devanados primario y secundario, respectivamente;  $S_{w1}, S_{w2}, S_{w3}, S_{w4}, S_{w5}, S_{w6}, S_{w7}$  y  $S_{w8}$  representan los transistores de potencia; finalmente  $V_{out}$  y  $V_{in}$  representan las tensiones de salida y entrada del convertidor. La operación dentro del rango de potencia de conmutación suave se ve afectada por varios factores, incluida la potencia de salida del convertidor, la relación entre las tensiones de entrada y salida, y el desfase angular. La conmutación suave en ambos convertidores Full Bridge a lo largo de todo el rango de potencia de salida solo ocurre cuando el valor de  $d_{DAB}$  es igual a 1. Por lo contrario, uno de los convertidores Full Bridge produce conmutación disipativa en cierto tramo del rango de potencia (De Doncker, Divan, Kheraluwala 1991).

$$d_{DAB} = \frac{n_1 V_{out}}{n_2 V_{in}}$$

En lo que respecta a las modulaciones del convertidor DAB, la modulación por desplazamiento de fase (PSM, por sus siglas en inglés) tradicional se aplica generalmente debido a su simplicidad, pero presenta limitaciones prácticas, como las restricciones de ángulo de desplazamiento de fase máximo y mínimo. Por ello un esquema de modulación híbrido que consiste en utilizar el PSM para niveles de potencia altos, y otra modulación para niveles de potencia bajos permitirá ampliar el rango de potencia de operación del 16,67 % al 100 %, en lugar del 58,33 % al 100 % que se consigue con PSM tradicional (Wang, Ni, Lee 2016).

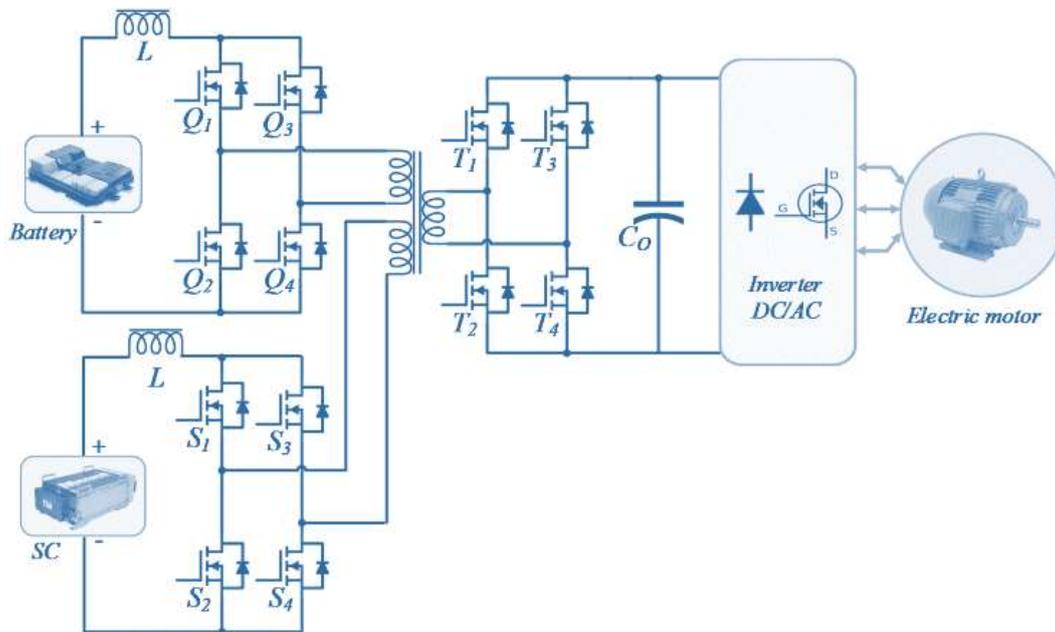
La topología DAB es versátil y se adapta a una amplia gama de aplicaciones, desde tracción eléctrica en vehículos hasta sistemas de generación de energía renovable. Permite la transferencia bidireccional de energía entre las fuentes de corriente continua y la carga, lo que es esencial en aplicaciones que involucran regeneración de energía, almacenamiento de energía o sistemas que requieren intercambio de potencia en ambas direcciones. En este tipo de topología se puede lograr una conmutación más suave, lo que reduce las pérdidas por conmutación y el estrés en los componentes, lo que a su vez puede aumentar la vida útil del sistema (Wang, Ni, Lee 2016).

Sin embargo, esta topología presenta desventajas significativas que deben considerarse. Su complejidad en diseño y control resulta en mayores costos de producción y mantenimiento. La implementación de algoritmos de control avanzados es crucial, añadiendo una capa adicional de dificultad y requerimientos de procesamiento. Además, en condiciones de carga parcial, su eficiencia puede disminuir, resultando en pérdidas de energía. Estos aspectos, combinados con problemas de pérdidas de conmutación y generación de armónicos, pueden limitar su aplicabilidad en ciertos escenarios, lo que subraya la necesidad de una evaluación exhaustiva antes de su implementación (Wang, Ni, Lee 2016).

#### **2.2.4. *Convertidor DC-DC Multipuerto Aislado / TAB***

Tanto la configuración de DAB en su topología, como la estructura de Triple Punte Activo (TAB, por sus siglas en inglés) representan disposiciones avanzadas de convertidores de potencia que se emplean en diversas aplicaciones que demandan alta potencia y un control preciso de la energía. Por otro lado, los Convertidores DC-DC Aislados se emplean frecuentemente en aplicaciones vehiculares con niveles de potencia moderados y bajos. En este contexto, la topología más ampliamente utilizada para las cadenas de tracción de vehículos eléctricos y enchufables es el Convertidor DC-DC Aislado Full Bridge (Kolli et al. 2015). Este diseño se beneficia del Transformador de Alta Frecuencia (HFT), el cual proporciona aislamiento galvánico y una significativa amplificación de la tensión, atributos cruciales en los vehículos eléctricos. El Full Bridge emerge como la disposición de convertidor aislado más apropiada debido a su habilidad para mitigar las sobretensiones tanto en voltaje como en corriente que impactan a los transistores de potencia y diodos. Esta característica no es compartida por otras topologías aisladas. Otra ventaja es que la estructura de diseño del Full Bridge es simple, contribuyendo a mejorar la eficiencia global del sistema con un impacto económico mínimo (Chakraborty et al. 2019).

Los Convertidores DC-DC Multipuerto pueden clasificarse en: Convertidores de Entrada Única y Salida Múltiple (SIMO, por sus siglas en inglés), Convertidores de Entrada Múltiple y Salida Única (MISO, por sus siglas en inglés) y Convertidores de Entrada Múltiple y Salida Múltiple (MIMO, por sus siglas en inglés) (Forouzesh et al. 2017). En los BEV y PHEV se utiliza Convertidores DC-DC Aislados Multipuerto debido a que actúan como un convertidor bidireccional que combina fuentes de energía de diferente potencia y nivel de tensión (supercondensador y batería), como se muestra en la Ilustración 4-2 en la cual  $Q_1, Q_2, Q_3$  y  $Q_4$  representan los transistores en el puerto de la batería;  $S_1, S_2, S_3$  y  $S_4$  representan los transistores en el puerto del supercondensador y  $T_1, T_2, T_3$  y  $T_4$  representan los transistores en el puerto del motor (Chakraborty et al. 2019).



**Ilustración 4-2 :** Convertidor DC-DC Multipuerto.

**Fuente:** (Chakraborty et al. 2019).

El triple puente activo, compuesto por tres pares de transistores conmutados independientemente, permite un control bidireccional y eficiente de la energía en múltiples puertos. Esta característica es esencial para aplicaciones como vehículos eléctricos, donde se necesita una gestión dinámica de la energía proveniente de diferentes fuentes, como baterías y paneles solares. Al integrar esta funcionalidad con la topología Full Bridge en cada puerto, se logra una operación altamente flexible y precisa, permitiendo tanto la conversión de energía como la regulación de voltajes en función de las necesidades específicas (Sakka et al. 2011).

La combinación de un triple puente activo con la topología Full Bridge también presenta ventajas en términos de eficiencia y pérdidas de conmutación. Al permitir el control individualizado de los transistores, se puede minimizar la superposición de conmutación y reducir las pérdidas asociadas. Esto se traduce en una mayor eficiencia global del sistema y una menor generación de calor, lo que a su vez contribuye a la fiabilidad y durabilidad del convertidor. En resumen, los convertidores multipuerto DC-DC aislados con triple puente activo y topología Full Bridge emergen como soluciones prometedoras para aplicaciones de alta eficiencia energética, como vehículos eléctricos y sistemas de almacenamiento de energía, al brindar un control preciso, versatilidad y eficacia en la gestión de múltiples fuentes de energía (Sakka et al. 2011).

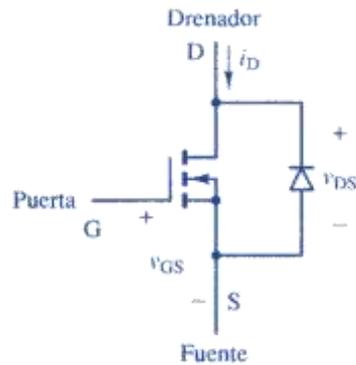
## **2.3. Componentes de un Convertidor DC-DC Multipuerto Bidireccional.**

### **2.3.1. Transistores de Potencia**

En el ámbito de la electrónica de potencia, los interruptores de potencia son componentes cruciales que permiten controlar el flujo de energía en sistemas de alta potencia. Estos interruptores son utilizados para interrumpir o establecer circuitos eléctricos, lo que resulta esencial en aplicaciones donde se requiere la conmutación de grandes corrientes y tensiones. Existen varios tipos de interruptores de potencia, cada uno con sus propias características y ventajas particulares.

En cuanto a los transistores de potencia, se incluyen dispositivos unipolares y bipolares como el diodo de potencia, el Transistor de Unión Bipolar (BJT, por sus siglas en inglés), el Transistor de Efecto de Campo de Metal-Óxido-Semiconductor (MOSFET, por sus siglas en inglés), el Transistor Bipolar de Puerta Aislada (IGBT, por sus siglas en inglés), el Rectificador Controlado de Silicio (SCR, por sus siglas en inglés), el Tiristor de Puerta Apagada (GTO) y el Controlador de Corriente Alterna Triodo (TRIAC, por sus siglas en inglés). La mayoría de los dispositivos semiconductores de potencia disponibles hoy en día están hechos de materiales de silicio o germanio, u otros materiales como el arseniuro de galio, el diamante y el carburo de silicio (Hart 2001). Los SCR y los TRIAC son ideales para aplicaciones de corriente alterna, donde permiten un control eficiente de la corriente eléctrica. Los SCR, por ejemplo, son utilizados en rectificadores controlados y sistemas de calentamiento, mientras que los TRIAC son comúnmente empleados en aplicaciones de control de potencia en iluminación y motores (De Doncker, Divan, Kheraluwala 1991).

Ahora, enfocándonos en los interruptores de potencia más destacados, los Transistor de Efecto de Campo de Metal-Óxido-Semiconductor (MOSFET, por sus siglas en inglés) se presentan como una opción avanzada y versátil. Estos dispositivos, conocidos por su rápida velocidad de conmutación y baja resistencia de encendido, ofrecen un control eficaz de la potencia en aplicaciones de alta frecuencia y sistemas de electrónica de potencia. Su capacidad para operar con voltaje y su baja generación de calor los convierten en una elección preferida en sistemas de vehículos eléctricos, inversores y convertidores DC-DC (De Doncker, Divan, Kheraluwala 1991).



**Ilustración 5-2** : MOSFET (de canal n) con diodo parásito en antiparalelo.

Fuente: (Hart 2001).

Los MOSFET de potencia, Ilustración 5-2, desempeñan un papel fundamental en aplicaciones de acumulación en lugar de empobrecimiento. Cuando una tensión entre la puerta y la fuente alcanza un umbral suficiente, el MOSFET se activa, lo que resulta en una ligera tensión entre el drenador y la fuente. En comparación con los BJT, los MOSFET requieren generalmente un circuito de excitación más simple para su activación y desactivación. Durante el estado de conducción, las variaciones en  $v_{DS}$  exhiben una relación lineal con las variaciones en  $i_D$ , lo que permite modelar el MOSFET en conducción como una resistencia de conducción denominada  $R_{DS(on)}$  (Hart 2001).

En particular, los MOSFET de baja tensión presentan resistencias de conducción que se sitúan por debajo de 0.1 ohmios, mientras que los MOSFET de alta tensión pueden exhibir resistencias de conducción en el rango de varios ohmios. Cabe mencionar que la estructura de los MOSFET conlleva la existencia de un diodo parásito, el cual puede en ocasiones ser aprovechado de manera ventajosa en circuitos de potencia. En términos nominales, estos dispositivos son capaces de soportar tensiones de hasta 1000 [V] y corrientes de hasta 50 [A]. Un aspecto sobresaliente es la rapidez con la que los MOSFET pueden conmutar. Sus velocidades de conmutación superan las de los BJT, lo que los convierte en elementos ideales para su implementación en convertidores operando a frecuencias superiores a 100 kHz (Hart 2001).

Los interruptores de potencia son esenciales para la gestión y control de la energía en sistemas de alta potencia. Desde relés electromecánicos hasta tiristores y MOSFET, cada tipo de interruptor presenta ventajas y características específicas que los hacen adecuados para diferentes aplicaciones. En el caso particular de los MOSFET, su rápida conmutación, baja resistencia de encendido y capacidad de operar con voltaje los convierten en una opción destacada para optimizar la eficiencia y control en sistemas de electrónica de potencia avanzados.

### 2.3.2. *Circuito Driver para Transistores de Potencia*

En el ámbito de la electrónica de potencia, garantizar un control preciso y efectivo de los transistores de potencia resulta crucial para una diversidad de aplicaciones, que van desde sistemas de conversión energética hasta motores eléctricos y dispositivos de alta potencia. Para lograr una conmutación fiable y óptima en estos componentes, se emplean una variedad de circuitos de control, conocidos como "drivers" por su denominación en inglés. Estos circuitos desempeñan un papel central al suministrar niveles apropiados de corriente y voltaje para activar y desactivar los transistores de potencia, asegurando así un funcionamiento seguro y eficiente. En este contexto, se expondrán se describirá de manera general los distintos tipos de circuitos drivers, desde aquellos diseñados para aplicaciones de baja potencia hasta soluciones más avanzadas utilizadas en sistemas de alta potencia, junto con técnicas especializadas como el circuito de Bootstrapping, que mejora la respuesta en frecuencias altas (Khan, Eng 2007).

- **Driver Bipolar:** Este tipo de driver se utiliza para controlar transistores bipolares de potencia, que requieren una corriente significativa para su activación y desactivación. El driver bipolar proporciona la corriente necesaria para saturar y desaturar el transistor bipolar, asegurando una conmutación rápida y eficiente (Khan, Eng 2007).
- **Driver MOSFET:** Los transistores MOSFET son ampliamente utilizados en aplicaciones de potencia debido a su rápida conmutación y baja resistencia en estado activo. El driver MOSFET se encarga de suministrar la carga y descarga de la capacitancia de entrada del MOSFET, garantizando una conmutación precisa y minimizando las pérdidas de energía (Khan, Eng 2007).
- **Driver IGBT:** Los transistores IGBT combinan las características de los transistores bipolares y los MOSFET, lo que los hace adecuados para aplicaciones de alta potencia. El driver IGBT proporciona la corriente y el voltaje necesarios para activar y desactivar el IGBT, asegurando un control eficiente y fiable (Khan, Eng 2007).
- **Optoacopladores:** Los optoacopladores, también conocidos como optoaisladores, utilizan un LED y un fotodetector dentro de un encapsulado para proporcionar aislamiento eléctrico entre la señal de control y la señal de potencia. Esto es especialmente útil en aplicaciones de alta tensión donde se requiere una separación segura entre las partes de control y potencia (Green, Zheng 2022).

- **Transformadores de Pulso:** Estos transformadores están diseñados para proporcionar aislamiento galvánico entre el circuito de control y el circuito de potencia. La señal de control se aplica en el devanado primario, y se induce una señal de potencia amplificada en el devanado secundario. Esta técnica es útil en aplicaciones de alta potencia y alta frecuencia (Green, Zheng 2022).
- **Circuitos Integrados de Alta Potencia (Gate Drivers):** Estos son circuitos integrados diseñados específicamente para controlar y conducir transistores de potencia, como MOSFET e IGBT. Los gate drivers ofrecen niveles precisos de corriente y voltaje para garantizar una conmutación rápida y eficiente de los dispositivos de potencia, al tiempo que pueden incluir funciones de protección contra sobrecorriente y sobretensión (Green, Zheng 2022).
- **Circuito de Bootstrapping:** El circuito de Bootstrapping es una técnica empleada principalmente con transistores MOSFET en aplicaciones de alta frecuencia, como inversores y convertidores de potencia. Consiste en utilizar un condensador para aumentar el voltaje del gate del MOSFET por encima de la tensión de alimentación. Esto permite una conmutación más rápida ya que reduce el tiempo de carga y descarga del gate. Durante la operación, el condensador se carga a través de un camino de baja resistencia y se descarga rápidamente a través del gate del MOSFET, mejorando así su respuesta en frecuencias altas (Fairchild 2008).

Los circuitos drivers desempeñan un papel crucial en la conmutación y el control eficiente de los transistores de potencia en diversas aplicaciones, desde electrónica de baja potencia hasta sistemas de alta potencia y frecuencia. Cada tipo de circuito driver se adapta a las necesidades específicas de la aplicación y contribuye al rendimiento y la fiabilidad del sistema en el que se utilizan.

### **2.3.3. Transformadores de Alta Frecuencia**

Los transformadores de alta frecuencia (AF), Ilustración 6-2, son esenciales en la electrónica de potencia, especialmente en convertidores DC-DC aislados, permitiendo operar eficientemente a frecuencias más altas y reducir el tamaño del núcleo magnético y los devanados. En sistemas de electrónica de potencia, como en vehículos eléctricos y energías renovables, estos transformadores desempeñan un papel crucial al proporcionar aislamiento galvánico y amplificar la tensión de salida. La representación del modelo clásico de un transformador de AF se puede observar en la (Villacián 2012).



**Ilustración 6-2** : Modelo de Transformador AF.

Fuente: (Villacián 2012).

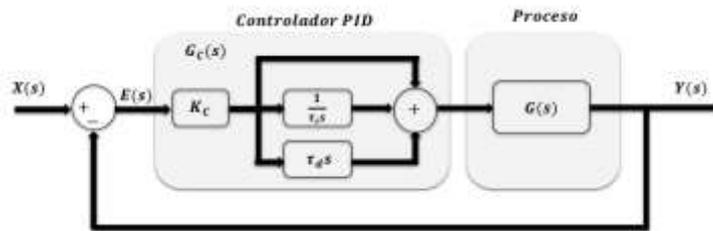
En vehículos eléctricos, los convertidores DC-DC aislados con transformadores de alta frecuencia facilitan la integración de sistemas de alta y baja tensión, maximizando la eficiencia y seguridad. Asimismo, en energías renovables, como la solar y eólica, estos transformadores permiten la conexión a la red eléctrica de manera aislada y eficiente, impulsando la inyección y distribución de energía (Kannan 2017).

La evolución continua de los transformadores de alta frecuencia impulsa mejoras en eficiencia y densidad de potencia en los convertidores DC-DC aislados. Avances en diseño de materiales y control están permitiendo sistemas más compactos y eficientes. En el futuro, estos transformadores seguirán siendo fundamentales, posibilitando aplicaciones avanzadas y sostenibles en diversas industrias de electrónica de potencia (Kannan 2017) .

#### **2.3.4. Controladores de Convertidores DC-DC**

Un controlador es un componente integrado a un sistema dinámico con la intención de enriquecer sus características de rendimiento y cumplir con requisitos de diseño predefinidos, tanto en situaciones transitorias como en estados estables (Nice 2011). Siguiendo esta premisa, las estrategias de control pueden ser definidas como algoritmos propuestos por diversos autores con el propósito de supervisar sistemas que comprenden uno o varios procesos, con el objetivo de mantenerse dentro de los márgenes aceptables o satisfacer condiciones de diseño y necesidades específicas (Ogata 2013).

En esencia, un controlador se incorpora a un sistema para influir en su comportamiento y asegurar que cumpla con los estándares de rendimiento requeridos. Esta adición es crucial para optimizar la respuesta del sistema frente a cambios externos y garantizar que opere de manera eficiente en diversas situaciones, ya sea cuando se encuentra en un estado transitorio o estacionario. Para lograr estos resultados, las estrategias de control desempeñan un papel esencial al proporcionar guías precisas y algoritmos de acción que se basan en análisis y enfoques establecidos (Ogata 2013).



**Ilustración 7-2** : Arquitectura de un sistema controlado por un PID

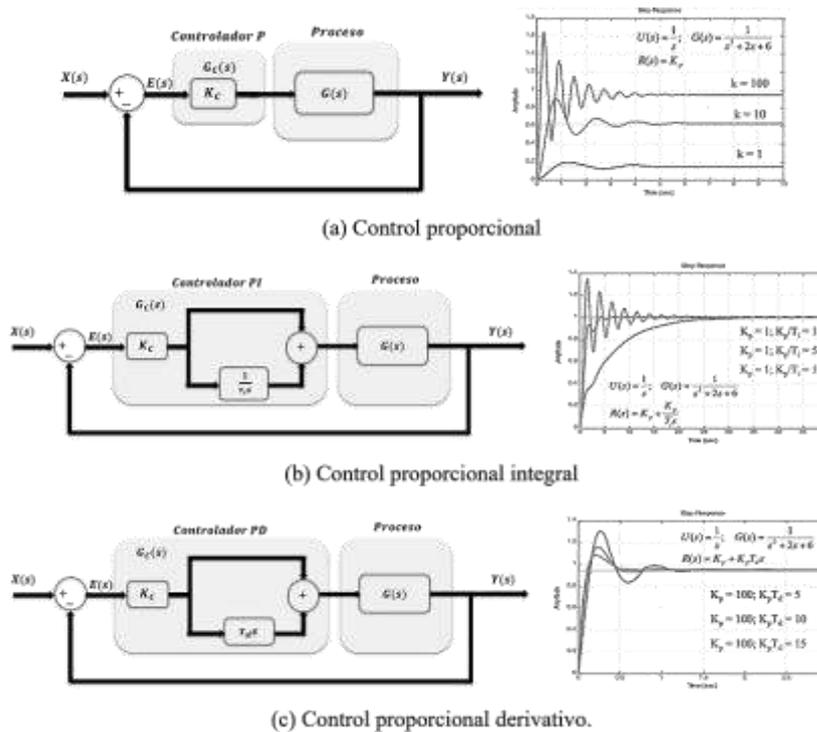
Fuente:(Soldado 2022).

El Control Proporcional Integral Derivativo, comúnmente conocido como control PID, es un método fundamental en la ingeniería de control para regular y estabilizar sistemas dinámicos. Este enfoque se basa en la combinación de tres acciones de control distintas: la acción proporcional (P), la acción integral (I) y la acción derivativa (D). Cada una de estas acciones contribuye de manera única a la capacidad del controlador de ajustarse a diferentes características y desafíos de un sistema en tiempo real (Ogata 2013).

La acción proporcional (P) actúa en función del error presente en el sistema, es decir, la diferencia entre el valor deseado y el valor actual. Esta acción proporciona una respuesta inmediata y proporcional a la magnitud del error, lo que ayuda a reducirlo y a minimizar la oscilación en torno al punto de consigna. Por otro lado, la acción integral (I) considera la acumulación de errores pasados y busca eliminar cualquier desviación persistente entre la salida y la referencia. Esto garantiza la eliminación gradual de los errores acumulados y favorece la estabilidad a largo plazo (Ogata 2013).

La acción derivativa (D), por su parte, se basa en la tasa de cambio del error. Al anticipar las tendencias de comportamiento del sistema, esta acción ayuda a reducir la respuesta a rápidas fluctuaciones en el error, evitando oscilaciones excesivas y contribuyendo a una respuesta más suave y controlada. La combinación de estas tres acciones permite al controlador PID adaptarse de manera dinámica a diferentes condiciones y cambios en el sistema, optimizando la respuesta y asegurando un rendimiento óptimo en términos de precisión y estabilidad (Ogata 2013).

En conjunto, el controlador PID, Ilustración 7-2, es una poderosa herramienta que ha demostrado su eficacia en una amplia gama de aplicaciones industriales y tecnológicas. La selección y ajuste adecuados de los parámetros P, I y D son cruciales para alcanzar un control óptimo en diferentes escenarios, y su implementación ha contribuido de manera significativa al avance y la optimización de sistemas y procesos en la ingeniería moderna.



**Ilustración 8-2** : Arquitectura e incidencia de controladores P, PI, PD.

Fuente: (Soldado 2022).

Por otra parte, en la acción de control P, Ilustración 8-2 (a), se puede apreciar una disminución en el tiempo de elevación y amortiguamiento, acompañada de un incremento en el máximo pico de sobre impulso. A pesar de estas modificaciones, el tiempo de asentamiento apenas experimenta cambios en proporciones mínimas. Además, la implementación de la acción de control P conlleva a una reducción en el error de estado estable, sin afectar el tipo de sistema en cuestión. Al llevar a cabo una acción PI, Ilustración 8-2 (b), en el sistema de control, se logra una reducción en el amortiguamiento y en el tiempo de elevación, mientras que se observa un incremento en el máximo pico de sobre impulso. Estos cambios resultan en mejoras significativas en los márgenes de ganancia y fase, lo que se refleja en el aumento del tipo de sistema en una unidad. Esta adaptación también tiene un impacto positivo en la mejora del error de estado estable, el cual se beneficia directamente del incremento del tipo de sistema. Con una acción PD, Ilustración 8-2 (c), mediante ajustes precisos en el sistema de control, se logra un incremento en el amortiguamiento, a la vez que se reduce el máximo pico de sobre impulso. Estos cambios también conllevan pequeñas variaciones en el tiempo de elevación, sin embargo, se observa una mejora notable en los márgenes de ganancia y fase. Aunque el error de estado estable muestra cambios sutiles, se destaca que el tipo de sistema permanece inalterado en esta adaptación (Nice 2011) (Soldado 2022).

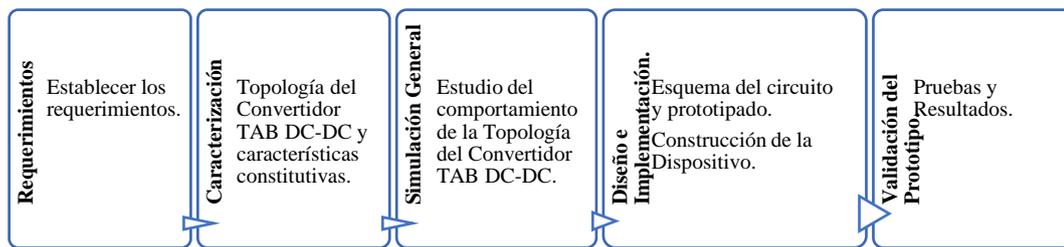
El controlador PID destaca por su versatilidad y eficacia en la ingeniería de control, equilibrando con precisión y estabilidad sistemas diversos. La combinación de acciones proporcional, integral

y derivativa le permite enfrentar cambios y perturbaciones, manteniendo el sistema en su operación óptima. Su adaptabilidad y facilidad de implementación, junto con su rápida respuesta y estabilidad, lo convierten en una herramienta esencial en sistemas industriales y tecnológicos para mejorar la eficiencia y el rendimiento. Además, su capacidad para ajustarse dinámicamente lo hace especialmente valioso en aplicaciones de convertidores utilizados en vehículos eléctricos, donde la eficacia y la precisión son cruciales para optimizar la administración de energía y mejorar la autonomía y la conducción.

## CAPÍTULO III

### MARCO METODOLÓGICO

Las etapas del desarrollo del prototipo se componen de cuatro etapas de desarrollo y finalmente una etapa de validación, según se muestra en la Ilustración 1-3. La primera etapa, guiada por un enfoque inductivo, se basa en la revisión de información existente sobre voltajes, corrientes y potencias de vehículos eléctricos ligeros para establecer los requisitos específicos de cada puerto del convertidor.



**Ilustración 1-3** : Etapas para la creación del prototipo.

Realizado por: (Mazón 2023).

En la segunda etapa, se empleará el método deductivo para calcular con precisión los valores de los componentes necesarios. Utilizando las fórmulas características de la topología Full Bridge, se determinarán las magnitudes óptimas para asegurar el funcionamiento eficiente del Convertidor DC-DC Multipuerto. Este enfoque proporcionará una base sólida y confiable para dimensionar adecuadamente los elementos del prototipo, estableciendo los fundamentos técnicos esenciales.

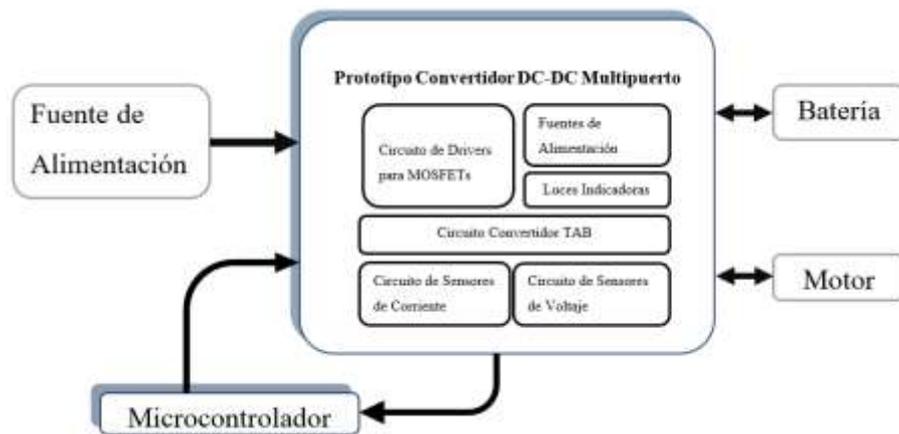
Avanzando al siguiente capítulo, se procederá al diseño e implementación empleando el método analítico. Esta aproximación permitirá una estructuración precisa de los componentes que constituirán el prototipo, garantizando una operación coordinada y eficiente en los puertos del convertidor. Además, se considerará la integración de la tecnología TAB para potenciar la eficiencia y desempeño global del sistema, optimizando aún más su funcionalidad.

Para verificar la eficacia y aplicabilidad del prototipo, se recurrirá al método experimental. A través de pruebas rigurosas y mediciones realizadas en el prototipo implementado, se evaluará su funcionamiento y rendimiento en condiciones reales. Estas pruebas confirmarán la viabilidad del sistema para su aplicación en vehículos eléctricos ligeros y proporcionarán información crucial para afinar y mejorar su diseño en iteraciones futuras, asegurando la calidad y eficiencia del

producto final. En última instancia, este enfoque comprensivo y metódico garantizará que el prototipo cumpla con los estándares de desempeño y seguridad requeridos en el contexto de los vehículos eléctricos.

### 3.1. Requerimientos

El objetivo de esta sección es detallar los parámetros principales con los que deberá cumplir el Convertidor DC-DC Multipuerto. Como se muestra en la Ilustración 2-3 tendrá un flujo de energía unidireccional desde el puerto 1 al puerto 2 y un flujo de energía bidireccional entre el puerto 2 y 3. La potencia a la que se trabajará en cada puerto es aproximadamente 250[W]. En la Tabla 1-3 se indican los voltajes y corriente a los que deberá trabajar cada puerto.



**Ilustración 2-3** : Esquema general del Convertidor DC-DC Multipuerto Bidireccional.

Realizado por: (Mazón 2023).

El diseño del convertidor se centrará en alcanzar eficiencias de conversión superiores al 80% en todos los puertos, garantizando así una transferencia de energía efectiva y minimizando las pérdidas de potencia. Además, se prestará especial atención a la respuesta dinámica del sistema para garantizar una operación estable durante transitorios y cambios en la carga. Se buscará lograr una regulación precisa de los voltajes de salida en cada puerto, asegurando que se mantengan dentro de los rangos establecidos para una operación segura y eficiente del vehículo eléctrico.

En el proceso de diseño, se considerará la selección adecuada de los componentes, incluidos los transistores de potencia, inductores y condensadores, para garantizar la capacidad de manejar las corrientes y tensiones esperadas en cada puerto. Se evaluarán detalladamente las características de conmutación de los transistores, así como la frecuencia de operación, para minimizar las pérdidas de conmutación y maximizar la eficiencia global del sistema. Con un enfoque en la

confiabilidad, se buscará integrar protecciones y circuitos de seguridad para prevenir posibles fallos y salvaguardar tanto el prototipo.

**Tabla 1-3:** Requerimientos del convertidor DC-DC Multipuerto Bidireccional.

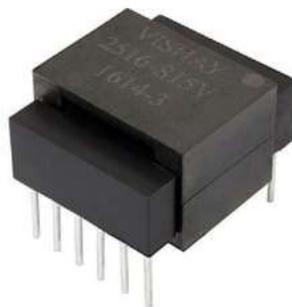
Puerto	Parámetros	Voltajes[V]	Corrientes[A]
1	Línea	170	1.5
2	Batería	48	5.2
3	Motor	48	5.2

Realizado por: (Mazón 2023).

En conjunto, esta sección tiene como propósito establecer las bases para el diseño y desarrollo de un Convertidor DC-DC Multipuerto Bidireccional altamente eficiente y confiable para LEVs. Al abordar meticulosamente los parámetros de diseño, eficiencia, estabilidad y confiabilidad, se busca crear un prototipo que cumpla con los estándares de rendimiento y seguridad requeridos.

### 3.2. Caracterización y Dimensionamiento

En el marco teórico, se estableció con claridad que la naturaleza de los requisitos a cumplir demanda la implementación de un convertidor con capacidad de aislamiento, lo cual se convierte en un aspecto primordial para garantizar el rendimiento y seguridad del sistema. En este contexto, se evidencia que uno de los componentes centrales y críticos del convertidor es el transformador, el cual desempeñará un papel fundamental en el logro de un aislamiento efectivo entre las distintas etapas del circuito y en la optimización de la transferencia de energía en el convertidor de múltiples puertos.



**Ilustración 3-3 :** Transformador Planar Serie MTPL-2516-S24V.

Fuente: (Magnetics 2017).

El Transformador Planar Serie MTPL-2516-S24V, Ilustración 3-3, tiene frecuencias de operación de 100 [kHz] a 500 [kHz], cuenta con un diseño primario dividido para permitir una operación eficiente de 120 [V] o 380 [V], variación parasitaria mínima y un rango de temperatura de funcionamiento -55 °C a +130 °C. Por lo que las características de este transformador cumplen con los requerimientos de trabajo que deberá tener el convertidor (Magnetics 2017).

**Tabla 2-3:** Especificaciones del Transformador Planar Serie MTPL-2516-S24V.

Especificaciones Eléctricas Estándar									
Modelo	Voltaje de Salida [V]	Inductancia Magnetizante y Mínima [ $\mu$ H]	Inductancia de Fuga Máxima [ $\mu$ H]	Capacitancia Envolvente Máxima [pF]	Relación de Transformación Pri: Sec	DCR[m $\Omega$ ]			Corriente Nominal [A]
						2.3 a 4.5	12 a 8	11 a 7	
MTPL-2516-S24V	24	450	1.30	120	0.333	23.0	25	25	12.5

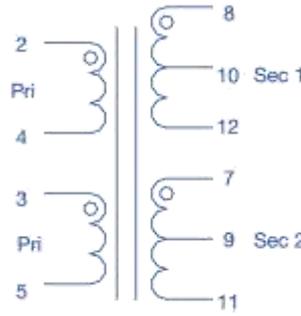
**Fuente:** (Magnetics 2017).

**Realizado por:** (Mazón 2023).

Para asegurar la precisión y validez de las simulaciones, se tomará en cuenta de manera meticulosa los parámetros detallados en la Tabla 2-3. Este enfoque estratégico nos proporcionará la capacidad de generar una simulación que se asemeje en gran medida al comportamiento real del dispositivo en funcionamiento.

Un aspecto especialmente significativo de esta consideración recae en la relación de espiras entre el bobinado primario y secundario del transformador, la cual está establecida en 0.333. La relación de espiras se convierte en un factor determinante en la eficaz transferencia de energía dentro del convertidor, influyendo directamente en las proporciones de tensión y corriente entre las distintas etapas del circuito. Esta consideración es de particular importancia al calcular los parámetros de los bobinados secundarios en relación con el bobinado primario, lo que a su vez afectará la eficiencia, pérdidas y capacidad de aislamiento del transformador. Al emplear esta relación de espiras en las ecuaciones de diseño y análisis, se establece una base sólida para la selección adecuada de inductores, condensadores y otros componentes cruciales del convertidor.

Al ajustar los parámetros y elementos del convertidor conforme a esta relación, se propicia un enfoque integral y riguroso para garantizar que el prototipo final cumpla con los requisitos de rendimiento, eficiencia y aislamiento necesarios para su aplicación en vehículos eléctricos ligeros y otras aplicaciones afines.



**Ilustración 4-3** : Esquemático del Transformador Planar Serie MTPL-2516-S24V.

Fuente: (Magnetics 2017).

En base al esquema de la Ilustración 4-3, la distribución de los puertos considerando la relación de bobinas y la configuración del transformador planar MTPL-2516 será: puerto1 en el primario (Pri) destinado para alimentación de línea, el secundario uno (Sec 1) para el Puerto 2 en el que se conectarán las baterías y el secundario 2 será para el puerto 3 al cual será conectado el motor. Debido a que este transformador está diseñado para aplicaciones de convertidores Full Bridge y Half Bridge de 150 W a 300 W, promete ser la opción idónea para el convertidor.

Una vez establecidos los valores de frecuencia de conmutación, potencia y voltaje a la que trabajarán los puertos, se calculan las corrientes, capacitancias e impedancias; para ello se utilizarán las ecuaciones características de la topología Full Bridge descritas en el Marco Teórico.

$$P = 250 [W]$$

$$F_{SW} = 100k[H]$$

$$V_o = 48[V]$$

$$V_{OUT} = 2V_{IN} \left( \frac{N_S}{N_P} \right) D$$

Se calcula la corriente  $I_1$ , que tendrá el Puerto 2 cuando la energía circule desde el Puerto 1. Igualmente se encuentra el ciclo de trabajo  $D_{3 \rightarrow 1}$  en relación con las espiras del transformador. Se utiliza la relación de espiras del Transformador Planar MTPL-2516 para remplazar la relación  $N_P/N_S$ ; para calcular la inductancia  $L_{X_1}$  y capacitancia  $C_{X_1}$  se determina la variación de corriente  $\Delta I_1$ .

$$I_1 = \frac{250}{170} \approx 1.47[A]$$

$$D_{3 \rightarrow 1} = \frac{V_{OUT}}{2V_{IN}} \left( \frac{N_P}{N_S} \right) = \frac{48}{2 \times 170} \left( \frac{3}{1} \right) = 0.42; \quad \Delta I_1 = 0,2 \times I_1 \approx 0,29[A]$$

$$L_{X_1} = \frac{V_{OUT}(0,5 - D)}{\Delta I_1 \times F_{SW}} = \frac{48(0,5 - 0.42)}{0,29 \times 100 \times 10^3} \approx 36.92\mu[H]$$

$$C_{x_1} = \frac{1 - 2D}{32 \times F_{SW}^2 \times L_{X_1} \times \frac{\Delta V_0}{V_0}} = \frac{1 - 2 \times 0.42}{32 \times (100 \times 10^3)^2 \times (37 \times 10^{-6}) \times 0.01} \approx 1.35 \mu[F]$$

Se calcula la corriente  $I_2$ , que tendrá el Puerto 3 cuando la energía circule desde el Puerto 2. Igualmente se encuentra el ciclo de trabajo  $D_{2 \rightarrow 1}$  en relación con las espiras del transformador.

$$I_2 = \frac{250}{48} \approx 5.21[A]$$

$$D_{2 \rightarrow 1} = \frac{V_{OUT}}{2V_{IN}} \left( \frac{N_P}{N_S} \right) = \frac{48}{2 \times 170} \left( \frac{1}{1} \right) = 0.5$$

Debido a que es necesario para representar en las etapas de la simulación tanto las baterías como el motor, se calcula una resistencia de  $9.21[\Omega]$ , considerando que:

$$R = \frac{V_{OUT}}{I_1} = \frac{48}{5.21} \approx 9.21[\Omega]$$

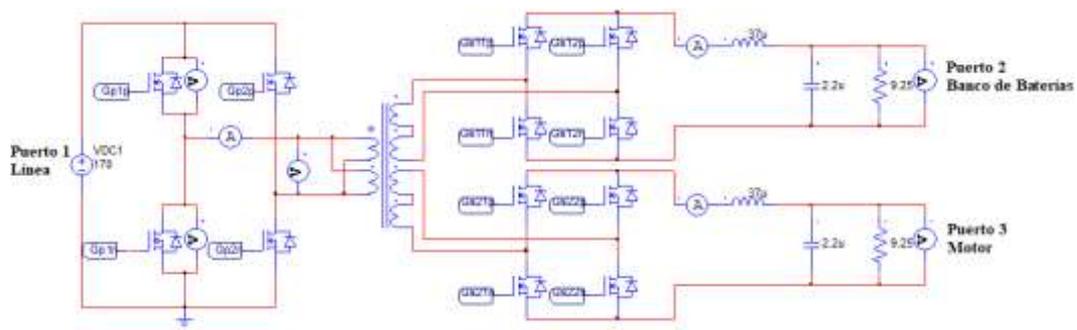
### 3.3. Simulación General

Para tener una idea del desempeño, se implementa el Convertidor DC-DC Multipuerto Bidireccional en el entorno de simulación PSIM; con el objetivo de analizar las gráficas descriptivas de cada etapa. Para ello se deberá considerar los parámetros del transformador, por ello en base a la Tabla 2-3 se completan los parámetros en la simulación, como se muestra en la Ilustración 5-3.

Parameter	Value	Display	Parameter	Value	Display
Name	MTPL-2516-S24W	<input type="checkbox"/>	Ls_4 (sec. 4 leakage)	0.3u	<input type="checkbox"/>
Rp_1 (primary 1)	4m	<input type="checkbox"/>	Lm (magnetizing)	0.5	<input type="checkbox"/>
Rp_2 (primary 2)	4m	<input type="checkbox"/>	Np_1 (primary 1)	3	<input type="checkbox"/>
Rs_1 (secondary 1)	4m	<input type="checkbox"/>	Np_2 (primary 2)	3	<input type="checkbox"/>
Rs_2 (secondary 2)	4m	<input type="checkbox"/>	Ns_1 (secondary 1)	0.5	<input type="checkbox"/>
Rs_3 (secondary 3)	4m	<input type="checkbox"/>	Ns_2 (secondary 2)	0.5	<input type="checkbox"/>
Rs_4 (secondary 4)	4m	<input type="checkbox"/>	Ns_3 (secondary 3)	0.5	<input type="checkbox"/>
Lp_1 (pri. 1 leakage)	1.7u	<input type="checkbox"/>	Ns_4 (secondary 4)	0.5	<input type="checkbox"/>
Lp_2 (pri. 2 leakage)	1.7u	<input type="checkbox"/>			
Ls_1 (sec. 1 leakage)	0.3u	<input type="checkbox"/>			
Ls_2 (sec. 2 leakage)	0.3u	<input type="checkbox"/>			
Ls_3 (sec. 3 leakage)	0.3u	<input type="checkbox"/>			

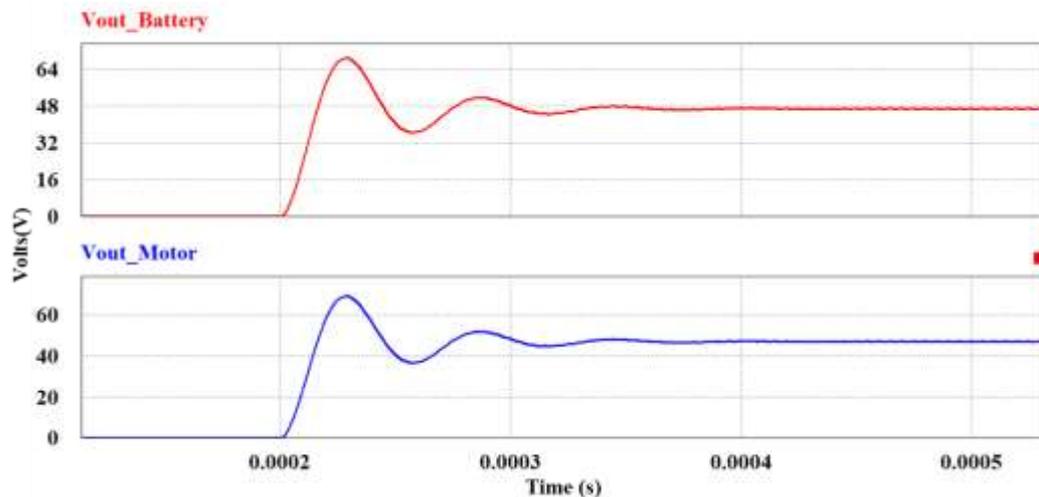
**Ilustración 5-3** : Parámetros del transformador MTPL-2516 en la simulación PSIM.

En la Ilustración 6-3 se muestra la topología Full Bridge que se usará en cada puerto y una composición general de TAB para el Convertidor DC-DC Multipuerto Bidireccional. En esta representación se pretende ver el comportamiento de las señales de salida para cuando todos los puertos del convertidor estén activos.

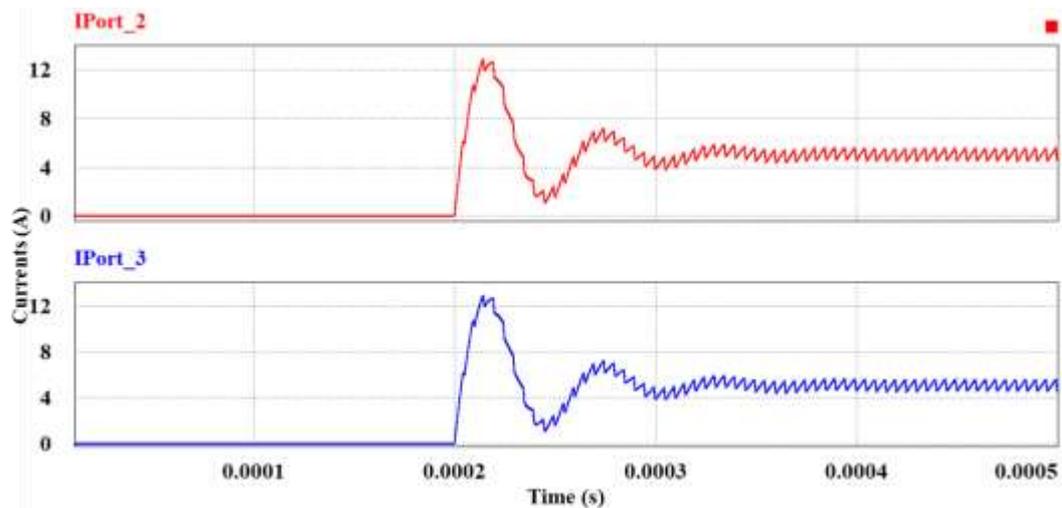


**Ilustración 6-3** : Convertidor DC-DC Multipuerto Bidireccional con topología Full Bridge, en el entorno PSIM.

Según las gráficas mostradas en la Ilustración 7-3 que representan el comportamiento de los voltajes de salida de las baterías y el motor, en el estado transitorio los voltajes alcanzan un pico de 69.10[V] y en el estado estacionario se estabilizan en 46.82[V] a los 0.4 [ms]. En base a las gráficas mostradas en la Ilustración 8-3 el comportamiento de las corrientes en el puerto 2 y 3, en el estado transitorio las corrientes alcanzan un pico de 12.89[A] y en el estado estacionario se estabiliza en 5.22[A] a los 0.4 [ms].

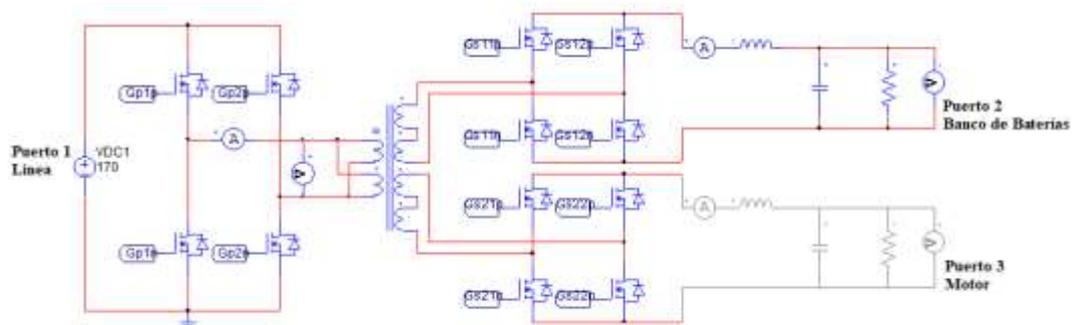


**Ilustración 7-3** : Voltajes de Salida con los tres puertos activos. Voltaje de las Baterías (señal en color rojo) y Voltaje del Motor (señal en color azul).

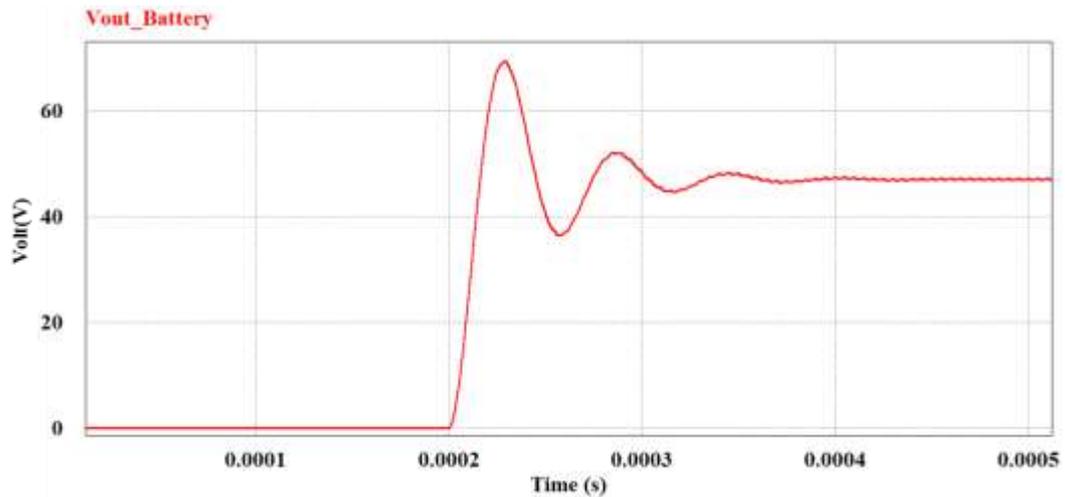


**Ilustración 8-3** : Corrientes en los Puertos 2 y 3, con los dos puertos bidireccionales activos. Corriente en el Puerto 2 (Señal en color rojo) y Corriente en el Puerto 3 (Señal en color azul).

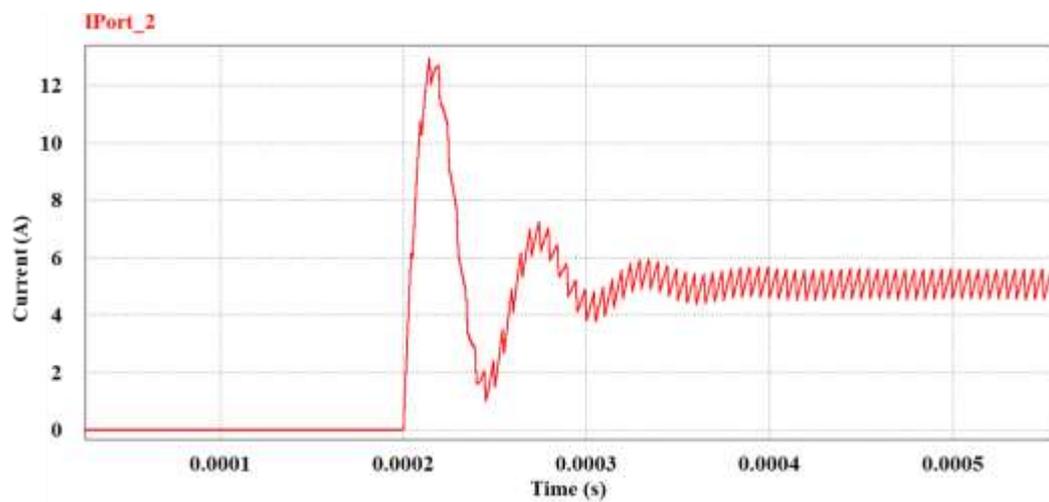
En la Ilustración 9-3 se ejemplifica la carga del LEV desde la red es decir el abastecimiento de energía en las baterías desde línea, por ello los únicos puertos activos son el 1 y 2. La gráfica mostrada en la Ilustración 10-3, representa el comportamiento del voltaje en las baterías mientras se cargan, en el estado transitorio el voltaje alcanza un pico de 69.45[V] y en el estado estacionario se estabilizan en 46.97[V] a los 0.4 [ms]. La gráfica mostrada en la Ilustración 11-3, representa el comportamiento de la corriente en las baterías en el estado transitorio la corriente alcanza un pico de 12.95[A] y en el estado estacionario se estabiliza en 5.15[V] a los 0.4 [ms].



**Ilustración 9-3** : Convertidor DC-DC Multipuerto Bidireccional con topología Full Bridge con el puerto 3 desactivado, en el entorno PSIM.

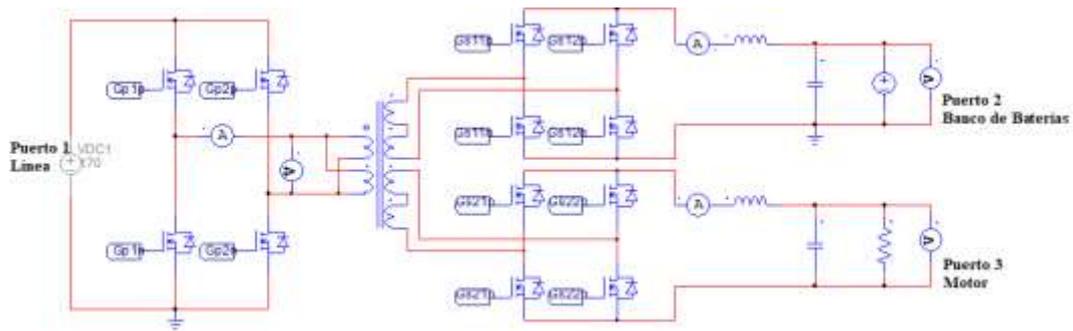


**Ilustración 10-3:** Voltaje de Salida cuando se encuentra deshabilitado el puerto 3; la señal en color rojo representa al Voltaje en las Baterías durante esta etapa.

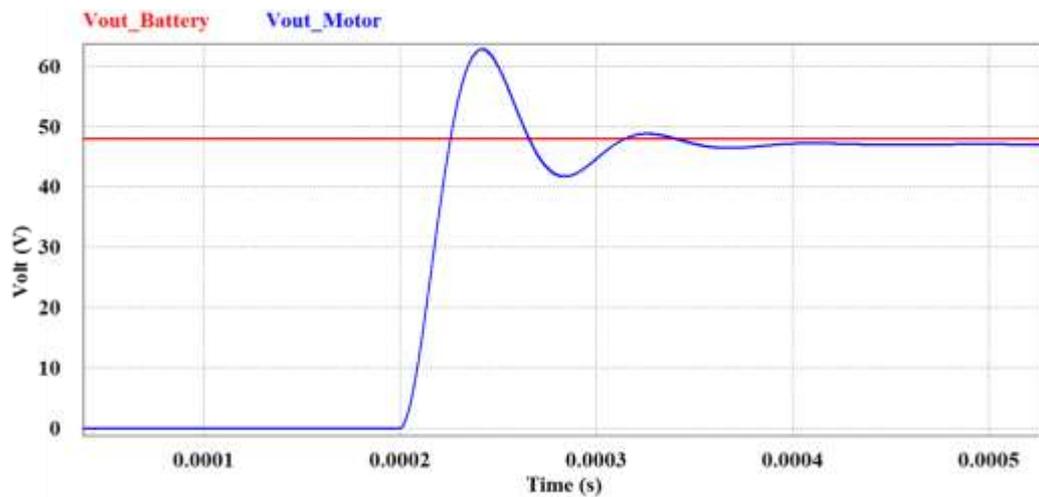


**Ilustración 11-3:** Corriente en el Puerto 2 cuando se encuentra deshabilitado el puerto 3; la señal en color rojo representa el comportamiento de la corriente en el puerto.

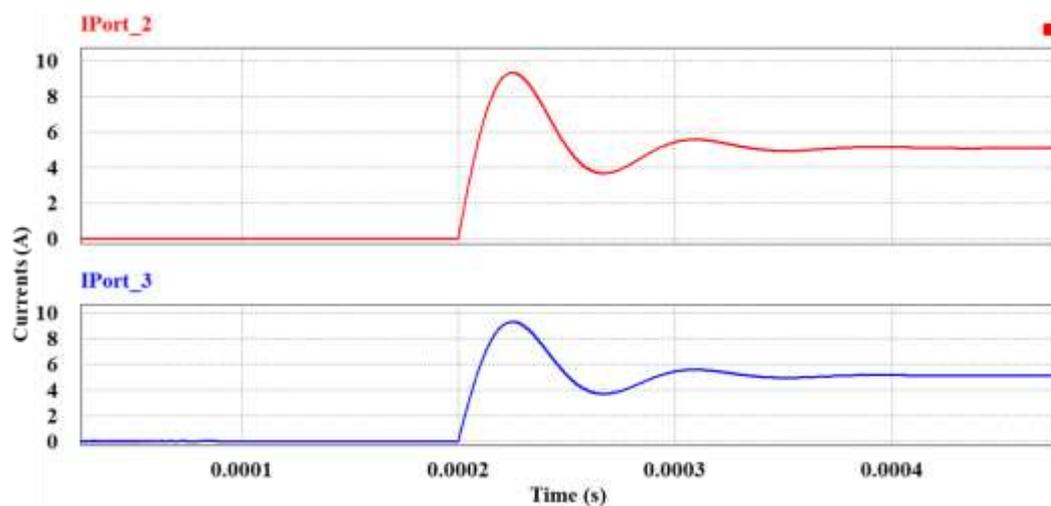
En la Ilustración 12-3 se ejemplifica el abastecimiento de energía desde las baterías hacia el motor, por lo que en el puerto encuentra deshabilitado. La gráfica mostrada en la Ilustración 13-3, representa el comportamiento del voltaje en el motor cuando es abastecido por las baterías con un voltaje de 48[V], en el estado transitorio el voltaje alcanza un pico de 62.79[V] y en el estado estacionario se estabilizan en 46.98[V] a los 0.4 [ms], como se muestra en la Ilustración 13-3. En la Ilustración 14-3, se representa el comportamiento de las corrientes en el puerto 1 y 2 de las cuales en el estado transitorio las corrientes alcanzan un pico de 9.34[A] y en el estado estacionario se estabiliza en 5.12[A] a los 0.43 [ms].



**Ilustración 12-3:** Convertidor DC-DC Multipuerto Bidireccional con topología Full Bridge cuando se encuentra deshabilitado el puerto 3, en el entorno PSIM.



**Ilustración 13-3:** Voltajes cuando se encuentra deshabilitado el puerto 3. Voltaje de las Baterías (Señal en color rojo) y Voltaje del Motor (Señal en color azul).



**Ilustración 14-3:** Corrientes en los Puertos 2 y 3, cuando se encuentra deshabilitado el puerto 3. Corriente en el Puerto 2 (Señal en color rojo) y Corriente en el Puerto 3 (Señal en color azul).

La elección específica de la topología Full Bridge con Triple Puente Activo para el Convertidor Multipuerto DC-DC en vehículos eléctricos ligeros (LEVs) se basa en su capacidad sobresaliente para proporcionar una solución altamente eficiente y versátil. Esta configuración permite la gestión precisa y coordinada de tres puertos distintos, lo que facilita la integración eficaz de sistemas de alta y baja tensión. El Triple Puente Activo desempeña un papel crucial al garantizar una conmutación rápida y eficiente de los transistores de potencia, minimizando las pérdidas asociadas con la conmutación y maximizando la eficiencia energética en todo el sistema.

La topología Full Bridge, en combinación con el Triple Puente Activo, ofrece la capacidad de invertir voltajes y generar tensiones de polaridades opuestas con un alto grado de control y precisión. Esto se traduce en una capacidad de regulación más avanzada y flexible en cada uno de los puertos del convertidor. La inversión de voltajes y la generación precisa de tensiones son esenciales para mantener los voltajes de salida dentro de los rangos necesarios para el funcionamiento seguro y eficiente de los LEVs.

La eficiencia energética se ve impulsada por la capacidad de coordinación entre los puertos, permitiendo una gestión óptima de la energía en diferentes partes del sistema. Esta topología no solo proporciona una solución eficiente, sino que también garantiza una regulación avanzada que se adapta a las necesidades específicas de los LEVs. En resumen, la elección de la topología Full Bridge con Triple Puente Activo se traduce en un rendimiento superior, una mayor eficiencia y una gestión más efectiva de la energía en el contexto de los Convertidores Multipuerto DC-DC para vehículos eléctricos ligeros.

## CAPÍTULO IV

### PROPUESTA Y DISEÑO DE PROTOTIPO

La elección precisa de hardware y software desempeña un papel crucial en el desarrollo eficiente de un Prototipo Convertidor DC-DC Multipuerto Bidireccional destinado a aplicaciones en Vehículos Eléctricos Ligeros (LEVs). Esta selección meticulosa es esencial debido a la complejidad inherente de los sistemas de conversión de energía en vehículos eléctricos, donde múltiples puertos y componentes interconectados interactúan dinámicamente, influyendo directamente en la eficiencia y confiabilidad del convertidor.

Asimismo, el diseño óptimo del prototipo requiere una integración coherente de hardware y software para facilitar una comunicación eficaz entre los distintos puertos y componentes. La sincronización precisa entre las operaciones de conversión y la capacidad de respuesta del software son esenciales para garantizar un rendimiento consistente y una adaptabilidad fluida a las demandas cambiantes de energía en los LEVs. Este enfoque integral no solo optimiza la eficiencia energética, sino que también contribuye a la durabilidad y longevidad del sistema en diversas condiciones de operación.

#### 4.1. Selección de Hardware

En el ámbito del hardware, la elección de componentes de calidad y específicos para la aplicación garantiza un rendimiento confiable y seguro. Desde transistores de potencia de alta eficiencia hasta inductores y condensadores adecuados, cada elemento debe ser seleccionado cuidadosamente para soportar las demandas de corriente, voltaje y frecuencia del sistema. Asimismo, la correcta elección del hardware contribuye a la minimización de pérdidas y a la optimización de la densidad de potencia, permitiendo un funcionamiento eficiente y compacto del convertidor.

##### 4.1.1. Tarjeta de Desarrollo

Dado que la tarjeta STM32F767ZIT6U estaba disponible en el Grupo de Investigación en el que se desarrolla el proyecto, se procedió a analizar sus características en comparación con la Arduino MEGA 2560, como se detalla en la Tabla 1-4 . Este análisis se llevó a cabo con el propósito de fundamentar la decisión de no adquirir otra tarjeta.

A raíz del análisis efectuado en la Tabla 1-4 , se concluye que la tarjeta de desarrollo elegida para este proyecto es la STM32F767ZIT6. Esta selección se justifica por su disponibilidad en el laboratorio donde se está llevando a cabo el proyecto, lo que permite llevar a cabo pruebas de programación de manera inmediata, incluyendo la adquisición de datos de sensores y la generación de señales PWM. A pesar de que la STM32F767ZIT6U presenta como principal desventaja su tamaño físico, esta problemática se resolverá eficientemente mediante su disposición en el diseño del prototipo, asegurando que ocupe un espacio mínimo (STMicroelectronics 2018).

**Tabla 1-4** : Comparativa entre tarjetas de desarrollo.

<b>Características</b>	<b>Arduino MEGA 2560 Rev 3</b>	<b>STM32F767ZIT6U</b>
<b>Núcleo</b>	AVR® 8-Bit Microcontroller	ARM® 32-bit Cortex®-M3 CPU (120 MHz max)
<b>Memorias</b>	64K/128K/256KBytes de memoria flash autoprogramable en el sistema.  EEPROM de 4Kbytes.  SRAM interna de 8Kbytes.	Hasta 1 Mbyte de memoria Flash.  512 bytes de memoria OTP.  Hasta 128 + 4 Kbytes de SRAM.
<b>Puertos</b>	54/86 puertos de E/S programables.	Hasta 140 puertos de E/S con capacidad de interrupción.
<b>Tipo de interfaz</b>	USART, USB	UART, USB.
<b>Voltaje de Alimentación.</b>	5 V	3.3 V, 5 V, 7 V a 12 V
<b>Ancho de bus de datos.</b>	8 bit	32 bit
<b>Peso</b>	52g	300g

**Realizado por:** (Mazon 2023).

**Fuentes:**(Appiani 2022)(STMicroelectronics 2018).

En la Ilustración 1-4 se detallan las características de la tarjeta STM32 Nucleo-144, resaltando su asequibilidad y alta adaptabilidad. Con 25 interfaces de comunicación serial, ID exclusivo de 96 bits y acelerador (ART Accelerator™), proporciona una base sólida para la implementación precisa del prototipo en LEVs (STMicroelectronics 2018).



**Ilustración 1-4:** Tarjeta de Desarrollo STM32F767ZIT6U.  
**Fuente:** (STMicroelectronics 2018).

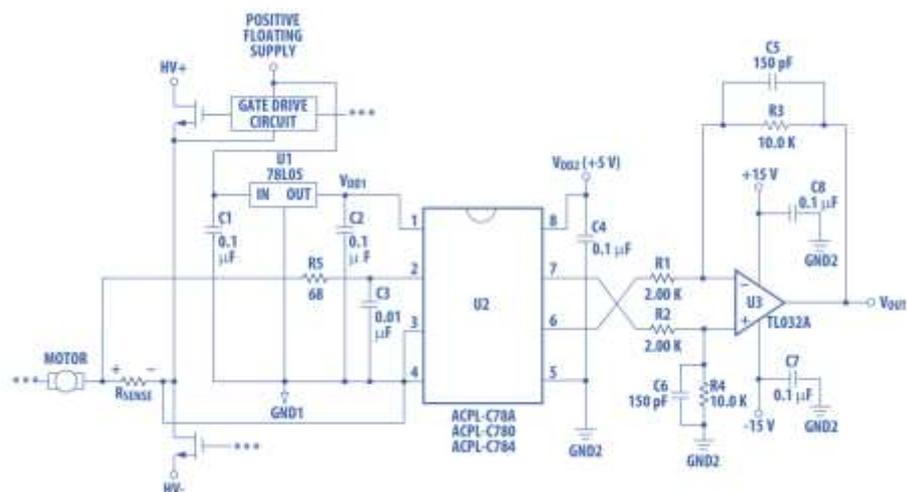
#### **4.1.2. Sensor de Voltaje**

En la elección del Sensor de Voltaje, es fundamental priorizar su capacidad para operar de manera precisa y confiable con los voltajes específicos que se esperan en cada uno de los puertos del Convertidor DC-DC Multipuerto. La selección de este sensor se guía por la necesidad de capturar de manera exacta las tensiones presentes en los diferentes puntos del sistema, lo cual es crucial para asegurar un monitoreo y control efectivos de las condiciones eléctricas en tiempo real. El Sensor de Voltaje elegido debe proporcionar mediciones consistentes y de alta precisión, contribuyendo así a un desempeño óptimo del prototipo y a la eficiencia global enfocado en la aplicabilidad de este en un LEV.



**Ilustración 2-4:** Sensor de Voltaje ACPL-C780-000E.  
**Fuente:** (Avago 2013).

La serie de amplificadores de aislamiento ACPL-C78A/C780/C784, Ilustración 2-4, ha sido concebida con el propósito de proporcionar una detección precisa de corriente en sistemas de accionamiento de motores electrónicos. En una configuración típica, las corrientes del motor circulan a través de una resistencia externa, lo que conduce a la aparición de una caída de tensión analógica detectada por los dispositivos ACPL-C78A/C780/C784. Al atravesar la barrera de aislamiento óptico de estos componentes, se origina una señal de salida diferencial. Esta señal puede ser transformada en una señal de un solo extremo mediante la utilización de un amplificador operacional, según se presenta en el esquema de aplicación recomendado, Ilustración 3-4. Dado el escenario común de oscilaciones de tensión con modulación de alrededor de varios cientos de voltios en intervalos de tiempo en el rango de nanosegundos, que es característico de los modernos accionamientos de motores con inversores de conmutación, el diseño del ACPL-C78A/C780/C784 incorpora la capacidad de desconsiderar transitorios de alta velocidad en modo común, con tasas de cambio del orden de al menos  $10 \text{ kV}/\mu\text{s}$  (Avago 2013).



**Ilustración 3-4 :** Circuito recomendado para el Sensor de Voltaje ACPL-C780-000E.

**Fuente:** (Avago 2013).

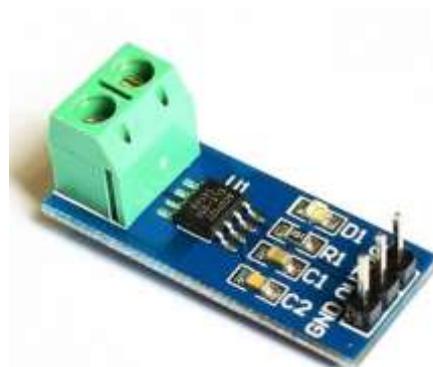
El método recomendado para conectar el ACPL-C78A/C780/C784 a la resistencia de detección de corriente se muestra en la Ilustración 3-4.  $V_{IN+}$  (pin 2 del ACPL-C78A/C780/C784) se conecta al terminal positivo de la resistencia de detección, mientras que  $V_{IN-}$  (pin 3) se cortocircuita a GND1 (pin 4), con el camino de retorno del suministro de energía funcionando como la línea de detección hacia el terminal negativo de la resistencia de detección de corriente. Esto permite utilizar un par único de pistas en la placa de circuito impreso para conectar el circuito ACPL-C78A/C780/C784 a la resistencia de detección. Al referenciar el circuito de entrada al lado negativo de la resistencia de detección, cualquier transitorio de ruido inducido por la corriente de carga en la resistencia se visualiza como una señal de modo común y no interferirá con la señal de detección de corriente. Esto es importante debido a que las grandes corrientes de carga que

fluyen a través del accionamiento del motor, junto con las inductancias parasitarias inherentes en el cableado del circuito, pueden generar tanto picos de ruido como desviaciones que son relativamente grandes en comparación con las pequeñas tensiones que se miden a través de la resistencia de detección de corriente (Avago 2013).

El amplificador operacional en el circuito externo de post-amplificación debe ser preciso para no contribuir significativamente a la desviación en comparación con el amplificador de aislamiento. Además, requiere un ancho de banda y velocidad de subida adecuados para no afectar negativamente la velocidad de respuesta del circuito. El filtro paso bajo, compuesto por los condensadores C5 y C6, ajusta el ancho de banda del post-amplificador respecto a la ganancia, reduciendo el ruido de salida del amplificador de aislamiento. Los resistores de ajuste de ganancia deben tener una tolerancia del 1% o mejor para garantizar un adecuado rechazo de modo común y una tolerancia de ganancia apropiada para el circuito. Se pueden emplear redes de resistores con tolerancias de relación mucho mejores que las alcanzables con resistores discretos. Una red de resistores también reduce el número total de componentes en el circuito y el espacio en la placa requerido. La salida del diagrama  $V_{OUT}$  deberá ser conectada a un pin del Microcontrolador para la adquisición de datos a través de la conversión analógica – digital (Avago 2013).

#### ***4.1.3. Sensor de Corriente***

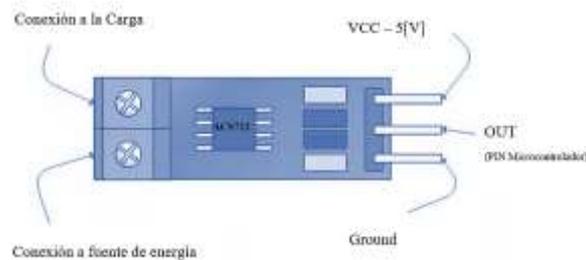
Igualmente, que en la elección del Sensor de Voltaje el Sensor de Corriente para cada puerto se fundamenta en la necesidad de obtener mediciones exactas y confiables de las corrientes eléctricas circulantes, lo que resulta esencial para garantizar un control y monitoreo preciso de las condiciones de corriente en tiempo real. La elección cuidadosa de un sensor de corriente adecuado no solo contribuirá a un desempeño óptimo del prototipo en términos de eficiencia y seguridad, sino que también permitirá maximizar la eficacia energética y la fiabilidad, asegurando así una integración efectiva de la tecnología del convertidor.



**Ilustración 4-4:** Sensor de Corriente ACS712

Fuente: (Openplatform 2019).

El Sensor de Corriente ACS712, Ilustración 4-4, proporciona soluciones económicas y precisas para la detección de corriente DC en sistemas industriales, comerciales y de comunicaciones. El paquete del dispositivo permite una implementación sencilla por parte del cliente. Las aplicaciones típicas incluyen el control de motores, detección y gestión de cargas, fuentes de alimentación conmutadas y protección contra sobre corriente (Openplatform 2019).



**Ilustración 5-4 :** Conexión del Sensor de Corriente ACS712.

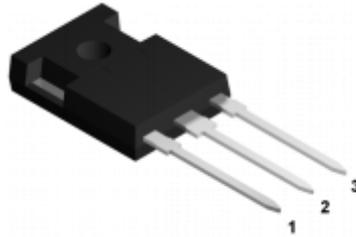
**Fuente:** (Openplatform 2019).

En la Ilustración 5-4, se muestra la conexión que se debe realizar en cada pin del módulo, el pin OUT deberá ser conectado a un pin del Microcontrolador para la adquisición de datos a través de la conversión analógica – digital. En el módulo, la corriente aplicada que fluye a través de la trayectoria de conducción de cobre ubicada cerca de la superficie del integrado genera un campo magnético que es detectado por el circuito de efecto Hall y convertido en un voltaje proporcional. La precisión del dispositivo se optimiza mediante la proximidad de la señal magnética al transductor Hall. El Sensor opera con un voltaje de alimentación nominal de 5 [V] y ofrece un Rango de Medición de -30 a +30 [A]. Cuando no hay corriente circulando, el voltaje es de 2.5 [V], y su factor de escala es de 66 milivoltios por amperio, permitiendo una medición precisa de corrientes en una amplia gama (Openplatform 2019).

#### **4.1.4. Transistores de Potencia.**

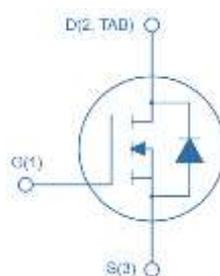
El MOSFET SCTWA35N65G2V de potencia de carburo de silicio de segunda generación, refleja un avance tecnológico e innovador. En la Ilustración 6-4, se muestra el encapsulado de este transistor de potencia en el cual el pin 1 es de ganancia (gain, por su denominación en inglés), el pin 2 es de drenado (drain, por su denominación en inglés) y el pin 3 es de fuente (source, por su denominación en inglés). El componente exhibe una resistencia a la conducción por unidad de área excepcionalmente baja, acompañada de un rendimiento de conmutación sumamente eficiente. Además, su capacidad de conmutación es notablemente estable en un rango de temperaturas de funcionamiento. Entre las aplicaciones primordiales que este dispositivo abarca,

se destaca su utilidad como fuente de alimentación en modo Switching, su idoneidad para Convertidores DC-DC y su potencial en el control de motores industriales (STMicroelectronics 2020).



**Ilustración 6-4 :** Encapsulado HiP247 del MOSFET SCTWA35N65G2V.  
**Fuente:** (STMicroelectronics 2020).

El MOSFET canal N que estamos considerando para este diseño presenta varias características clave que lo hacen ideal para nuestra aplicación. Se trata de un diodo de cuerpo intrínseco extremadamente rápido y resistente. Con una capacidad de hasta 650 [V] de voltaje positivo entre “drain and source”(V<sub>DS</sub>) es capaz de manejar niveles de voltaje significativos. Además, su resistencia máxima (R<sub>DS(on)</sub> max) de de 67 [mΩ] garantiza una eficiencia óptima en la conducción. También es importante destacar su alta capacidad de corriente, llegando hasta 45 [A] de corriente de “drain” (I<sub>D</sub>). Además, su carga de puerta y capacitancia de entrada son sorprendentemente bajas, lo que favorece un rendimiento eficiente. Por si fuera poco, posee una capacidad excepcionalmente alta de temperatura de unión operativa, llegando a los 200°C. Estas características combinadas nos proporcionan un componente que cumple con las exigencias de nuestro diseño de manera sobresaliente. A continuación, en la Ilustración 7-4 : se muestra el símbolo del MOSFET en el cual G(1) es el pin de gain, D(2,TAB) de drain y S(3) de source (STMicroelectronics 2020).



**Ilustración 7-4 :** Símbolo Electrónico del MOSFET a usarse en el diseño.  
**Fuente:** (STMicroelectronics 2020).

#### ***4.1.5. Drivers para Transistores de Potencia.***

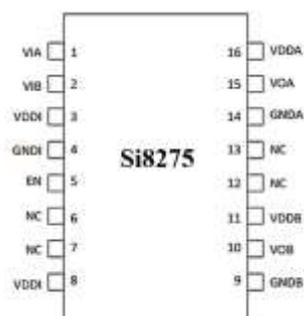
En la Ilustración 8-4, se muestra el encapsulado del integrado controlador, conocido como “driver” por su denominación en inglés, para los MOSFET. Es extremadamente versátil y se encuentra en una amplia variedad de aplicaciones de electrónica de potencia. Se puede emplear

en cargadores a bordo, sistemas de gestión de baterías, estaciones de carga, inversores de tracción, vehículos híbridos eléctricos y vehículos eléctricos de batería; lo que lo hace idóneo para nuestro diseño (SKYWORCS 2015).



**Ilustración 8-4 :** Package SOIC-16 NB del SI8275ABD-IS1.  
**Fuente:** (SKYWORCS 2015).

Los aisladores Si827x son ideales para accionar interruptores de potencia que se emplean en una diversidad de aplicaciones, incluyendo fuentes de energía, inversores y sistemas de control de motores. Los controladores de puerta aislados Si827x hacen uso de la tecnología de aislamiento patentada de silicio de Skyworks, que permite alcanzar hasta 2,5 [kVRMS] de tensión de aislamiento. Esta tecnología brinda una excelente inmunidad a transitorios en modo común (CMTI), así como especificaciones de temporización precisas, una variación mínima con respecto a la temperatura y el tiempo, una mayor consistencia entre piezas y una fiabilidad extremadamente alta. Además, incorpora características exclusivas como salidas independientes pull-up/down, desactivación del controlador en caso de falla y ajuste preciso del tiempo muerto. Comparada con los controladores de puerta optoacoplados, la serie Si827x ofrece una vida útil prolongada y una confiabilidad significativamente mejorada (SKYWORCS 2015).

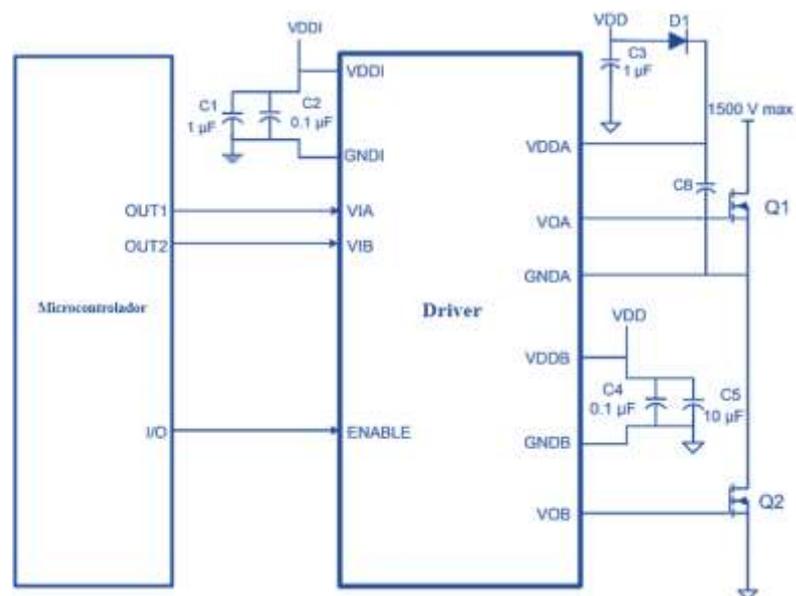


**Ilustración 9-4 :** Asignación de Pins del Si8275.  
**Fuente:** (SKYWORCS 2015).

Como se muestra en la Ilustración 9-4, los pines de este dispositivo incluyen las siguientes señales de control de driver digital: VIA para "A", VIB para el driver "B", y EN para habilitar. También cuenta con las entradas de alimentación del lado de entrada, VDDI, y su tierra, GNDI. Además, presenta conexiones de alimentación para los drivers "A" y "B", GNDA y GNDB respectivamente, así como salidas de accionamiento de puerta, VOA para el driver "A" y VOB para el driver "B". Las señales de suministro de energía para los drivers "A" y "B", VDDA y

VDDDB respectivamente, también están incluidas en el diseño. La característica NC indica que no se encuentra conectada (SKYWORKS 2015).

En la Ilustración 10-4, se muestra al Driver controlada mediante las señales de entrada VIA y VIB desde el Microcontrolador. D1 y CB forman un circuito bootstrap convencional que permite que VOA funcione como un driver de lado alto para Q1, que tiene un voltaje máximo de drain de 1500 V. VOB está conectado como un driver convencional de lado bajo. Cabe señalar que el lado de entrada del Driver requiere un VDDI en el rango de 2.5 a 5.5 V (RECOM 2018), mientras que las salidas de suministro del lado VDDA y VDDDB deben estar entre 4.2 y 30 V con respecto a sus tierras respectivas. El tiempo de inicio del bootstrap dependerá del condensador CB elegido. Por lo general, VDD es el mismo que VDDDB. Además, es importante mencionar que los condensadores de derivación en el Driver deben ubicarse lo más cerca posible del chip. Además, se recomienda el uso de condensadores de derivación para reducir el ruido de alta frecuencia y maximizar el rendimiento. Las salidas VOA y VOB pueden usarse indistintamente como drivers de lado alto o bajo (SKYWORKS 2015).



**Ilustración 10-4:** Circuito de Conexión del Driver Si8273 con el Microcontrolador.

Fuente: (SKYWORKS 2015).

#### 4.1.6. Fuentes Aisladas

La Serie RKZ de Convertidores DC-DC de 2[W], Ilustración 11-4, está certificada según EN60950-1, una norma de seguridad internacional que establece los requisitos para la seguridad de los equipos eléctricos utilizados en entornos de tecnología de la información y equipos de telecomunicaciones. Esta certificación garantiza que los convertidores cumplen con estándares

rigurosos de seguridad y son adecuados para aplicaciones industriales de alta gama, como los circuitos de control de un Transistor Bipolar de Puerta Aislada (IGBT, por sus siglas en inglés) (AENOR 2003). Los IGBT son dispositivos semiconductores utilizados en electrónica de potencia para conmutar altas corrientes y tensiones en sistemas como inversores, convertidores y circuitos de control de motores, proporcionando una eficiente regulación y conmutación de potencia. Los convertidores RKZ son compatibles en pines con las series de convertidores RK y RH, ofreciendo una forma sencilla de actualizar una fuente de aislamiento de alta de 1[W] a 2[W] (RECOM 2019).



**Ilustración 11-4:** Fuente Aislada RECOM Power RKZ.  
Fuente: (RECOM 2019).

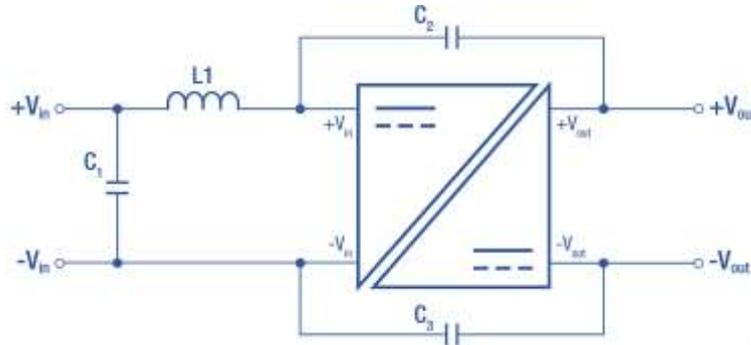
Los convertidores RKZ3, Ilustración 12-4, son compatibles en cuanto a pines con las series RK y RKZ de convertidores, brindando una manera sencilla de mejorar un diseño de aislamiento alto existente de 1[W] o 2[W] a 3[W]. Los convertidores cuentan con certificación de seguridad IEC/EN62368 (RECOM 2018).



**Ilustración 12-4:** Fuente Aislada RECOM Power RKZ3.  
Fuente: (RECOM 2019).

La Fuente Aislada RECOM Power RKZ3-2405S ofrece un rango de entrada nominal de 24[V] en corriente continua, generando una salida de 5[V] en corriente continua. Con una eficiencia típica de entre 86%, es capaz de suministrar hasta 600[mA] de corriente de salida y puede manejar una carga capacitiva máxima de 2000[ $\mu$ F] (RECOM 2018). La Fuente Aislada RECOM Power RKZ-2415S ofrece un rango de entrada nominal de 24[V] en corriente continua, generando una salida de 15[V] en corriente continua. Con una eficiencia típica de entre 82% y 84%, es capaz de suministrar hasta 132[mA] de corriente de salida y puede manejar una carga capacitiva máxima de 330[ $\mu$ F]. Tanto RKZ-2415S como RKZ3-2405S están diseñadas para trabajar con diversos componentes, incluyendo un capacitor C1 de 10[ $\mu$ F] a 100[V], un inductor L1 de 22[ $\mu$ F], un capacitor C2 de 470[pF] y un capacitor C3 de 1[nF]; como se muestra en la Ilustración 13-4

(RECOM 2019). Estas características las convierten en una opción versátil y confiable para aplicaciones que requieren fuentes de alimentación aislada y eficiente, como es el caso del prototipo a diseñarse.



**Ilustración 13-4:** Diagrama de conexión del RECOM Power RKZ y RKZ3.  
Fuente: (RECOM 2019).

## 4.2. Selección de Software

Por otro lado, el software desempeña un papel crucial en la implementación y control del prototipo. La programación de algoritmos de control avanzados, como controladores PID (Proporcional-Integral-Derivativo) o técnicas de modulación, asegura la regulación precisa de voltajes y corrientes en cada puerto, así como una respuesta dinámica adecuada ante cambios en la carga y condiciones operativas. La elección de un software robusto y flexible permite la integración de estrategias de control sofisticadas, contribuyendo a la estabilidad y eficiencia del prototipo en diferentes escenarios de funcionamiento.

En conjunto, la elección cuidadosa del hardware y software idóneos es esencial para lograr un prototipo Convertidor DC-DC Multipuerto Bidireccional óptimamente funcional y adaptado a las demandas de los LEVs. Esta decisión estratégica garantiza un desempeño eficiente, seguro y confiable del sistema, así como la posibilidad de implementar futuras mejoras y actualizaciones, contribuyendo al avance y éxito de la movilidad eléctrica en la actualidad.

### 4.2.1. *PSim*

PSim, el entorno de simulación definitivo para la conversión de energía y el control de motores se presenta como un simulador de electrónica de potencia que destaca por su velocidad de simulación excepcional y la generación de resultados de alta calidad a nivel de sistema. Su interfaz de usuario amigable permite a los usuarios interactuar y diseñar de manera efectiva, incluso sin experiencia previa en la materia. Esta herramienta va más allá al ofrecer módulos

complementarios que abarcan una variedad de áreas, como se muestra en la Ilustración 14-4. Estos módulos adicionales garantizan un diseño y una simulación robustos a nivel de sistema en diversas aplicaciones, consolidando a PSim como una solución integral para la simulación y diseño en el ámbito de la electrónica de potencia (Powersim 2023).



**Ilustración 14-4:** Módulos de PSIM.

Fuente: (Powersim 2023).

#### 4.2.2. *EasyEDA*

EasyEDA es una herramienta de diseño basada en la web, especialmente diseñada para ingenieros de hardware. Además, EasyEDA facilita la generación de listas de materiales, archivos Gerber y archivos pick and place, así como salidas documentales en formatos PDF, PNG y SVG. Entre sus capacidades se encuentra la creación y edición de diagramas esquemáticos, simulación SPICE de circuitos mixtos analógicos y digitales, y la confección y modificación de diseños de circuitos impresos, incluso con la posibilidad de avanzar hacia la producción de las placas (EDA 2023). En la Ilustración 15-4 se muestra el isologo de la herramienta.



**Ilustración 15-4:** Isologo de EasyEDA.

Fuente: (EDA 2023).

Una de las características más notables de EasyEDA es su conjunto de herramientas que permite diseñar, simular y compartir tanto en ámbitos públicos como privados. Esta plataforma se destaca por varias ventajas clave en comparación con otras herramientas de desarrollo, como Eagle y Altium Designer. Una versión gratuita que alberga las herramientas esenciales para el desarrollo de prototipos, la disponibilidad en línea con la capacidad de respaldar los avances de diseño y el acceso desde cualquier computadora, la colaboración eficiente y la disponibilidad de bibliotecas compartidas por la comunidad son elementos que resaltan. Además, EasyEDA permite la importación de una variedad de formatos de archivos, como Altium Designer, CircuitMaker,

Eagle, Kicad y LTspice, lo que amplía su versatilidad. La exportación de listas de conexiones de SPICE a herramientas de simulación de terceros y de listas de conexiones de PCB en formatos Altium, PADS y FreePCB garantiza la flexibilidad de los proyectos. Un detalle valioso es la capacidad de importar esquemas y símbolos de LTspice, agilizando el proceso de diseño sin tener que empezar desde cero (EDA 2023).

En cuanto a la realización de PCB, EasyEDA permite al diseñador obtener una representación en 3D una vez que se completa el diseño de la placa. Además, está integrada con JLCPCB, uno de los fabricantes de placas líderes a nivel mundial, lo que simplifica la exportación inmediata de archivos Gerber para llevar a cabo la implementación de los diseños. Las funciones disponibles en EasyEDA están ilustradas en la Ilustración 16-4 (EDA 2023).



**Ilustración 16-4:** Herramientas de diseño de Easy EDA.

Fuente: (EDA 2023).

#### 4.2.3. *Keil Studio Cloud*

Keil Studio Cloud representa un entorno de desarrollo integrado (IDE, por sus siglas en inglés) que opera directamente desde un navegador web, ofreciendo una solución óptima para proyectos relacionados con el Internet de las Cosas (IoT, por sus siglas en inglés), el aprendizaje automático (ML, por sus siglas en inglés) y el desarrollo embebido. Con la ventaja de herramientas de instalación cero, el IDE se convierte en una elección eficiente para la realización de la programación del microcontrolador. Además, Keil Studio Cloud proporciona una serie de ejemplos preconfigurados y listos para su ejecución, lo que agiliza el proceso de inicio y facilita la exploración de las posibilidades del desarrollo. La integración de Git también está incorporada, permitiendo una gestión de versiones fluida y colaborativa. Para asegurar la calidad y la eficacia del desarrollo, el IDE ofrece capacidades de depuración en el entorno web, lo que simplifica la identificación y resolución de problemas. En resumen, Keil Studio Cloud es un recurso completo que promete optimizar su experiencia de desarrollo en el ámbito de IoT, ML y sistemas embebidos, proporcionando las herramientas y la eficiencia necesarias para sobresalir en sus proyectos (Arm Limited 2023). En la Ilustración 17-4 se muestra el isologo de esta herramienta.



**Ilustración 17-4:** Isologo de Keil Studio Cloud.  
**Fuente:** (Arm Limited 2023).

#### 4.2.4. *Matlab / Simulink*

MATLAB es un entorno de programación y software ampliamente utilizado en el ámbito de la ingeniería y la ciencia para el análisis, la simulación y la resolución de problemas complejos. Su poderosa plataforma proporciona herramientas y funciones para el cálculo numérico, la visualización de datos y la implementación de algoritmos avanzados. Con una amplia gama de aplicaciones en áreas como el procesamiento de señales, la optimización y el modelado matemático, MATLAB se ha convertido en una herramienta esencial para ingenieros y científicos que buscan abordar desafíos técnicos y realizar investigaciones de manera eficiente y efectiva (The MatWorks 2023). En la Ilustración 18-4 se presenta su logotipo junto con una de sus herramientas la cual es Simulink.



**Ilustración 18-4:** Isologo de Matlab & Simulink.  
**Fuente:** (The MatWorks 2023).

SIMULINK, cuyo logo se muestra en la Ilustración 19-4, representa una potente y versátil toolbox incorporada en el entorno de MATLAB, diseñada para simular y analizar el comportamiento de sistemas dinámicos. Su aplicabilidad abarca tanto sistemas lineales como no lineales, permitiendo modelar en tiempo continuo y discreto, así como sistemas híbridos que combinan ambas modalidades. A través de una interfaz visual, los usuarios pueden arrastrar y soltar elementos para ensamblar el modelo, simplificando el proceso de diseño y evaluación (The MatWorks 2023).



**Ilustración 19-4:** Logo de Simulink  
**Fuente:** (The MatWorks 2023).

SIMULINK no solo posibilita la creación de modelos y simulación de sistemas, sino que también emerge como una herramienta fundamental en el desarrollo y análisis de sistemas de control en lazo cerrado. Esto se vuelve especialmente crucial en la optimización y eficaz funcionamiento de Convertidores DC-DC, donde el control en lazo cerrado resulta esencial para mantener la estabilidad y lograr la respuesta deseada en la conversión de energía. Los controladores en este esquema permiten ajustar y regular automáticamente variables críticas, como la tensión de salida, en reacción a las cambiantes condiciones del sistema y las perturbaciones. A través de SIMULINK, es posible diseñar, simular y afinar estos controladores en lazo cerrado, asegurando un desempeño estable y óptimo en el prototipo a desarrollar, lo cual resulta particularmente vital en aplicaciones como vehículos eléctricos y fuentes de energía. Los modelos generados en SIMULINK pueden ser almacenados en archivos con extensión .mdl, lo que facilita el acceso y la reutilización para futuros proyectos y análisis. (The MatWorks 2023).

### **4.3. Construcción del Prototipo**

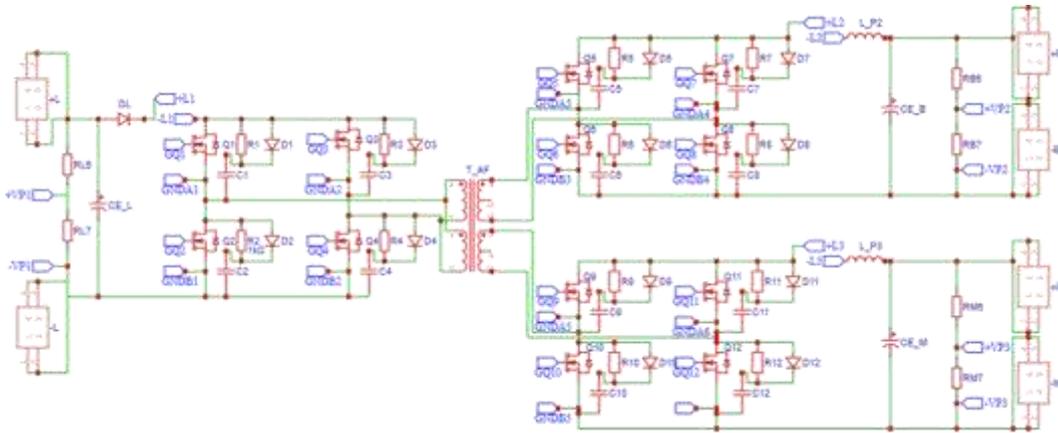
#### ***4.3.1. Diseño del Esquemático.***

En la Ilustración 20-4, se presenta el esquemático del Convertidor DC-DC TAB con topología Full-Bridge en cada uno de sus puertos. Además de las conexiones y componentes principales, se puede observar la implementación de una red snubber RCD conectada en paralelo a los MOSFETs. Esta red snubber RCD desempeña un papel crucial en la protección y mejora del rendimiento del sistema.

La incorporación de una red snubber RCD a los MOSFETs es de vital importancia debido a varias razones. En primer lugar, los MOSFETs están sujetos a altas corrientes y tensiones durante su operación, lo que puede resultar en picos de voltaje y corriente no deseados durante el proceso de conmutación. Estos picos pueden generar estrés adicional en los MOSFETs y otros componentes circundantes, lo que a largo plazo puede causar fallas prematuras (Abramovitz, Liao, Smedley 2013).

La red snubber RCD, compuesta por una resistencia (R), un capacitor (C) y un diodo (D), se coloca estratégicamente en paralelo con los MOSFETs para amortiguar y reducir los picos de voltaje y corriente que se producen durante el proceso de conmutación. La resistencia R y el condensador C trabajan en conjunto para absorber y disipar la energía acumulada en los MOSFETs, evitando así que los picos de tensión y corriente se propaguen por todo el circuito. El diodo D asegura que la energía almacenada en el condensador se disipe de manera controlada y eficiente (Abramovitz, Liao, Smedley 2013).

La implementación de esta red snubber RCD no solo protege los MOSFETs de los picos de tensión y corriente, sino que también mejora la eficiencia y el rendimiento general del sistema. Al reducir el estrés en los componentes y minimizar las interferencias electromagnéticas generadas por los picos de conmutación, se logra una operación más suave y confiable del Convertidor DC-DC TAB.



**Ilustración 20-4:** Esquemático de conexión del Convertidor DC-DC TAB.

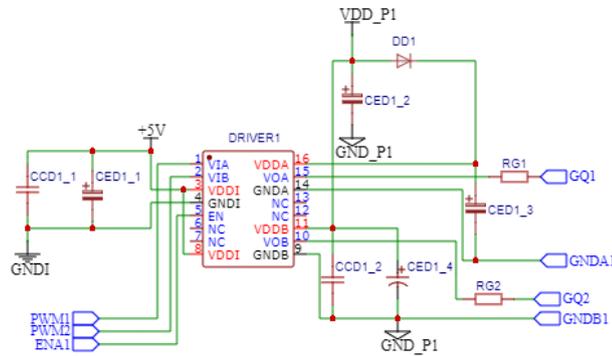
- En el lado izquierdo de la Ilustración 20-4, se encuentra el puerto 1. Se compone de dos terminales RedCube 4Pin PCB conectado a +L y -L; un divisor de voltaje formado por las resistencias RL6 y RL7, cuyos valores son 332 [k $\Omega$ ] y 2.7[k $\Omega$ ] respectivamente; un diodo rectificador 10A10 (DL); un capacitor HITANO de 1000[ $\mu$ F] y 200[V] (CE\_L); y cuatro MOSFETs SCTWA35N65G2V (Q1, Q2, Q3 y Q4). Además, en este puerto, las redes snubber se conforman de: resistencias de 1 [k $\Omega$ ] (R1, R2, R3 y R4), capacitores de 330[pF] (C1, C2, C3, C4) y diodos Schottky SOD-106-2 (D1, D2, D3 y D4) los cuales contribuyen a la protección y optimización del sistema. Las etiquetas +VP1 y -VP1 se enlazan al sensor de voltaje SVL según se presenta en la Ilustración 27-4; asimismo, las etiquetas +L1 y -L1 se conectan al sensor de corriente A1 tal como se indica en la Ilustración 29-4. Las etiquetas GQ1, GQ2, GNDA1 y GNDB1 se conectan al driver 1, conforme se muestra en la Ilustración 21-4; y finalmente, GQ3, GQ4, GNDA2 y GNDB2 se enlazan al driver 2 siguiendo la disposición ilustrada en la Ilustración 22-4.
- En el lado derecho superior de la Ilustración 20-4, encontramos el puerto 2. Este se conforma de dos terminales RedCube 4Pin PCB en +B y -B; un divisor de voltaje compuesto por las resistencias RB6 y RB7, cuyos valores son 82.5 [k $\Omega$ ] y 2.7[k $\Omega$ ]; un Inductor de Potencia 60B683C con una inductancia de 68 [ $\mu$ H] (L\_P2); un capacitor KMM de 560[ $\mu$ F] y 250[V] (CE\_B); y cuatro MOSFETs SCTWA35N65G2V (Q5, Q6, Q7 y Q8). En este puerto, las redes snubber formadas por resistencias de 560[ $\Omega$ ] (R5, R6, R7 y R8), capacitores de 330[pF] (C5, C6, C7, C8) y diodos Schottky SOD-106-2 (D5, D6, D7 y D8).

D6, D7 y D8) cumplen un papel vital en la protección y mejora del rendimiento del sistema. Las etiquetas +VP2 y -VP2 se enlazan al sensor de voltaje SVB según se presenta en la Ilustración 27-4; asimismo, las etiquetas +L2 y -L2 se conectan al sensor de corriente A2 tal como se indica en la Ilustración 29-4. Las etiquetas GQ5, GQ6, GNDA3 y GNDB3 se conectan al driver 3, conforme se muestra en la Ilustración 23-4; y finalmente, GQ7, GQ7, GNDA4 y GNDB4 se enlazan al driver 4 siguiendo la disposición ilustrada en la Ilustración 24-4.

- En el lado izquierdo inferior de la Ilustración 20-4, encontramos el puerto 3. Este se conforma de dos terminales RedCube 4Pin PCB en +B y -B; un divisor de voltaje compuesto por las resistencias RB8 y RB9, cuyos valores son 82.5 [k $\Omega$ ] y 2.7[k $\Omega$ ]; un Inductor de Potencia 60B683C con una inductancia de 68 [ $\mu$ H] (L\_P2); un capacitor KMM de 560[ $\mu$ F] y 250[V] (CE\_M); y cuatro MOSFETs SCTWA35N65G2V (Q9, Q10, Q11 y Q12). En este puerto, las redes snubber formadas por resistencias de 560[ $\Omega$ ] (R9, R10, R11 y R12), capacitores de 330[pF] (C9, C10, C11, C12) y diodos Schottky SOD-106-2 (D9, D10, D11 y D12) cumplen un papel vital en la protección y mejora del rendimiento del sistema. Las etiquetas +VP3 y -VP3 se enlazan al sensor de voltaje SVM según se presenta en la Ilustración 27-4; asimismo, las etiquetas +L3 y -L3 se conectan al sensor de corriente A3 tal como se indica en la Ilustración 29-4. Las etiquetas GQ9, GQ10, GNDA5 y GNDB5 se conectan al driver 5, conforme se muestra en la Ilustración 25-4; y finalmente, GQ11, GQ12, GNDA6 y GNDB6 se enlazan al driver 6 siguiendo la disposición ilustrada en la Ilustración 26-4.
- Los tres puertos están estratégicamente interconectados y aislados mediante el uso del transformador (T\_AF), específicamente el Transformador Planar Serie MTPL-2516-S24V, que juega un papel fundamental en la transferencia de energía y la garantía de un funcionamiento confiable del Convertidor DC-DC TAB con topología Full-Bridge.

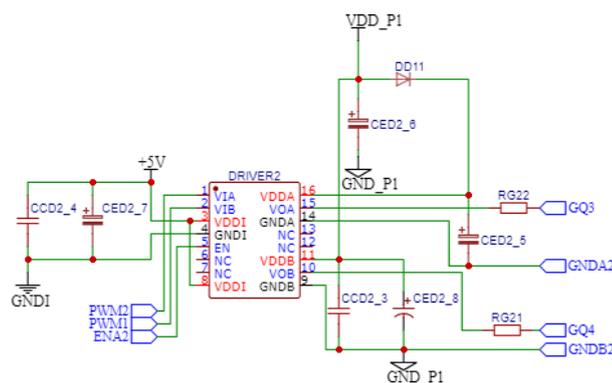
En el Driver 1, según se esquematiza en la Ilustración 21-4 y basandonos en la configuración de la Ilustración 10-4, se incorporan los siguientes componentes: un capacitor cerámico de 100[nF] (CCD1\_1), un capacitor electrolítico de 1[ $\mu$ F] (CED1\_1), un diodo 1N4148 (DD1), un segundo capacitor electrolítico de 1[ $\mu$ F] (CED1\_2), un segundo capacitor cerámico de 100[nF] (CCD1\_2), otro capacitor electrolítico de 1[ $\mu$ F] (CED1\_3), un cuarto capacitor electrolítico de 1[ $\mu$ F] (CED1\_4) y dos resistencias de 4.7[ $\Omega$ ] (RG1 y RG2). La alimentación de +5[V] proviene de la Fuente 4, mientras que la alimentación VDD\_P1 se deriva de la Fuente 1, a la que también se conecta GND\_P1, como se ilustra en la Ilustración 33-4. Las etiquetas de los pulsos (PWM1,

PWM2) y enable (ENA1) entregados desde el microcontrolador se enlazan al conector hembra de acuerdo con lo que se muestra en la Ilustración 31-4.



**Ilustración 21-4:** Esquemático de conexión del Driver 1.

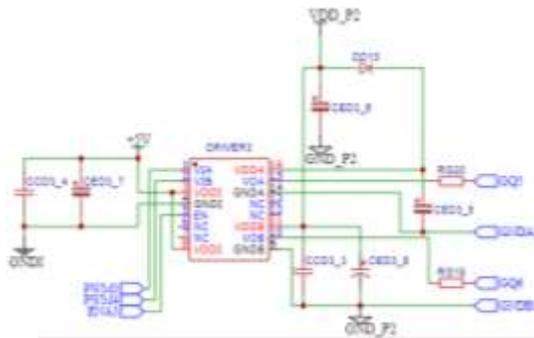
En el Driver 2, según se esquematiza en la Ilustración 22-4 y basandonos en la configuración de la Ilustración 10-4, se incorporan los siguientes componentes: un capacitor cerámico de 100[nF] (CCD2\_4), un capacitor electrolítico de 1[ $\mu$ F] (CED2\_7), un diodo 1N4148 (DD11), un segundo capacitor electrolítico de 1[ $\mu$ F] (CED2\_6), un segundo capacitor cerámico de 100[nF] (CCD2\_3), otro capacitor electrolítico de 1[ $\mu$ F] (CED2\_5), un cuarto capacitor electrolítico de 1[ $\mu$ F] (CED2\_8) y dos resistencias de 4.7[ $\Omega$ ] (RG22 y RG21). La alimentación de +5[V] proviene de la Fuente 4, mientras que la alimentación VDD\_P1 se deriva de la Fuente 1, a la que también se conecta GND\_P1, como se ilustra en la Ilustración 33-4. Las etiquetas de los pulsos (PWM1, PWM2) y enable (ENA2) entregados desde el microcontrolador se enlazan al conector hembra de acuerdo con lo que se muestra en la Ilustración 31-4.



**Ilustración 22-4:** Esquemático de conexión del Driver 2.

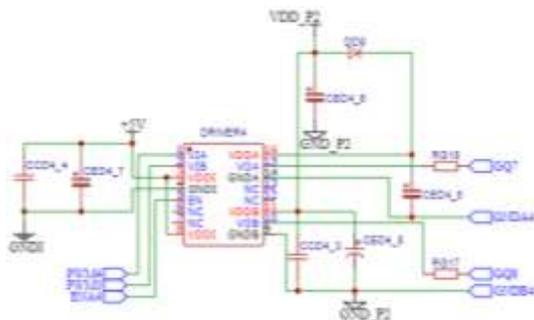
En el Driver 3, según se esquematiza en la Ilustración 23-4 y basandonos en la configuración de la Ilustración 10-4, se incorporan los siguientes componentes: un capacitor cerámico de 100[nF] (CCD3\_4), un capacitor electrolítico de 1[ $\mu$ F] (CED3\_7), un diodo 1N4148 (DD10), un segundo capacitor electrolítico de 1[ $\mu$ F] (CED3\_6), un segundo capacitor cerámico de 100[nF] (CCD3\_3),

otro capacitor electrolítico de 1[ $\mu$ F] (CED3\_5), un cuarto capacitor electrolítico de 1[ $\mu$ F] (CED3\_8) y dos resistencias de 4.7[ $\Omega$ ] (RG20 y RG19). La alimentación de +5[V] proviene de la Fuente 4, mientras que la alimentación VDD\_P2 se deriva de la Fuente 2, a la que también se conecta GND\_P2, como se ilustra en la Ilustración 33-4. Las etiquetas de los pulsos (PWM3, PWM4) y enable (ENA3) entregados desde el microcontrolador se enlazan al conector hembra de acuerdo con lo que se muestra en la Ilustración 31-4.



**Ilustración 23-4 :** Esquemático de conexión del Driver 3.

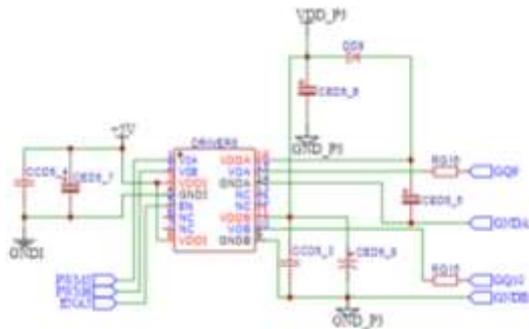
En el Driver 4, según se esquematiza en la Ilustración 24-4 y basandonos en la configuración de la Ilustración 10-4, se incorporan los siguientes componentes: un capacitor cerámico de 100[nF] (CCD4\_4), un capacitor electrolítico de 1[ $\mu$ F] (CED4\_7), un diodo 1N4148 (DD9), un segundo capacitor electrolítico de 1[ $\mu$ F] (CED4\_6), un segundo capacitor cerámico de 100[nF] (CCD4\_3), otro capacitor electrolítico de 1[ $\mu$ F] (CED4\_5), un cuarto capacitor electrolítico de 1[ $\mu$ F] (CED4\_8) y dos resistencias de 4.7[ $\Omega$ ] (RG18 y RG17). La alimentación de +5[V] proviene de la Fuente 4, mientras que la alimentación VDD\_P2 se deriva de la Fuente 2, a la que también se conecta GND\_P2, como se ilustra en la Ilustración 33-4. Las etiquetas de los pulsos (PWM3, PWM4) y enable (ENA4) entregados desde el microcontrolador se enlazan al conector hembra de acuerdo con lo que se muestra en la Ilustración 31-4.



**Ilustración 24-4 :** Esquemático de conexión del Driver 4.

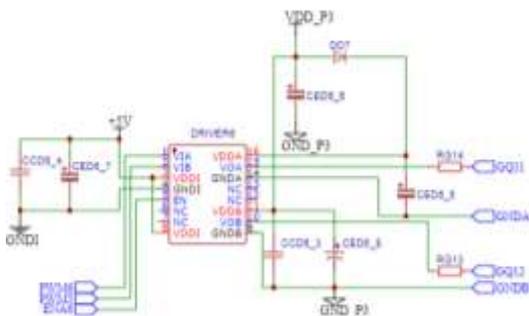
En el Driver 5, según se esquematiza en la Ilustración 25-4 y basandonos en la configuración de la Ilustración 10-4, se incorporan los siguientes componentes: un capacitor cerámico de 100[nF]

(CCD5\_4), un capacitor electrolítico de 1[ $\mu$ F] (CED5\_7), un diodo 1N4148 (DD8), un segundo capacitor electrolítico de 1[ $\mu$ F] (CED5\_6), un segundo capacitor cerámico de 100[nF] (CCD5\_3), otro capacitor electrolítico de 1[ $\mu$ F] (CED5\_5), un cuarto capacitor electrolítico de 1[ $\mu$ F] (CED5\_8) y dos resistencias de 4.7[ $\Omega$ ] (RG15 y RG16). La alimentación de +5[V] proviene de la Fuente 4, mientras que la alimentación VDD\_P3 se deriva de la Fuente 3, a la que también se conecta GND\_P3, como se ilustra en la Ilustración 33-4. Las etiquetas de los pulsos (PWM5, PWM6) y enable (ENA5) entregados desde el microcontrolador se enlazan al conector hembra de acuerdo con lo que se muestra en la Ilustración 31-4.



**Ilustración 25-4:** Esquemático de conexión del Driver 5.

En el Driver 5, según se esquematiza en la Ilustración 26-4 y basandonos en la configuración de la Ilustración 10-4, se incorporan los siguientes componentes: un capacitor cerámico de 100[nF] (CCD6\_4), un capacitor electrolítico de 1[ $\mu$ F] (CED6\_7), un diodo 1N4148 (DD7), un segundo capacitor electrolítico de 1[ $\mu$ F] (CED6\_6), un segundo capacitor cerámico de 100[nF] (CCD6\_3), otro capacitor electrolítico de 1[ $\mu$ F] (CED6\_5), un cuarto capacitor electrolítico de 1[ $\mu$ F] (CED6\_8) y dos resistencias de 4.7[ $\Omega$ ] (RG13 y RG14). La alimentación de +5[V] proviene de la Fuente 4, mientras que la alimentación VDD\_P3 se deriva de la Fuente 3, a la que también se conecta GND\_P3, como se ilustra en la Ilustración 33-4. Las etiquetas de los pulsos (PWM5, PWM6) y enable (ENA6) entregados desde el microcontrolador se enlazan al conector hembra de acuerdo con lo que se muestra en la Ilustración 31-4.

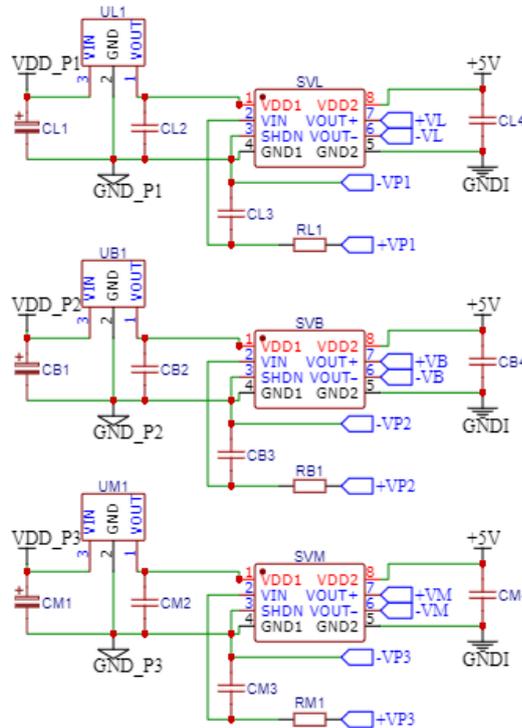


**Ilustración 26-4:** Esquemático de conexión del Driver 6.

En la Ilustración 27-4 se presenta el esquemático de las conexiones en los sensores de voltaje ACPL-C87BT-500E. Estos sensores se basan en el diagrama de conexión mostrado en la Ilustración 3-4. Los reguladores de voltaje (UL1, UB1 y UM1) utilizados son de modelo AP7370, los cuales ofrecen un amplio rango de voltaje de entrada, alta precisión, baja caída de voltaje, protección contra corriente limitada, protección contra inversión de corriente y un nivel de consumo en reposo mínimo. Estas características hacen que sean una elección ideal para dispositivos portátiles e instrumentación (Incorporated 2019).

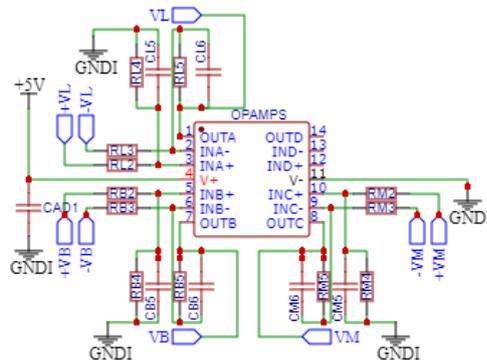
En cuanto a los capacitores, se utilizan capacitores KEMET de 1 $\mu$ F a 10V (CL1, CB1 y CM1) que son de tantalio y se cuyo montaje es SMD. Por otro lado, los capacitores (CL2, CB2, CM2, CL4, CB4 y CM4) son capacitores cerámicos multicapa (MLCC) con una capacitancia de 100 nF y una tolerancia de  $\pm 10\%$ , diseñados para montaje en superficie SMD/SMT. También se emplean capacitores tipo lenteja (CL3, CB3 y CM3) que son cerámicos con una capacitancia de 10nF a 50[V]. Las resistencias utilizadas (RL1, RB1 y RM1) son de tipo chip SMD/SMT y tienen un valor de resistencia de 39[ $\Omega$ ]. El sensor SVL se alimenta (VDD\_P1) y se referencia a tierra (GND\_P1) mediante la Fuente 1, mientras que el sensor SVm se alimenta (VDD\_P2) y se referencia a tierra (GND\_P2) mediante la Fuente 2. Asimismo, el sensor SVM se alimenta (VDD\_P3) y se referencia a tierra (GND\_P3) mediante la Fuente 3. Estas conexiones se relacionan con las de la Ilustración 33-4. Finalmente, las conexiones GNDI se relacionan con los OPAMPs Diferenciales y los LEDs, tal como se muestra en la Ilustración 28-4 e Ilustración 32-4.

El integrado AD8534ARZ, Ilustración 28-4, consta de amplificadores con entradas/salidas de riel a riel de simple, doble y cuádruple configuración, diseñado para operar con una única fuente de alimentación. Este circuito integrado amplificador cuenta con una corriente de salida máxima de 250 [mA], lo que lo hace ideales para la conducción de cargas resistivas o capacitivas. El integrado tiene garantizado un funcionamiento a partir de una fuente de alimentación de (+5V) en este caso proveniente de la Fuente 4 y es referenciada a esta misma (GNDI) como se muestra en la Ilustración 33-4 (Analog Devices 2008).



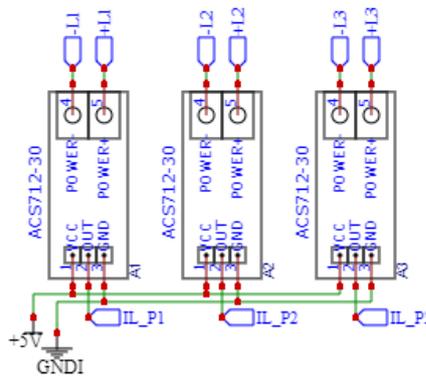
**Ilustración 27-4:** Esquemático de conexión de los Sensores de Voltaje.

Se optó por la utilización del AD8534ARZ para cumplir con el esquema de conexión de los sensores de voltaje, detallado en la Ilustración 3-4. En el diseño de la conexión se incluyen los siguientes componentes: un condensador (CAD1) tipo MLCC con una capacitancia de 100[nF] y una tolerancia de  $\pm 10\%$ , montado en superficie (SMD/SM); además, se emplean condensadores tipo lenteja (CL5, CL6, CB5, CB6, CM5 y CM6) que son cerámicos con una capacitancia de 10nF a 50[V], así como también resistencias (RL2, RL3, RL4, RL5, RB2, RB3, RM2, RM3, RB4, RB5, RM4y RM5) de tipo chip SMD/SMT con un valor de resistencia de 20[k $\Omega$ ]. Las etiquetas (+VL, -VL, +VB, -VB, +VM y -VM) del AD8534ARZ se enlazan con las mismas etiquetas en los Sensores de Voltaje, como se muestra en la Ilustración 27-4. Por otro lado, las etiquetas (VL, VB y VM) corresponden a los voltajes medidos en los puertos y se interconectan con el conector de placa tipo hembra (F1), tal como se puede observar en la Ilustración 31-4.



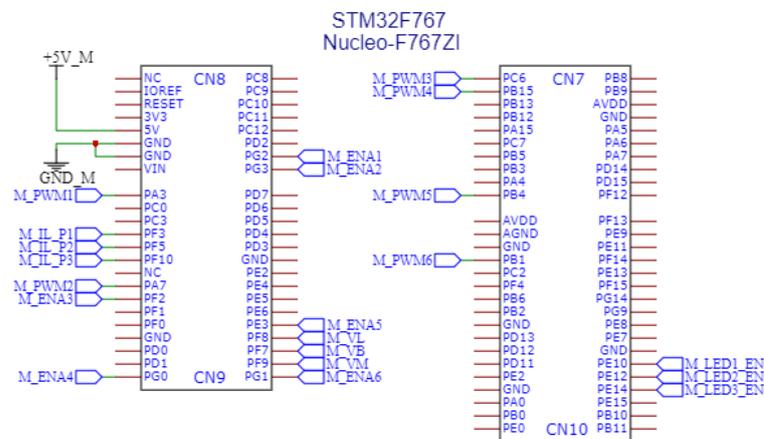
**Ilustración 28-4:** Esquemático de conexión del AD8534ARZ.

La Ilustración 29-4, detalla las conexiones correspondientes a los sensores de corriente ACS712-30. Estos sensores reciben su alimentación de la Fuente 4 y están referenciados a la misma a través de GNDI. La disposición de las conexiones se basa en el diagrama representado en la Ilustración 5-4. Las etiquetas -L1 y +L1 se asocian con el puerto 1, -L2 y +L2 con el puerto 2, y -L3 y +L3 con el puerto 3, según se indica en la Ilustración 20-4. Las etiquetas que representa la corriente en cada uno de los puerto (IL\_P1, IL\_P2 e IL\_P3) se interconectan con sus homólogas en el conector de placa PCB tipo hembra (F1), cuyo esquema de conexión se encuentra en la Ilustración 31-4.



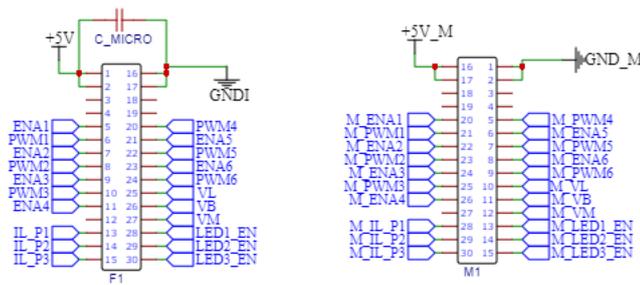
**Ilustración 29-4:** Esquemático de conexión de los Sensores de Corriente.

Con el propósito de optimizar el espacio disponible, se ha decidido colocar el microcontrolador STM32F767 Nucleo-F767ZI en una placa secundaria, dispuesta perpendicularmente con respecto a la placa principal. Para establecer la conexión entre ambas, se utilizarán conectores PCB hembra en la placa principal y conectores macho en la placa secundaria, permitiendo una interconexión efectiva. Esta relación entre las dos placas queda claramente representada mediante las etiquetas presentes en las Ilustración 30-4 e Ilustración 31-4.



**Ilustración 30-4:** Esquemático de la conexión del Microcontrolador.

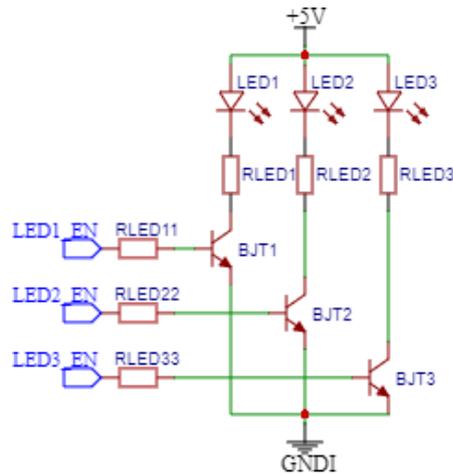
Tanto el microcontrolador como los conectores están equipados con un pin dedicado para la alimentación, la cual es proporcionada por la fuente 4 y mantiene un valor de +5[V]. La conexión GND\_M se vincula directamente con su homólogo en el conector macho, mientras que el conector hembra se referencia a GNDI. Esta interconexión conecta el conector hembra con diversos componentes, incluyendo los sensores de voltaje y corriente, los LEDs, el integrado AD8534ARZ y la fuente 4. En el caso del conector de PCB hembra (F1) tiene un capacitor cerámico (C\_MICRO) de capas múltiples (MLCC) - SMD/SMT de 10[uF] 10% a 25[V].



**Ilustración 31-4** : Esquemático de conexión del Conector de placa hembra (F1) y Conector de placa macho (M1).

Los LEDs Rojo, Verde y Azul (RGB, por sus siglas en inglés), cuyo esquema de conexión se detalla en la Ilustración 32-4, cumplen la función de indicar mediante su encendido las diferentes etapas o ciclos programados. En este esquema, el LED1 se iluminará en tono rojo, el LED2 en verde y el LED3 en azul. Para lograr esto, las resistencias RLED1, RLED2 y RLED3 tendrán un valor de 1[kΩ], mientras que las resistencias RLED11, RLED22 y RLED33 de 560[Ω]. Estas resistencias son fundamentales para el adecuado funcionamiento de los LEDs, regulando la corriente a través de ellos.

Adicionalmente, en este circuito se encuentran presentes tres Transistores de Empalme Bipolar tipo NPN, con una capacidad de hasta 35[V] (BJT1, BJT2 y BJT3). Este conjunto se alimentará mediante la fuente 4 y se referenciará a la misma fuente para establecer una coherencia en el nivel de voltaje de referencia.

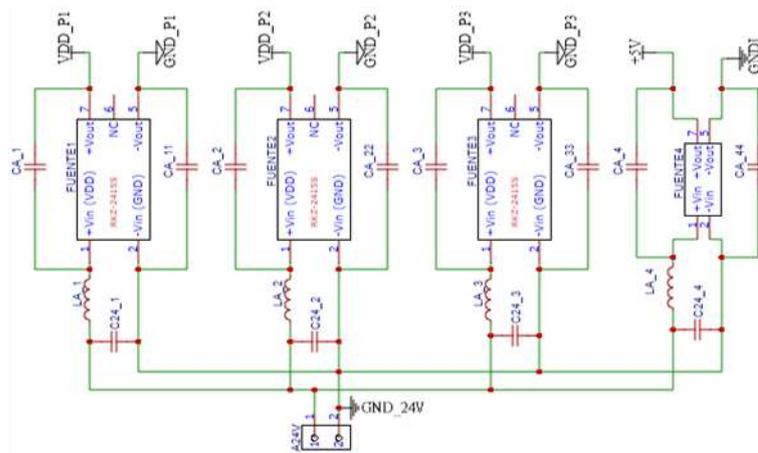


**Ilustración 32-4:** Esquemático de conexión de Leds.

En la Ilustración 33-4, se presenta el esquema de conexión detallado para las fuentes de alimentación RECOM Power RKZ-2415S (Fuente 1, Fuente 2 y Fuente 3) y la fuente RKZ3-2405S (Fuente 4). Este esquema se basa en las directrices proporcionadas en la Ilustración 13-4. La entrada de potencia se realiza a través de una bornera de 2 pines de color azul, denominada A24, que cuenta con tornillos para su fijación. Esta bornera permite suministrar un voltaje de 24[V] a las fuentes, mientras que GND\_24V actúa como la referencia de tierra para esta alimentación.

El circuito incluye Inductores de Potencia (LA\_1, LA\_2, LA\_3 y LA\_4) de 22 $\mu$ H con una precisión de  $\pm 10\%$ , capaces de soportar una corriente nominal de 630 [mA] y una corriente máxima de 1[A]. Los capacitores cerámicos (CA\_1, CA\_2, CA\_3 y CA\_4) de 470[pF]  $\pm 5\%$  proporcionan una capacidad de aislamiento de 2[kV], siendo fundamentales para la estabilidad y la reducción de ruido en el sistema. Asimismo, los capacitores (C24\_1, C24\_2, C24\_3 y C24\_4) de tipo cerámico de capas múltiples (MLCC) - SMD/SMT con una capacidad de 10[uF] y una tolerancia del 10% a 25[V], complementan la eficiencia de la alimentación.

En esta configuración, también se incorporan capacitores (CA\_11, CA\_22, CA\_33 y CA\_44) de 1[nF] con una tolerancia de  $\pm 5\%$  y capacidad de aislamiento de 2000V (2kV), contribuyendo a la integridad del sistema y a la protección de componentes sensibles. Los voltajes de salida que alimentarán los drivers son VDD\_P1, VDD\_P2, VDD\_P3 y VDD\_P4, con sus correspondientes referencias a tierra GND\_P1, GND\_P2 y GND\_P3. La disposición de los elementos en este esquema se ha planificado minuciosamente para asegurar un suministro de energía confiable y eficiente a los componentes de los drivers y otros dispositivos asociados.



**Ilustración 33-4 :** Esquemático de conexión de las Fuentes de Alimentación de la Placa.

### 4.3.2. Diseño de la PCB

El proceso de ruteado de pistas en una placa de circuito impreso es una etapa crítica en el diseño electrónico que requiere una atención cuidadosa y meticulosa. Una serie de consideraciones deben ser tenidas en cuenta para garantizar el rendimiento óptimo y la fiabilidad del circuito. En primer lugar, es esencial prestar atención a la distribución de componentes y la colocación de estos en la placa. Una disposición lógica y eficiente de los componentes facilita la conexión de las pistas y minimiza las interferencias electromagnéticas entre ellos (Zlatanov 2012).

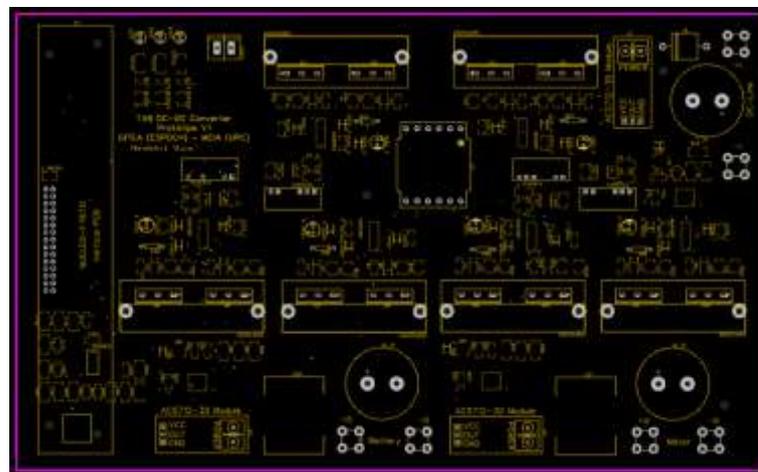
Además, se debe considerar la separación adecuada entre pistas para prevenir acoplamientos no deseados y diafonía, lo cual puede afectar negativamente la integridad de la señal. La anchura de las pistas debe ser dimensionada correctamente para manejar la corriente que circulará por ellas sin generar pérdidas significativas ni aumento excesivo de temperatura. También es importante evitar pistas demasiado largas, ya que pueden aumentar la inductancia y la resistencia, causando caídas de voltaje indeseadas (Zlatanov 2012).

La asignación de capas en la placa es otra consideración esencial. En placas multicapa, es fundamental planificar la distribución de las señales y la alimentación de manera que se reduzcan las interferencias y se optimice el enrutamiento. Además, se debe tener en cuenta la ubicación estratégica de puntos de conexión a tierra para asegurar una referencia sólida y reducir el ruido (Zlatanov 2012).

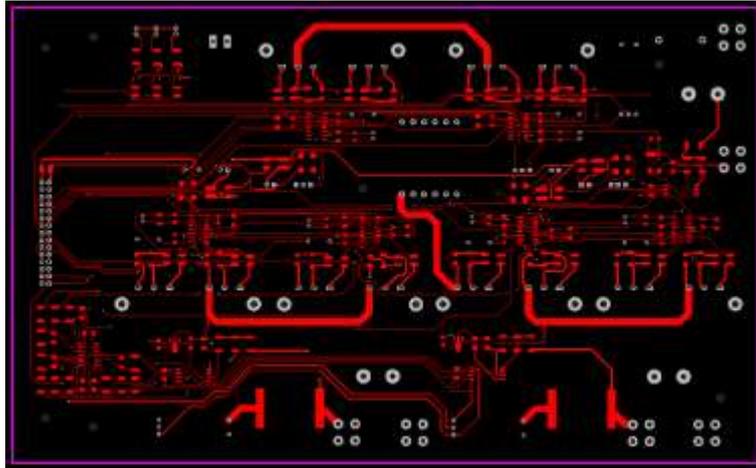
El diseño de pistas en una PCB requiere una cuidadosa atención a los ángulos para asegurar un rendimiento óptimo del circuito. Se recomienda utilizar ángulos de 45 grados en las intersecciones de las pistas en lugar de ángulos más agudos, como 30 grados. Esto ayuda a reducir la reflexión de la señal y minimiza la posibilidad de interferencia electromagnética. Los ángulos más agudos

pueden causar discontinuidades en la impedancia, lo que puede tener un impacto negativo en la calidad de la señal, especialmente en circuitos de alta velocidad. Por lo tanto, seguir ángulos suaves como 45 grados es una práctica común para mantener una buena integridad de la señal y evitar problemas de rendimiento en la PCB (Zlatanov 2012).

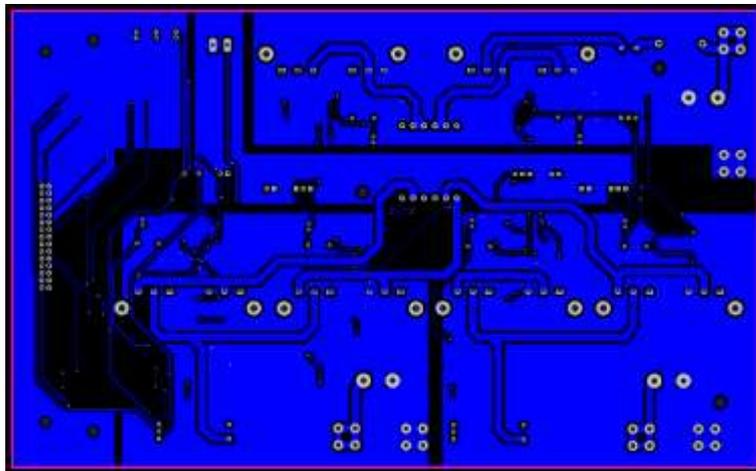
El ruteado de pistas en una placa de circuito impreso es un proceso técnico y estratégico que requiere la consideración de varios aspectos clave. Estos incluyen la distribución eficiente de los componentes, la correcta separación entre las pistas, el dimensionamiento apropiado de las pistas para manejar las corrientes necesarias, la asignación adecuada de capas de la PCB y la atención a las consideraciones relacionadas con la alta frecuencia y la potencia. En el contexto del diseño del Prototipo Convertidor DC-DC Multipuerto Bidireccional Basado en Celdas de Voltaje Pulsante para Vehículos Eléctricos Ligeros, se han abordado todas estas consideraciones al diseñar tanto la placa principal como la placa del microcontrolador como se muestra en la Ilustración 34-4; Ilustración 35-4; Ilustración 36-4 ; Ilustración 37-4; Ilustración 38-4 e Ilustración 39-4. Estas dos placas se conectan de manera efectiva a través de los conectores hembra y macho, posicionándose de manera perpendicular. Cada paso de diseño se llevó a cabo con una meticulosa planificación y una comprensión profunda de las características únicas del circuito, para asegurar un diseño robusto y confiable que cumpla con los estándares de calidad requeridos.



**Ilustración 34-4:** Serigráfica superior de la PCB principal del Convertidor TAB DC-DC.



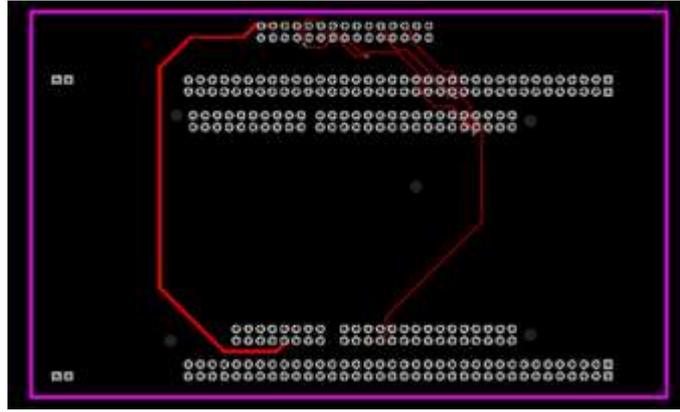
**Ilustración 35-4:** Capa superior de la PCB principal del Convertidor TAB DC-DC.



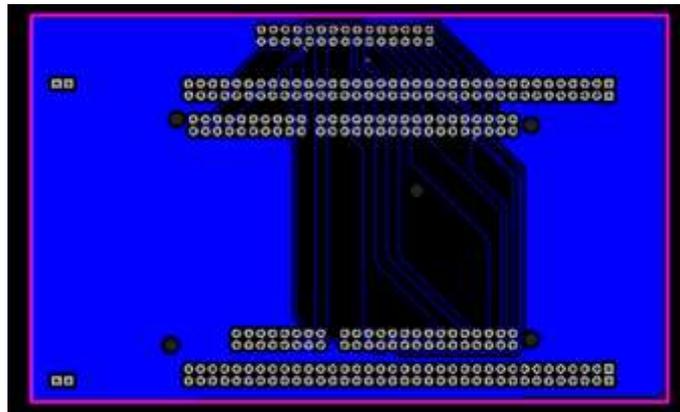
**Ilustración 36-4:** Capa inferior de la PCB principal del Convertidor TAB DC-DC.



**Ilustración 37-4 :** Serigrafía superior en PCB del Microcontrolador en Convertidor TAB DC-DC.



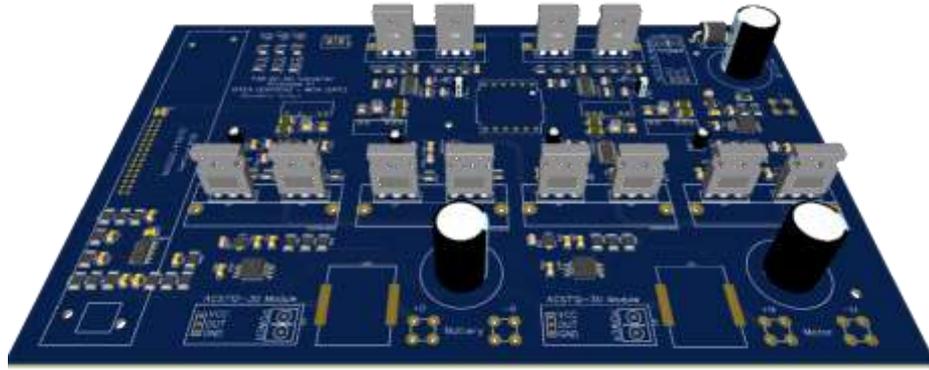
**Ilustración 38-4 :** Capa superior de la PCB del Microcontrolador del Convertidor TAB DC-DC.



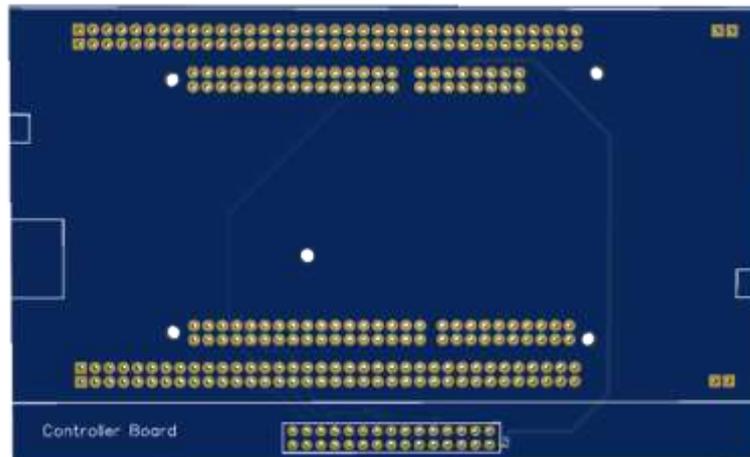
**Ilustración 39-4:** Capa inferior de la PCB del Microcontrolador del Convertidor TAB DC-DC.

Enriqueciendo la experiencia de diseño, la Ilustración 40-4 e Ilustración 41-4 presentan las placas en una visualización en tercera dimensión (3D), una de las funciones distintivas del entorno EasyEDA. Esta capacidad nos brinda la oportunidad de obtener una perspectiva más cercana a la realidad de las PCBs diseñadas. Al examinar las placas desde distintos ángulos y profundidades, se logra una representación más fidedigna de cómo los componentes, pistas y conexiones interactúan en el espacio tridimensional. Esta característica no solo agrega valor estético al proceso de diseño, sino que también proporciona una herramienta valiosa para la detección temprana de posibles colisiones o interferencias entre los elementos de la placa.

La visualización en 3D en EasyEDA no solo se limita a la estética, sino que también es una funcionalidad que permite evaluar con mayor precisión el enrutamiento de las pistas y la distribución de los componentes. Al poder observar cómo los componentes se montan en la superficie de la PCB y cómo las pistas se enrutan en diferentes capas, lo que permite identificar posibles áreas de mejora o ajustes necesarios en el diseño. Esta característica es especialmente útil para evitar errores de colocación o ruteo que podrían resultar en problemas de interferencia electromagnética, cortocircuitos o fallas en el funcionamiento del circuito.



**Ilustración 40-4:** Visión en 3D de la PCB principal del Convertidor TAB DC-DC.



**Ilustración 41-4:** Visión en 3D de la PCB del microcontrolador del Convertidor TAB DC-DC.

#### ***4.3.3. Implementación del Prototipo.***

El proceso de fabricación de las PCBs se lo realizó con el reconocido fabricante chino JLCPCB lo que conllevó una serie de ventajas notables. En primer lugar, JLCPCB ofrece una combinación de calidad y costo altamente competitiva. Gracias a sus procesos de producción automatizados y eficientes, logran mantener precios accesibles sin comprometer la calidad del producto final. Además, sus avanzadas instalaciones y procesos permiten una rápida producción en línea, lo que se traduce en tiempos de espera reducidos. Esto es especialmente valioso en proyectos que requieren prototipos o lotes pequeños de PCB, ya que se acelera el proceso de diseño e implementación.

Dentro de la fase de materialización e implementación del proyecto, una de las etapas de ensamble se encuentra representada en la Ilustración 42-4. La disponibilidad de una estación de soldadura altamente funcional en el grupo de investigación, junto con otros recursos para el ensamble, desempeñaron un papel crucial en garantizar una implementación exitosa y de alta calidad para el diseño del prototipo. La utilización de estas herramientas especializadas y el apoyo

proporcionado por el grupo de investigación contribuyeron significativamente a la precisión y efectividad en la creación del prototipo, asegurando así un resultado consistente con los objetivos planteados en el desarrollo del proyecto.



**Ilustración 42-4 :** Proceso de soldadura de los elementos que conforman la PCB del Convertidor TAB DC-DC.

La representación visual de la implementación de la placa principal del Convertidor TAB DC-DC se encuentra plasmada en la Ilustración 43-4. En este punto, se puede apreciar de manera concreta cómo los componentes se han dispuesto meticulosamente en la placa principal, resaltando la cuidadosa planificación y ejecución de este proceso.



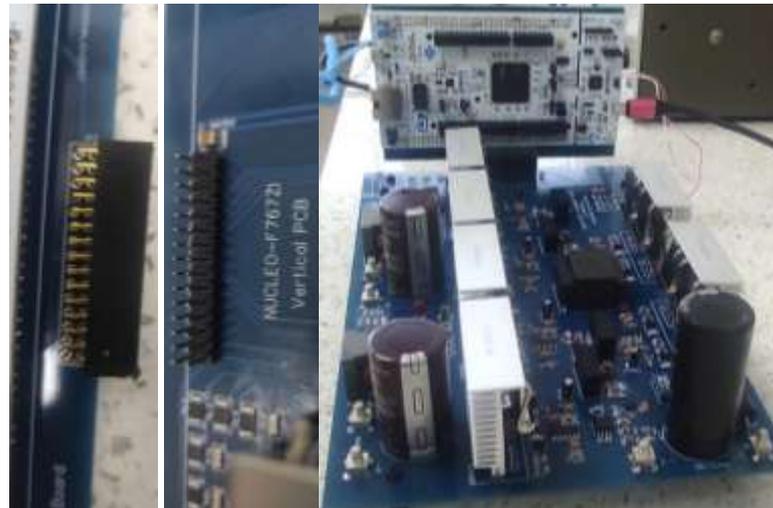
**Ilustración 43-4 :** Placa principal del Convertidor TAB DC-DC.

Al avanzar en la fase de integración y unificación, la Ilustración 44-4 captura el momento en el cual la placa principal se acopla con la del microcontrolador. Esta etapa culminante da forma al Prototipo Convertidor DC-DC, uniendo de manera sinérgica las piezas individuales en un conjunto funcional y cohesivo. La visión de esta ilustración evidencia cómo la concepción y el diseño se materializan en una realidad tangible, subrayando el trabajo meticuloso y el enfoque preciso que ha sido aplicado en el proceso de construcción del prototipo.



**Ilustración 44-4 :** PCB principal y del microcontrolador del Convertidor TAB DC-DC.

En la Ilustración 45-4, se nos brinda una visión detallada de los conectores macho y hembra, elementos esenciales que posibilitan el perfecto acoplamiento entre las dos placas. Este enlace preciso y confiable entre componentes es crucial para garantizar una conexión segura y estable, subrayando la importancia de los detalles en el proceso de ensamblaje. Por otro lado, en la misma línea visual se presenta una perspectiva adicional del Prototipo Convertidor TAB DC-DC en su forma finalizada. Esta vista panorámica refuerza la noción de integridad y completitud, al tiempo que resalta el logro tangible que representa la culminación exitosa de un proyecto de ingeniería.



**Ilustración 45-4 :** Conectores macho y hembra (lado izquierdo de la ilustración) - Prototipo Convertidor TAB DC-DC (lado derecho de la ilustración).

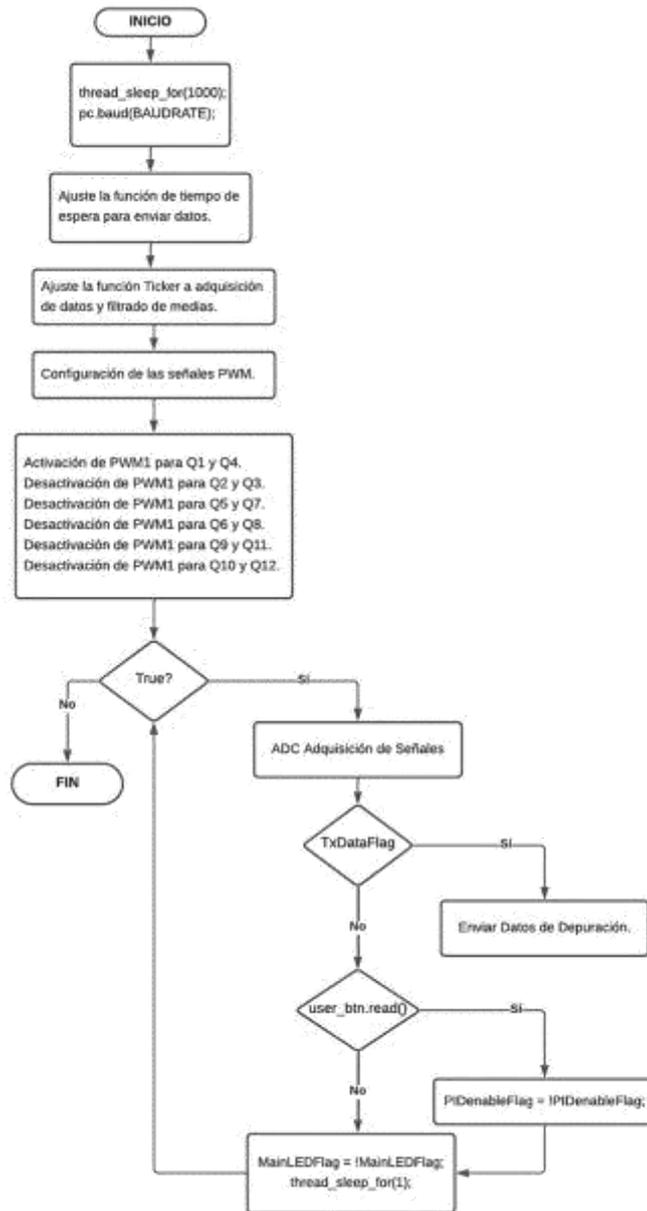
#### 4.4. Programación del Microcontrolador

Los microcontroladores de la familia STM32 de STMicroelectronics son conocidos por su potencia y versatilidad, y el modelo STM32F767ZIT6 no es una excepción. Este dispositivo proporciona una plataforma de alto rendimiento que permite a los ingenieros y desarrolladores crear sistemas de control avanzados para la gestión de energía en vehículos eléctricos ligeros. La programación de este microcontrolador implica la creación de algoritmos y lógica que garanticen la eficiencia y la estabilidad de la conversión de energía, lo que es esencial para la operación segura y óptima de estos vehículos. A continuación, se describe la programación del microcontrolador representada en el diagrama de flujo de la Ilustración 46-4.

- La programación altamente especializada de este microcontrolador abarca una serie de pasos cruciales para asegurar el funcionamiento óptimo y seguro del Prototipo Convertidor TAB DC-DC. Uno de los principales desafíos radica en la adquisición precisa de mediciones de voltaje y corriente provenientes de los distintos puertos del Convertidor. Aquí, la implementación de algoritmos de conversión analógica a digital (ADC) juega un papel esencial, permitiendo transformar las señales analógicas en datos digitales confiables. Estas mediciones son de vital importancia, ya que son utilizadas para calcular y ajustar los niveles de modulación por ancho de pulso (PWM) que controlarán los Mosfets. Esto garantiza una regulación efectiva de la energía que fluye a través del sistema, manteniendo los parámetros dentro de los rangos seguros y deseados.
- Dada la configuración de cada puerto en una topología Full Bridge, el microcontrolador debe enfrentar la complejidad de coordinar y controlar las señales PWM para los Mosfets de manera precisa. La generación de estas señales PWM se convierte en un proceso crítico para lograr la conmutación efectiva y sincronizada de los Mosfets, evitando interferencias y asegurando un flujo constante de energía. Además, el microcontrolador debe interpretar en tiempo real las mediciones de voltaje y corriente obtenidas previamente a través de los sensores. Estas mediciones son utilizadas para ajustar los parámetros de operación, manteniendo la estabilidad y eficiencia del sistema bajo diversas condiciones de carga, permitiendo una respuesta adaptable y precisa ante las fluctuaciones.
- El microcontrolador, además de supervisar y controlar las operaciones del convertidor, desempeña un papel clave en la visualización en tiempo real de las etapas de funcionamiento. Esta función se logra a través de tres LEDs configurados para indicar las diferentes etapas del Convertidor. Las señales de activación de estos LEDs son generadas por el microcontrolador, permitiendo una representación visual inmediata de las

condiciones y estados operativos. Este componente visual resulta invaluable para el monitoreo y diagnóstico rápido de cualquier variación o problema en el sistema.

- La programación minuciosa y coordinada de todos estos aspectos es esencial para lograr un funcionamiento sincronizado y eficiente del Convertidor TAB DC-DC con tres puertos y configuración Full Bridge. El microcontrolador se convierte en el cerebro que orquesta todas las operaciones y toma decisiones precisas en tiempo real, asegurando la estabilidad y el rendimiento del sistema en su totalidad.



**Ilustración 46-4 :** Diagrama de Flujo de la Programación del Microcontrolador. Realizado por: (Mazón 2023).

#### 4.4.1. Configuración de Ganancias del Lazo de Control

La utilización de la herramienta System Identification Toolbox de MATLAB para obtener la función de transferencia del Convertidor DC-DC Multipuerto en modo de operación en lazo abierto es un paso esencial en la caracterización del comportamiento de dicho prototipo. El control en lazo abierto implica la aplicación de una señal de control predeterminada, como un escalón, sin considerar la retroalimentación en tiempo real. Este enfoque es apropiado en situaciones donde la salida deseada es conocida y no requiere una corrección activa de errores. No obstante, en aplicaciones críticas como para la que está dimensionada el prototipo, se prefiere el control en lazo cerrado debido a su capacidad de adaptación y estabilidad. Por lo tanto, se inicia el proceso a partir de los datos que describen las señales de voltaje a la salida, los cuales se obtienen mediante un osciloscopio en lazo abierto, como punto de partida para obtener la función de transferencia y posteriormente implementar el control en lazo cerrado.



**Ilustración 47-4:** Señal de Voltaje de Salida en el puerto 2 (Baterías) y puerto 3 (Motor).

En la Ilustración 47-4, se observa que el voltaje de salida en el puerto de baterías se estabiliza en 9 [V], en total conformidad con las expectativas y los rangos predefinidos. Del mismo modo, el voltaje de salida en el puerto del motor también se estabiliza en 9[V]. Esta prueba de laboratorio pone de manifiesto una conversión precisa de los 30 [V] suministrados en el puerto 1 a los 9[V] obtenidos en los puertos 2 y 3, lo cual concuerda con los cálculos previstos propios de la topología del convertidor y sus ecuaciones características.

**Tabla 2-4** Tabla de Voltajes de Salida en el Puerto 2 y 3.

Número de Dato	Tiempo [seg]	P2 [V]	P3[V]
1	0	1,335126	1,469849
2	2,50E-06	1,586382	1,733668
3	0,000005	1,636633	1,532663
4	7,75E-05	2,87407	3,140703
5	0,00008	2,20196	2,801507
6	8,25E-05	2,955729	3,26005
7	0,000085	3,043668	3,310301
8	8,75E-05	3,238392	3,159548
9	0,00009	3,137889	3,266332
10	9,25E-05	3,194422	3,341708
11	0,000095	3,244673	3,542713
12	9,75E-05	3,439397	3,360553
13	0,0001	3,684372	3,285176
14	0,000103	3,357739	3,542713
15	0,000105	3,27608	3,680904
16	0,000435	6,925578	7,361809
17	0,000438	7,095176	7,361809
18	0,00044	6,894171	7,292714
19	0,000443	7,095176	7,361809
20	0,000445	6,925578	7,361809
21	0,000448	7,095176	7,179648
22	0,00045	6,963266	7,36809
23	0,000453	7,057487	7,361809
24	0,000455	7,126583	7,361809
25	0,000458	7,095176	7,361809
26	0,00046	6,963266	7,562814
27	0,000463	7,095176	7,443467
28	0,000465	7,264774	7,562814
29	0,00145	8,904221	9,038945
30	0,001453	8,583869	8,932161
31	0,001455	8,703216	9,139447
32	0,001458	8,72206	8,787688
33	0,00146	8,772312	8,969849
34	0,001463	8,703216	8,888191
35	0,001465	8,703216	8,831658
36	0,001468	8,885377	8,806533
37	0,00147	8,703216	8,969849
38	0,002215	8,935628	9,001256
39	0,002218	8,904221	8,988693
40	0,00222	8,772312	9,170854
41	0,002223	8,703216	9,089196
42	0,004	8,8414071	9,2399497
43	0,0040025	8,9042212	8,9698492
044	0,004005	8,9042212	9,1708542
45	0,0040075	9,1052262	9,1708542
46	0,00401	9,0361307	9,1708542
47	0,0040125	9,1052262	9,0891959
48	0,004015	8,9042212	9,1708542
49	0,0040175	8,9230654	9,1708542
50	0,00402	8,9042212	9,2399497

Realizado por: (Mazón 2023).

La Tabla 2-4 presenta los datos que muestran cómo las señales en la Ilustración 47-4 evolucionan hasta estabilizarse. Inicialmente, ambas salidas de voltaje son inestables e incrementa, pero con el tiempo alcanzan una estabilidad de 9 voltios, lo que indica que el sistema ha alcanzado un estado estacionario en ambos puertos. Los datos capturados en el osciloscopio son procesados utilizando la herramienta "System Identification Toolbox" de Matlab para obtener la función de transferencia.

$$G(S) = \frac{1.598 \times 10^{10}}{s^2 + 1.518 \times 10^5 s + 4.492 \times 10^8}$$

La función de transferencia generada a través de esta herramienta aporta información valiosa para el diseño, análisis y control del convertidor DC-DC multipuerto, lo que permite optimizar su rendimiento en diversas aplicaciones al tener una descripción cuantitativa de su comportamiento en diferentes condiciones de entrada. A medida que procesa los datos, " System Identification Toolbox " ajusta la función de transferencia, lo que resulta en una representación matemática precisa de cómo el sistema responde ante perturbaciones. En este caso, la función de transferencia resultante tiene un "Best Fits" del 95%, lo que significa que la de la variación en los valores obtenidos con la función de transferencia explica 95% de los datos reales.

El cálculo de un control PID mediante la técnica de asignación de polos permite la configuración de un controlador proporcional-integral-derivativo (PID) a fin de cumplir con requisitos específicos de rendimiento. En este enfoque, se detallan las características deseadas del sistema, tales como el tiempo de estabilización, el sobre pico, el tiempo de respuesta, el error en estado estacionario, entre otros parámetros de interés. El objetivo radica en ajustar las ganancias del controlador PID para ubicar los polos del sistema en posiciones que satisfagan dichas especificaciones. Este proceso implica una cuidadosa consideración de las particularidades de la aplicación, incluyendo la respuesta ante perturbaciones, el rango de operación y la estabilidad del sistema. En este caso, se definen las condiciones de diseño, concretamente un valor máximo del sobre pico ( $M_p$ ) del 1%. A partir de esta información, calculamos el factor de amortiguamiento, que se determina mediante la fórmula:

$$M_p = 100e^{\frac{-\pi\zeta}{\sqrt{1-\zeta^2}}}$$

$$\zeta = \frac{\sqrt{\ln\left(\frac{M_p}{100}\right)^2}}{\sqrt{\pi^2 + \ln\left(\frac{M_p}{100}\right)^2}}$$

$$\zeta = 0.8261$$

Estableciendo la tolerancia permitida en el estacionario como 5%, se determina la frecuencia natural del sistema, estableciendo  $T_{ss}$  de 1[ mseg]:

$$\omega_n = \frac{3}{\zeta T_{ss}} = 3.6316 \times 10^3 \text{ [rad/seg]}$$

Con esta información, se configura la función de transferencia de lazo cerrado deseada, posicionando los polos deseados para lograr el comportamiento esperado en el sistema; considerando una ganancia  $K=1$ .

$$G_d(s) = \frac{K \omega_n^2}{s^2 + 2\zeta\omega_n s + \omega_n^2}$$

Se calcula los términos de  $G_d(s)$  :

$$G_d(s) = \frac{1.3188 \times 10^7}{s^2 + 600s + 1.3188 \times 10^7}$$

Por lo tanto, la ecuación característica del lazo cerrado es:

$$P_d^* = s^2 + 600s + 1.3188 \times 10^7$$

Con los siguientes polos complejos conjugados:

$$p_{1,2} = -3 \times 10^3 \pm 2.047 \times 10^3 i$$

Se escoge un polo no dominante 100 veces más alejado de los polos complejos conjugados

$$p_3 = 100 \operatorname{Real}(-3 \times 10^3 \pm 2.047 \times 10^3 i) = -30 \times 10^4$$

La ecuación característica deseada de tercer orden viene dado por:

$$\begin{aligned} P_d &= (s^2 + 600s + 1.3188 \times 10^7)(s + 30 \times 10^4) \\ P_d &= s^3 + 306000s^2 + 1.932 \times 10^8 s + 3.956 \times 10^{12} \end{aligned}$$

Al basarse en la ecuación general:

$$P_d = \alpha_0 s^3 + \alpha_1 s^2 + \alpha_2 s + \alpha_3 \times 10^{12}$$

Se tiene que  $\alpha_0 = 1$ ,  $\alpha_1 = 306000$ ,  $\alpha_2 = 1.932 \times 10^8$  y  $\alpha_3 = 3.956 \times 10^{12}$ .

Tomando en cuenta la función de transferencia del sistema, la cual es:

$$G(s) = \frac{1.598 \times 10^{10}}{s^2 + 1.518 \times 10^5 s + 4.492 \times 10^8}$$

y considerando los términos que la definen:

$$G(s) = \frac{k}{s^2 + a s + b}$$

Se tiene que  $k = 1.598 \times 10^{10}$ ,  $a = 1.518 \times 10^5$  y  $b = 4.492 \times 10^8$ .

Los parámetros del control PID se determinan mediante la asignación de polos al resolver el sistema de ecuaciones en MATLAB.

$$k_c = \frac{\alpha_2 - b}{k} = \frac{1.932 \times 10^8 - 4.492 \times 10^8}{1.598 \times 10^{10}} = 0.0854$$

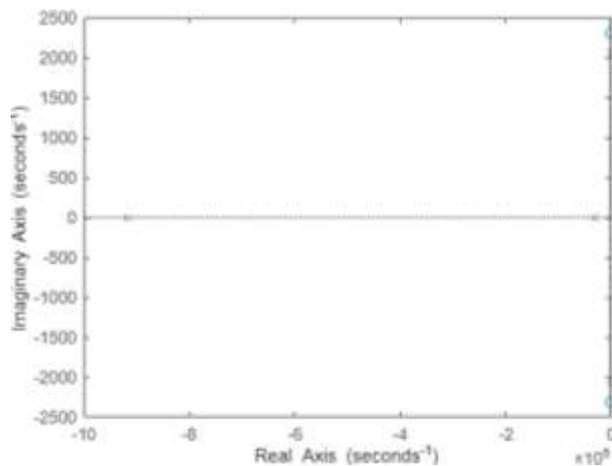
$$\tau_i = \frac{k k_p}{\alpha_3} = \frac{(1.598 \times 10^{10}) \times 0.0854}{3.956 \times 10^{12}} = 3.4474 \times 10^{-4}$$

$$\tau_d = \frac{\alpha_1 - a}{k k_p} = \frac{306000 - 1.518 \times 10^5}{(1.598 \times 10^{10})(0.0854)} = 1.0719 \times 10^{-4}$$

Obteniendo las siguientes ganancias, en donde  $k_i$  es la ganancia integral y  $k_d$  la ganancia derivativa.:

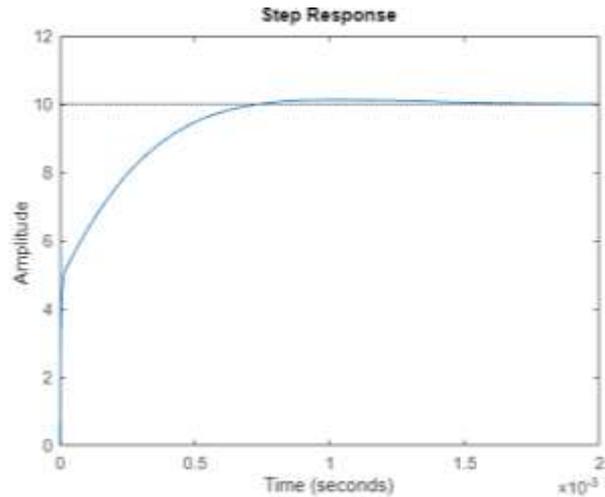
$$k_i = \frac{k_c}{\tau_i} = 247.5925$$

$$k_d = k_c \tau_d = 9.1489 \times 10^{-6}$$



**Ilustración 48-4:** Mapa de asignación polos y ceros.

En la Ilustración 48-4, describe el mapa de polos y ceros asignados para el diseño del control PID, destacando la efectiva aproximación de los ceros asignados a los polos mediante el procedimiento.



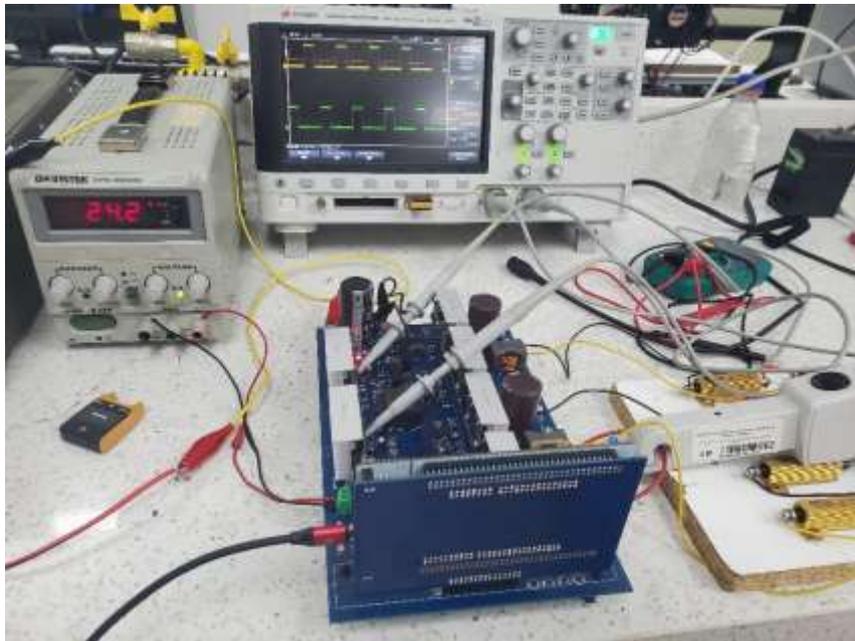
**Ilustración 49-4 :** Respuesta del sistema de control en lazo cerrado.

En la Ilustración 49-4, se muestra la respuesta del sistema de control PID, lo que nos permite evaluar su rendimiento en situaciones reales. Uno de los aspectos más destacados de esta representación es que el sistema exhibe un sobre pico ( $M_p$ ) del 1%, lo que significa que, en respuesta a una perturbación, la magnitud de la respuesta inicial supera su valor final en un 1% antes de estabilizarse. Además, es importante destacar que este sistema logra la estabilidad en un tiempo de 1.5[m seg]. Esta información es crucial para determinar la capacidad de respuesta del sistema y evaluar su eficacia ante perturbaciones donde se requiera una rápida adaptación y minimización de oscilaciones.

## CAPÍTULO V

### VALIDACIÓN DE PROTOTIPO

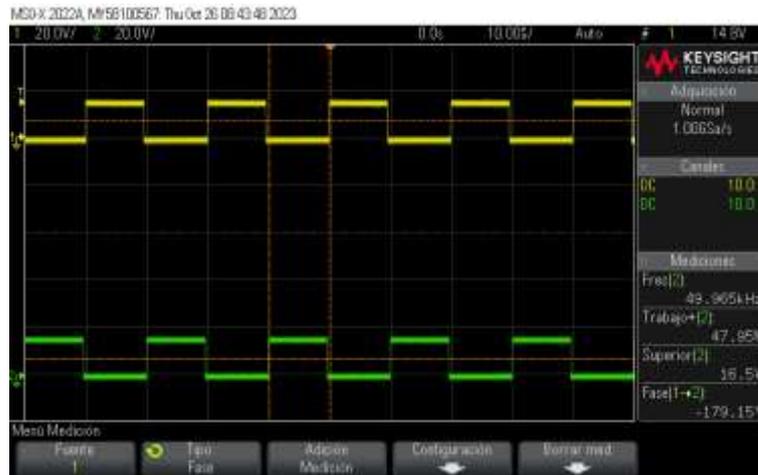
La validación del diseño e implementación del Prototipo Convertidor TAB DC-DC Multipuerto Bidireccional representa una etapa crucial en la verificación de su funcionalidad y desempeño en condiciones reales de operación. En este proceso, se llevaron a cabo pruebas exhaustivas y mediciones precisas para evaluar la capacidad del convertidor de gestionar la energía de manera eficiente y confiable en un entorno de vehículos eléctricos ligeros. Como se muestra en la Ilustración 1-5, las pruebas de validación se realizaron en un laboratorio bajo condiciones controladas.



**Ilustración 1-5:** Pruebas de laboratorio del Prototipo Convertidor TAB DC-DC.

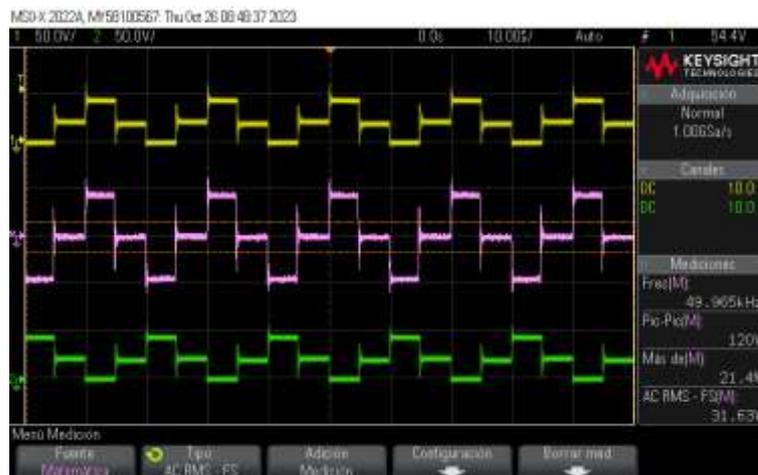
#### 5.1. Pruebas de Laboratorio

A continuación, se detallan las diversas pruebas de validación que se llevaron a cabo en el prototipo a través de experimentos en el laboratorio. Durante estas pruebas, se utilizaron voltajes específicos en distintos puertos del sistema. En el puerto 1, correspondiente a la entrada de la línea, se aplicó un voltaje de 45[V], mientras que en los puertos de salida 2 y 3 se emplearon 12[V] como tensiones de referencia. Estos experimentos se realizaron con el objetivo de evaluar el rendimiento y la eficiencia del prototipo en diferentes condiciones estáticas y dinámicas.



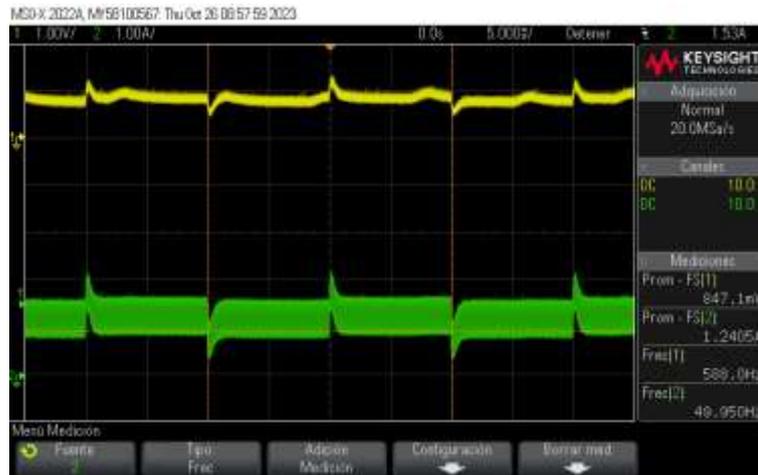
**Ilustración 2-5:** PWM en los Transistores Mosfet.

La Ilustración 2-5, representa las señales PWM en las compuertas de los transistores del puerto 1. Estas señales, identificadas como PWM1 (señal amarilla) y PWM2 (señal verde), presentan un desfase de 180 grados entre ellas. Es importante destacar que el ciclo de trabajo utilizado es del 48%, y la frecuencia de funcionamiento se mantiene en 50 [kHz].



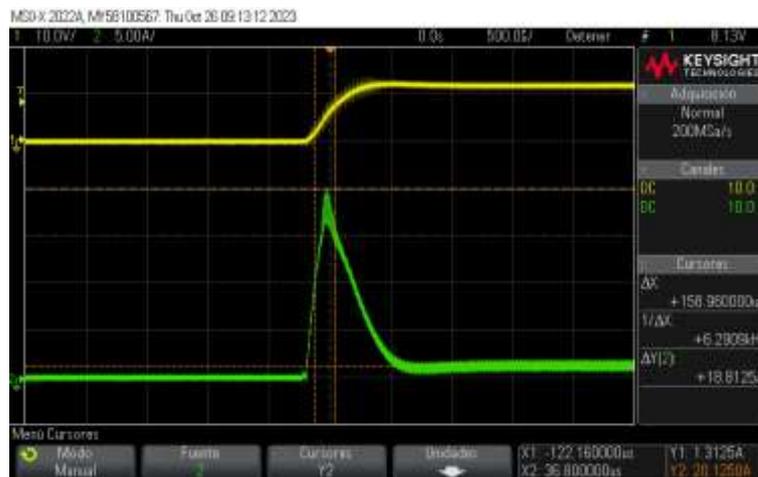
**Ilustración 3-5 :** Señales en el bobinado primario del transformador.

En la Ilustración 3-5, se presenta tres señales diferentes. La señal en amarillo corresponde al voltaje en el terminal 1 del Transformador Planar Serie MTPL con respecto a tierra, mientras que la señal en verde representa el voltaje en el terminal 2 del transformador también con relación a tierra. La señal morada representa la diferencia entre los voltajes en el terminal 1 y 2. Cabe destacar que esta medición es estática y proporciona una representación de los periodos de desmagnetización y magnetización de la bobina en el primario del transformador.

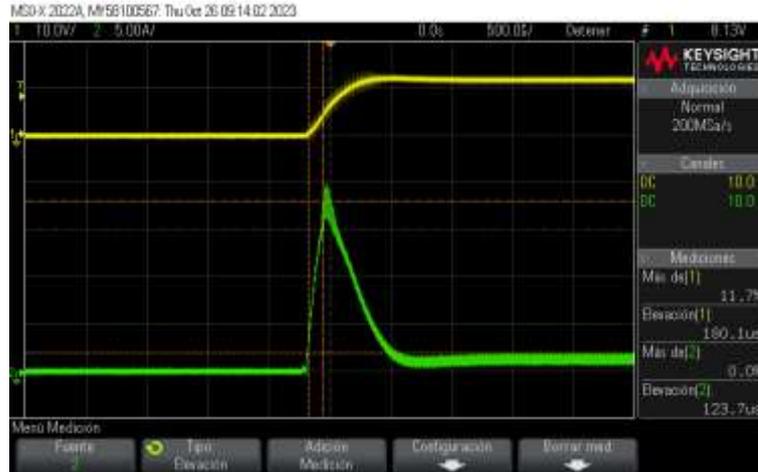


**Ilustración 4-5:** Señales de voltaje (amarilla) y corriente (verde) en el puerto 2 (Baterías).

En la Ilustración 4-5, representa una medición del comportamiento estacionario de las corrientes en los puertos del prototipo. La señal amarilla representa la corriente en el puerto 1 (Línea), la entrada de energía, mientras que la señal verde muestra la corriente en el puerto 2 (Baterías), medida en la bobina de filtraje del puerto. Estas mediciones estáticas se realizaron en un estado fijo, esencial para comprender cómo fluye la corriente y evaluar su comportamiento en distintos escenarios de operación.



**Ilustración 5-5 :** Medición de la respuesta dinámica de corriente (señal verde) en el puerto 2 (Baterías).



**Ilustración 6-5 :** Medición de la respuesta dinámica de voltaje (señal amarilla).

En la Ilustración 5-5, se presentan mediciones de la variación en la respuesta dinámica de la corriente en el puerto 2 (Baterías) con un tiempo de transición de  $\tau = 123[\mu\text{seg}]$ . Dado que tenemos valores específicos, donde  $Y1 = 1,31$  es y  $Y2 = 20.13$ , y sabiendo que la corriente se estabiliza en  $1.2[\text{A}]$  a los  $0.615[\text{ms}]$ , calculamos el sobre pico de corriente utilizando la fórmula  $\frac{Y1-Y2}{1.2}$ , lo que nos da un valor de  $1568.33\%$ .

En la Ilustración 6-5, observamos que el voltaje se estabiliza a los  $0.9[\text{ms}]$  y presenta un sobre pico del  $11.7\%$ . Calculamos el error en estado estacionario considerando que el voltaje real medido en la salida es  $11.67[\text{V}]$ , lo que resulta en un error de ruido en la señal de salida de  $r_{V_o} = \frac{2,4}{11,67} \times 100 = 20,56\%$  Además, utilizando los valores medidos en el puerto 1 (Línea) y en el puerto 2 (Baterías), podemos calcular uno de los aspectos cruciales para validar el prototipo: su eficiencia.

Datos en el puerto 1 (Línea):

$$V_{in} = 44,4 [\text{V}]; I_{in(DC)} = 830 [\text{mA}]; I_{in(AC)} = 84,4 [\text{mA}]$$

Datos en el puerto 2 (Baterías):

$$V_{out} = 11,67 [\text{V}]; I_{out(DC)} = 1,28 [\text{A}]$$

$$VRMS_{out(AC)} = 331 [\text{mV}]; IRMS_{out(AC)} = 288 [\text{mA}]$$

Se calcula la potencia de entrada y salida:

$$P_{in} = 44,4 [\text{V}] \times 830 [\text{mA}] = 36,852[\text{W}]$$

$$P_{out} = 11,67 [\text{V}] \times 1,28 [\text{A}] = 15,322[\text{W}]$$

La potencia de salida  $P_{out}$  de 15.322[W] se duplica debido a la presencia de dos puertos de salida (Batería y Motor), lo que resulta en una potencia de salida total de 30.6432[W].

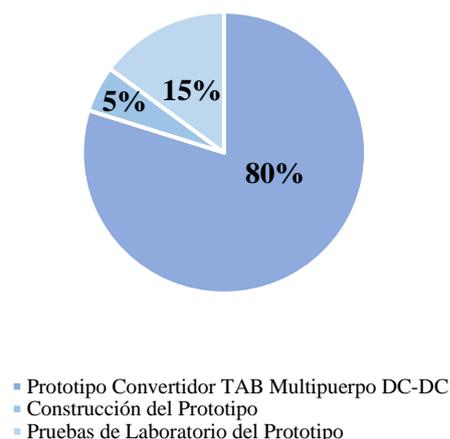
$$\eta = \frac{P_{out}}{P_{in}} \times 100 = \frac{30,6432[W]}{36,852[W]} \times 100 = 83,1521\%$$

Los resultados del estudio muestran la exitosa creación de un prototipo de convertidor DC-DC multipuerto diseñado específicamente para vehículos eléctricos ligeros. Este prototipo exhibe una eficiencia notable del 83.1521%, cumpliendo con los estándares de eficiencia de la industria que establecen un umbral superior del 80%. Estos datos respaldan la viabilidad del prototipo como una solución eficaz para la conversión DC-DC multipuerto, destacando su potencial aplicación en el contexto de vehículos eléctricos ligeros, donde la eficiencia energética es crítica.

## 5.2. Análisis de Costos del Prototipo

En el complejo proceso de fabricación de prototipos, la gestión eficiente de los recursos se vuelve crucial para asegurar tanto la efectividad del proceso como la calidad del producto final. Para ofrecer una perspectiva clara de la inversión, se presenta la Tabla 1-5 y la Ilustración 7-5, que detallan los costos asociados con componentes, diseño y pruebas del prototipo. Estos elementos visuales proporcionan una visión desglosada de la distribución de gastos en cada etapa del desarrollo, permitiendo una evaluación exhaustiva de la inversión en cada aspecto del proceso.

### Análisis de Costos del Prototipo



**Ilustración 7-5:** Diagrama de pastel del análisis de costo del prototipo.  
Realizado por: (Mazón 2023).

**Tabla 1-5 :** Tabla de Costos del Prototipo Implementado.

<b>Prototipo Convertidor TAB Multipuerto DC- DC</b>	Tarjetas de desarrollo STM32 NUCLEO-F767ZI	Cerebro del sistema, proporcionando funciones esenciales de control, regulación, monitoreo y protección para garantizar un rendimiento eficiente y confiable del convertidor en diversas condiciones de operación.	\$ 25,00
	Transformador Platar Serie MTPL- 2516-S24V	Encargado de facilitar la transferencia eficiente de energía entre los distintos puertos. Además, ofrece un aislamiento efectivo entre puertos para prevenir interferencias, presenta un diseño compacto y delgado, es compatible con el montaje en superficie, lo que facilita su integración en la PCB.	\$ 18,00
	Mosfet SCTWA35N65G2V	En cada puerto se incorporan 4 transistores de potencia, sumando un total de 12 transistores distribuidos estratégicamente para cumplir con las demandas específicas de rendimiento y capacidad de carga en el sistema.	\$ 180,00
	Disipadores Mosfet C247-050-2VE	Se emplean 6 unidades de disipadores de calor para los transistores de potencia, asegurando una eficiente gestión térmica en el sistema.	\$ 41,00
	Drivers SI8275ABD-IS1	Se utilizan 6 unidades de circuitos drivers para la conmutación de los MOSFET, asegurando un control preciso y eficiente durante el proceso de conmutación en el sistema.	\$ 36,00
	Sensores de los Puertos	Se emplean 3 sensores de corriente ACS712-30 y 3 sensores de voltaje ACPL-C780-000E en el sistema, proporcionando mediciones precisas y fiables de corriente y voltaje respectivamente.	\$ 40,00
	Fuentes DC-DC	Existen 3 fuentes aisladas para la transformación de 24[V] a 15[V] y una fuente adicional que realiza la conversión de 24[V] a 15[V].	\$ 41,32
	Componentes Pasivos y Activos	Condensadores de cerámica multicapa, Inductores de potencia (SMD), Resistores de película gruesa (SMD), Capacitores electrolíticos de aluminio, Transistores bipolares BJT (SMD), Diodos y rectificadores Schottky e Inductores de potencia (SMD).	\$ 145,95
	PCBs	Las PCB del microcontrolador y la PCB principal se fabrican en montaje superficial (SMD) a través del servicio proporcionado por el fabricante chino JLCPCB.	\$ 75,00
<b>Construcción del Prototipo</b>	Estación De Soldadura Proskit, Computador y Herramientas para ensamble del prototipo.	El costo del uso de la estación de soldadura, computador para realizar la programación del microcontrolador y las herramientas necesarias para el ensamble del prototipo, tales como estaño, pinzas de sujeción, flux y pasta térmica.	\$ 40,00
<b>Pruebas de Laboratorio del Prototipo</b>	Resistencias ARCOL 10 ohms	Resistencias que constituyen en el banco de baterías utilizado para realizar pruebas en los puertos de batería y motor.	\$ 72,00
	Instrumentos de Laboratorio	El costo asociado al uso del osciloscopio, computador para realizar la programación del microcontrolador, las pinzas amperimétricas, las fuentes de alimentación y el multímetro durante las pruebas.	\$ 40,00
<b>TOTAL:</b>			\$ 754,27

Realizado por: (Mazón 2023).

La Tabla 1-5 desglosa específicamente los costos asociados con cada componente y etapa del prototipo. Aquí, se presentan cifras detalladas y claras que facilitan la comprensión de la inversión realizada en cada aspecto del proyecto. Este análisis detallado no solo brinda transparencia en términos de gastos, sino que también se convierte en una herramienta valiosa para tomar decisiones informadas y para identificar áreas que podrían ser optimizadas en futuros proyectos de desarrollo de prototipos.

El Diagrama de Pastel, representado en la Ilustración 7-5, ofrece una visualización más intuitiva de la distribución de gastos. Este gráfico permite identificar de manera rápida y clara las áreas que tienen la mayor parte del presupuesto, siendo notable que el 80% corresponde al costo de los elementos que componen el prototipo en sí mismo. La presentación detallada de datos y el enfoque visual ofrecen una visión integral del manejo de recursos en el desarrollo del prototipo.

## CAPÍTULO VI

### CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

Luego de llevar a cabo este trabajo de investigación y desarrollo, es posible extraer conclusiones significativas en relación con los objetivos planteados:

- La revisión exhaustiva del estado del arte de los convertidores DC-DC multipuerto basados en celdas de fuente de voltaje pulsante permitió comprender las tendencias, avances y desafíos en este campo. Asimismo, el estudio de los métodos de diseño y fabricación de estos convertidores proporcionó un marco sólido para la creación de la propuesta de prototipo.
- La determinación precisa de los requerimientos de potencia, voltajes, número de puertos y modos de operación fue fundamental para diseñar un convertidor que cumpla con los estándares y necesidades reales de un vehículo eléctrico ligero. Esta etapa garantizó que el prototipo fuese capaz de integrarse de manera eficiente en dichos vehículos, optimizando su rendimiento energético.
- El diseño electrónico del convertidor DC-DC multipuerto se llevó a cabo meticulosamente, tomando en cuenta tanto los requerimientos previamente establecidos como aspectos cruciales como las pérdidas, la seguridad y el control del sistema de conversión. La consideración de estas variables aseguró la eficiencia y confiabilidad del prototipo.
- La etapa de implementación del sistema de conversión DC-DC multipuerto implicó la materialización de todo el proceso de diseño en un prototipo físico. Este paso incluyó la selección de componentes, el montaje y la interconexión de las placas y la configuración de los parámetros de operación. Cada uno de estos aspectos fue abordado con el objetivo de lograr un prototipo funcional y de calidad.
- Finalmente, se llevó a cabo una evaluación exhaustiva de la funcionalidad y rendimiento del convertidor DC-DC multipuerto implementado. A través de pruebas controladas de laboratorio, se verificó el cumplimiento de los objetivos planteados y se comprobó la adecuación del prototipo a su aplicación en vehículos eléctricos ligeros. Estas pruebas proporcionaron resultados sólidos que respaldan la viabilidad y eficacia del sistema de conversión diseñado.

- En adición a las conclusiones previas, se destaca la importancia crítica de fomentar el desarrollo de tecnologías sostenibles en el ámbito de la movilidad eléctrica. El prototipo de convertidor DC-DC multipuerto diseñado para vehículos eléctricos ligeros representa un paso significativo hacia la optimización de la eficiencia energética en el transporte. Al respaldar la implementación de soluciones como esta, se contribuye directamente a la reducción de emisiones y al impulso de un futuro más sostenible en la industria automotriz.

A raíz de las conclusiones obtenidas, es posible identificar una serie de recomendaciones que podrían enriquecer y complementar el trabajo realizado, así como abrir nuevas perspectivas de investigación y desarrollo:

1. **Optimización y Eficiencia Energética:** se sugiere enfocarse en la optimización de la eficiencia energética del Convertidor DC-DC Multipuerto. Esto implica investigar a fondo las pérdidas en los componentes y desarrollar estrategias de conmutación y control más avanzadas para maximizar la eficiencia de la conversión energética.
2. **Validación en Vehículos Reales:** Para llevar el prototipo a un nivel superior, se recomienda implementar pruebas en vehículos eléctricos ligeros en un entorno real. Esto permitirá evaluar su rendimiento en condiciones de uso reales y realizar ajustes finos para una operación óptima.
3. **Desarrollo de Plataforma de Simulación:** El desarrollo de una plataforma de simulación específica para convertidores DC-DC multipuerto sería de gran utilidad. Esto permitiría probar diferentes configuraciones y estrategias de control virtualmente antes de implementarlas en el prototipo físico, ahorrando tiempo y recursos.
4. **Investigación en Nuevas Topologías:** Explorar nuevas topologías de convertidores DC-DC puede abrir oportunidades interesantes. Investigar topologías híbridas o multietapa podría ofrecer soluciones más versátiles y eficientes para la conversión de energía en vehículos eléctricos ligeros.

## BIBLIOGRAFÍA

**ABRAMOVITZ, Alexander, LIAO, Chih Sheng and SMEDLEY, Keyue**, 2013. State-plane analysis of regenerative Snubber for Flyback converters. *IEEE Transactions on Power Electronics*. Vol. 28, no. 11, pp. 5323–5332. DOI 10.1109/TPEL.2013.2243845.

**AENOR**, 2003. Norma Española EN60950-1.

**ANALOG DEVICES**, 2008. Low Cost, 250 mA Output, Single-Supply Amplifiers AD8531/AD8532/AD8534. *Technology*.

**APPIANI, Andrea**, 2022. Arduino ® MEGA 2560 Rev3 Features. *Arduino ® MEGA 2560* [online]. pp. 1–18. Retrieved from : [www.arduino.cc](http://www.arduino.cc)

**ARM LIMITED**, 2023. ARM DEVELODER. [online]. 2023. Retrieved from : <https://developer.arm.com/AdditionalResources/VideoTutorials/ArmKeilStudio-CloudBasedIDEtoSimplifyIoTDevelopment>.

**AVAGO, Technologies**, 2013. ACPL-C78A/C780/C784 Data Sheet. *Avago* [online]. Vol. 31402, no. September 2004, pp. 0–1. Retrieved from : [http://www.papersearch.net/view/detail.asp?detail\\_key=10000715](http://www.papersearch.net/view/detail.asp?detail_key=10000715)

**BID Y DDPLAC**, 2019. CÓMO LLEGAR A Lecciones de América Latina y el Caribe. *Banco central del Ecuador*.

**CHAKRABORTY, Sajib et al.**, 2019. DC-DC converter topologies for electric vehicles, plug-in hybrid electric vehicles and fast charging stations: State of the art and future trends. *Energies*. Vol. 12, no. 8. DOI 10.3390/en12081569.

**CSAKI, F et al.**, 1980. No Title. In : *Power Electronics*. Budapest : Akademiai Kiadó.

**DAMIANO, A et al.**, 2012. The Plug-in Electric Vehicles Role in Smart Grid Development : a Survey. *EEVC European Electric Vehicle Congress*. No. November, pp. 1–12.

**DE DONCKER, Rik W.A.A., DIVAN, Deepakraj M. and KHERALUWALA, Mustansir H.**, 1991. A Three-Phase Soft-Switched High-Power-Density DC/DC Converter for High-Power

Applications. *IEEE Transactions on Industry Applications*. Vol. 27, no. 1, pp. 63–73. DOI 10.1109/28.67533.

**EDA, Easy**, 2023. EasyEDA Designer. [online]. 2023. Retrieved from : <https://easyeda.com/>

**EHSANI, Mehrdad et al.**, 2004. *Modern Electric, Hybrid Electric, and Fuel Cell Vehicles*. ISBN 0849331544.

**EWERT, Amelie et al.**, 2020. Small and Light Electric Vehicles: An analysis of feasible transport impacts and opportunities for improved urban land use. *Sustainability (Switzerland)*. Vol. 12, no. 19. DOI 10.3390/su12198098.

**FAIRCHILD**, 2008. Design and Application Guide of Bootstrap Circuit for High-Voltage Gate-Drive IC. *Fairchild Semiconductor*.

**FOROUZESH, Mojtaba et al.**, 2017. Step-Up DC – DC Converters : A Comprehensive Review of Voltage-Boosting Techniques ,. . Vol. 32, no. 12, pp. 9143–9178.

**GREEN, Authors Peter B and ZHENG, Liz**, 2022. Gate drive for power MOSFETs in switching applications A guide to device characteristics and gate drive techniques. . pp. 1–36.

**HART, Daniel W.**, 2001. *Electrónica de Potencia*. Madrid. ISBN 84-205-3179-0.

**INCORPORATED, Diodoes**, 2019. AP7370 Description. . No. March, pp. 1–18.

**INFINEON TECHNOLOGIES AG**, 2019. Light electric vehicles (LEVs).

**KANNAN, G**, 2017. A High Frequency Converter for EV Application. . Vol. 9, no. 1, pp. 5–11. DOI 10.11591/ijeecs.v9.i1.pp5-11.

**KHAN, Irshad and ENG, Mtech**, 2007. *Gate Drive Circuitry for Power Converters*. Third Edit. Elsevier Inc. ISBN 9780123820365.

**LIU, Yuan-chuan and CHEN, Yaow-ming**, 2009. A Systematic Approach to Synthesizing. *Ieee Transactions on Power Electronics*. Vol. 24, no. 1, pp. 116–127.

**MAGNETICS, Vishay Custom**, 2017. Versatile Through-Hole Planar Transformers. . No. 4, p. 4.

**MAHMOUDI, Chokri, FLAH, Aymen and SBITA, Lassaad**, 2014. An overview of electric Vehicle concept and power management strategies. *2014 International Conference on Electrical Sciences and Technologies in Maghreb, CISTEM 2014*. No. January 2015. DOI 10.1109/CISTEM.2014.7077026.

**MINI PIT BIKES**, 2019. Patinete Eléctrico 250W Xiao Malcor. [online]. 2019. Retrieved from : <https://www.minipitbikes.es/vehiculos-electricos/patinete-electrico-250w-xiao-malcor>

**NICE, Norman**, 2011. *Control Systems Engineering*. ISBN 9780470547564.

**OGATA, Katsuhiko**, 2013. *Ingeniería de Control Moderna*. ISBN 978-84-8322-660-5.

**OPENPLATFORM**, 2019. User Manual For ACS712 20A Range Current Sensor Module. [online]. 2019. Retrieved from : <http://www.openplatform.cc/>

**POWERSIM**, 2023. PSIM. [online]. 2023. Retrieved from : <https://powersimtech.com/products/psim/psim-modules/>

**RASHID, Muhammad H**, 2014. *Power electronics and applications*. ISBN 9780133125900.

**RECOM**, 2018. Features Unregulated Converters. [online]. pp. 1–8. Retrieved from : <http://www.farnell.com/datasheets/2787753.pdf>

**RECOM**, 2019. Features Unregulated Converters. [online]. pp. 1–8. Retrieved from : <http://www.farnell.com/datasheets/2787753.pdf>

**ROGGIA, Leandro et al.**, 2013. Comparison Between Full-Bridge-Forward Converter and DAB Converter. *2013 Brazilian Power Electronics Conference, COBEP 2013 - Proceedings*. pp. 224–229. DOI 10.1109/COBEP.2013.6785119.

**SAKKA, Monzer Al et al.**, 2011. DC / DC Converters for Electric Vehicles.

**SKYWORKS**, 2015. Si827x Data Sheet. *Datasheet*. pp. 0–42.

**SOLDADO, Joaquín**, 2022. Análisis del Rendimiento de Sistemas de Conversión DC-DC MISO

Aislado y No Aislado en Lazo Cerrado Basado en Controladores Clásicos Bajo un Entorno de Producción de Energía Renovable Híbrida mediante el Diseño, Modelado y Simulación.

**STMICROELECTRONICS**, 2018. STM32 Nucleo-144 boards. *STMicroelectronics*. Vol. 3304, no. January, pp. 1–148.

**STMICROELECTRONICS**, 2020. Datasheet Silicon Carbide Power MOSFET.No.June.

**TAPIA, Evelin**, 2023. La venta de autos híbridos y eléctricos batió récord en 2022. *Primicias* [online]. 2023. Retrieved from : <https://www.primicias.ec/noticias/economia/ventas-autos-electricos-hibridos-record/>

**THE MATWORKS**, 2023. Matlab. [online]. 2023. Retrieved from : <https://la.mathworks.com/products/matlab.html>

**UN ENVIRONMENT**, 2018. Putting the environment at the heart of people’s lives. Annual Report 2018. [online]. p. 44. Retrieved from : <http://www.unenvironment.org/annualreport/2018//annualreport/2018/index.php>

**VILLACIÁN, Cándido Capellán**, 2012. Aportaciones al Modelado del Transformador en Alta Frecuencia. *Universidad de Cantabria*.

**WANG, Yen Ching, NI, Fu Ming and LEE, Tzung Lin**, 2016. Hybrid Modulation of Bidirectional Three-Phase Dual-Active-Bridge DC Converters for Electric Vehicles. *Energies*. Vol. 9, no. 7. DOI 10.3390/en9070492.

**ZLATANOV, Nikola**, 2012. PCB Design Process and Fabrication Challenges. *PCB West Conference* [online]. Vol. 1, no. September 2012, pp. 10–13. Retrieved from : <https://www.researchgate.net/publication/299406927>





ESCUELA SUPERIOR POLITÉCNICA DE  
CHIMBORAZO

DIRECCIÓN DE BIBLIOTECAS Y RECURSOS DEL  
APRENDIZAJE



UNIDAD DE PROCESOS TÉCNICOS  
REVISIÓN DE NORMAS TÉCNICAS, RESUMEN Y BIBLIOGRAFÍA

Fecha de entrega: 23/ 11 / 2023

<b>INFORMACIÓN DEL AUTOR</b>
<b>Nombres – Apellidos:</b> Joseph Israel Mazón Mesías
<b>INFORMACIÓN INSTITUCIONAL</b>
<b>Facultad:</b> Informática y Electrónica
<b>Carrera:</b> Electrónica y Automatización
<b>Título a optar:</b> Ingeniero en Electrónica y Automatización
<b>f. Analista de Biblioteca responsable:</b> Ing. Fernanda Arévalo M.



1795-DBRA-UPT-2023