

ESCUELA SUPERIOR POLITÉCNICA DEL LITORAL

Facultad de Ingeniería en Electricidad y Computación

Control bidireccional de potencia en un automóvil eléctrico con batería dual 48/12V para mayor eficiencia energética

INGE-2832

PROYECTO INTEGRADOR

Previo la obtención del Título de:

Ingeniero Eléctrico

Presentado por:

Juan Alfredo Puig Mir Zambrano

Fabian Steven Cruz Troya

GUAYAQUIL-ECUADOR

Año: 2025

Dedicatoria

El presente proyecto se lo dedico a Dios por haberme dado la fuerza y la sabiduría a lo largo de este gran recorrido.

A mis padres, Felipe Puig Mir y Magaly Zambrano por haberme brindado su amor y apoyo incondicional, han sido mis pilares a lo largo de mi carrera universitaria, y que a través de sus consejos y lecciones de vida me han hecho una mejor persona.

A mis amigos del colegio que me demostraron su inmenso cariño con pequeños actos y sin que ellos supieran fueron un salvavidas en momentos donde los necesitaba. A todos los amigos que he hecho a lo largo de esta carrera, han sido momentos únicos, llenos enseñanzas y aprendizajes, gracias por compartirlos conmigo.

A mi compañero de tesis, cuyo apoyo y compromiso ha estado desde el primer día.

Finalmente, a todos lo que creyeron en mí y me ayudaron a llegar a donde estoy, nada de esto hubiera posible si no hubiera contado con su apoyo.

Att.

Juan Alfredo Puig Mir Zambrano

Dedicatoria

Este último trabajo del pregrado va dedicado a mis padres, a mis hermanos, a mis amigos y a Dios que me ayudaron en todo momento para alcanzar esta meta.

A mi grupo de estudio que hicieron de esta etapa llevadera y llena de momentos inolvidables.

A mis profesores, que contribuyeron con enseñanzas y consejos para toda la vida.

Y a quienes nunca dejaron de creer en mí, esto también es para ustedes.

Att.: Fabián Cruz

Agradecimientos

Quiero agradecer de todo corazón al rey de reyes por ser mi fortaleza y mi libertador porque solo él sabe cuánto me costó para terminar lo que un día empezó.

Agradezco a mis padres que fueron pacientes y me brindaron apoyo en todo momento.

A mis hermanos, mis amigos, mis colegas de carrera y a mí mismo por no darmel por vencido, por darmel la oportunidad de aprender a desaprender y a disfrutar de cada fracaso que me permitió llegar a la victoria.

A los profesores que me alentaron y a todos aquellos que dieron su granito de arena para que este reloj marque su final.

Muchas gracias, hoy mañana y siempre.

Att.: Fabián Cruz

Agradecimientos

Quiero agradecerles a todas las personas que de muchas maneras hicieron posible la realización de este trabajo.

A mis profesores por su entrega y dedicación al momento de impartir las materias a lo largo de mi carrera universitaria. Un agradecimiento especial a mi tutor, el ingeniero Ángel Recalde por su apoyo, guía y paciencia a lo largo de este proyecto, también un agradecimiento especial al profesor de la materia, el ingeniero Sixifo Falcones, que nos brindó sus conocimientos, consejos y orientaciones, sin ellos nada de esto hubiera sido posible.

Finalmente, a la ESPOL por darme la facilidad de poder haber culminado mis estudios universitarios en esta maravillosa universidad, que está llena de enseñanzas, lecciones de vida y un sin número de emociones.

Siempre estaré agradecido.

Att.

Juan Alfredo Puig Mir Zambrano

Declaración Expresa

Nosotros Fabián Steven Cruz Troya y Juan Alfredo Puig Mir Zambrano acordamos y reconozco/reconocemos que:

La titularidad de los derechos patrimoniales de autor (derechos de autor) del proyecto de graduación corresponderá al autor o autores, sin perjuicio de lo cual la ESPOL recibe en este acto una licencia gratuita de plazo indefinido para el uso no comercial y comercial de la obra con facultad de sublicenciar, incluyendo la autorización para su divulgación, así como para la creación y uso de obras derivadas. En el caso de usos comerciales se respetará el porcentaje de participación en beneficios que corresponda a favor del autor o autores.

La titularidad total y exclusiva sobre los derechos patrimoniales de patente de invención, modelo de utilidad, diseño industrial, secreto industrial, software o información no divulgada que corresponda o pueda corresponder respecto de cualquier investigación, desarrollo tecnológico o invención realizada por mí/nosotros durante el desarrollo del proyecto de graduación, pertenecerán de forma total, exclusiva e indivisible a la ESPOL, sin perjuicio del porcentaje que me/nos corresponda de los beneficios económicos que la ESPOL reciba por la explotación de mi/nuestra innovación, de ser el caso.

En los casos donde la Oficina de Transferencia de Resultados de Investigación (OTRI) de la ESPOL comunique los autores que existe una innovación potencialmente patentable sobre los resultados del proyecto de graduación, no se realizará publicación o divulgación alguna, sin la autorización expresa y previa de la ESPOL.

Guayaquil, 30 de mayo del 2025.

Autor 1

Autor 2

Evaluadores

Ing. Sixifo Falcones

Profesor de Materia

Ing. Ángel Recalde

Tutor de proyecto

Resumen

Los vehículos eléctricos se consolidan como una alternativa esencial en la transición hacia una movilidad sostenible, aunque persisten retos técnicos relacionados con la eficiencia energética y la gestión de sistemas de almacenamiento duales de 12 V y 48 V [1]. El presente trabajo plantea el diseño de un sistema de control bidireccional de potencia capaz de optimizar la transferencia de energía entre ambas baterías, garantizando el suministro confiable a los subsistemas de tracción y auxiliares. Para alcanzar este objetivo, se modeló en MATLAB/Simulink el convertidor LM5170EVM-BIDIR de Texas Instruments [2], integrado con un motor síncrono de imanes permanentes (PMSM) y validado bajo perfiles de manejo representativos. Posteriormente, el sistema fue preparado para su ejecución en tiempo real mediante la plataforma OPAL-RT, con el fin de reproducir condiciones dinámicas cercanas a la operación real del vehículo. Los resultados demostraron la factibilidad del esquema propuesto, evidenciando que el flujo de potencia bidireccional permite mantener niveles seguros de carga en las baterías y mejorar la eficiencia global del sistema. En conclusión, el proyecto constituye un aporte técnico aplicable a la electromovilidad moderna y escalable a escenarios industriales.

Palabras Clave: Electromovilidad, Baterías duales, Convertidor bidireccional, Eficiencia energética, OPAL-RT.

Abstract

Electric vehicles have emerged as a key alternative in the global transition toward sustainable mobility, although technical challenges related to energy efficiency and the management of dual 12 V and 48 V battery systems remain [1]. This work proposes the design of a bidirectional power control system aimed at optimizing energy transfer between both batteries, ensuring reliable supply to traction and auxiliary subsystems. To achieve this, the LM5170EVM-BIDIR converter from Texas Instruments [2] was modeled in MATLAB/Simulink, integrated with a permanent magnet synchronous motor (PMSM), and validated under representative driving cycles. Subsequently, the system was prepared for real-time execution through the OPAL-RT platform in order to reproduce dynamic conditions close to real vehicle operation. The results demonstrated the feasibility of the proposed scheme, showing that bidirectional power transfer allows maintaining safe charge levels in the batteries while improving the overall system efficiency. In conclusion, this project represents a technical contribution applicable to modern electromobility and scalable to industrial scenarios.

Keywords: *Electromobility, Dual batteries, Bidirectional converter, Energy efficiency, OPAL-RT.*

Tabla de contenido

Resumen	8
Abstract.....	9
Capítulo 1	18
1. Introducción	18
1.1. Descripción del problema	19
1.2. Justificación del problema	20
1.3. Objetivos.....	21
1.4. Marco Teórico	22
Capítulo 2	28
2. Metodología.....	28
2.1. Flujograma de la metodología	28
2.2. Selección topología del convertidor	29
2.3. Modelado y simulación en MATLAB/Simulink	29
2.4. Modelado del convertidor bidireccional LM5170EVM-BIDIR.....	37
2.5. Sistema de baterías	40
2.6. Diseño del sistema de control bidireccional	40
2.7. Simplificación del convertidor LM5170-Q1-BIDIR	42
2.8. Validación de la eficiencia energética mediante perfiles de conducción ..	44
2.9. OPAL RT.....	45
Capítulo 3	49
3. Resultados y análisis.....	49
3.1. Resultados de simulación en Matlab/Simulink.	49
3.2. Resultados en OPAL	60
Capítulo 4	66
4. Conclusiones y recomendaciones	66
4.1. Conclusiones.....	66

4.2. Recomendaciones	69
5. Referencias	71
ANEXOS	72
Cuadrantes de operación del bloque motor+inversor+controlador.....	72
Conversiones y ajustes	73
Cálculo de las ganancias empleadas para escalar la señal al torque que recibe el motor	
75	
Código para generar el perfil de manejo según los escenarios planteados	76
Código empleado para el convertidor bidireccional	80

Abreviaturas

BEV Vehículo eléctrico a batería (Battery Electric Vehicle)

BMS Sistema de gestión de batería (Battery Management System)

DC/DC Convertidor de corriente continua a continua (DC–DC Converter)

EMS Sistema de gestión energética (Energy Management System)

FCEV Vehículo eléctrico de celda de combustible (Fuel Cell Electric Vehicle)

FOC Control orientado al campo (Field-Oriented Control)

FTP-75 Federal Test Procedure 75 (ciclo de conducción)

FWD Tracción delantera (Front-Wheel Drive)

HEV Vehículo híbrido eléctrico (Hybrid Electric Vehicle)

HIL Hardware-in-the-Loop

HMI Interfaz humano-máquina (Human-Machine Interface)

I/O (E/S) Entradas/Salidas (Input/Output)

LAUNCHXL-F28379D Tarjeta TI Delfino para control/tiempo real

LM5170EVM-BIDIR Módulo de evaluación bidireccional basado en LM5170 (Texas Instruments)

LM5170-Q1 Controlador bidireccional automotriz 48/12 V (Texas Instruments)

MATLAB/Simulink Entorno de modelado y simulación de MathWorks

MOSFET Transistor de efecto de campo de metal-óxido-semiconductor

NEDC New European Driving Cycle (ciclo de conducción)

OPAL-RT Plataforma de simulación en tiempo real (OPAL-RT Technologies)

PI Control proporcional-integral

PID Control proporcional-integral-derivativo

PHEV Vehículo híbrido enchufable (Plug-in Hybrid Electric Vehicle)

PMSM Motor síncrono de imanes permanentes (Permanent-Magnet Synchronous Motor)

PWM Modulación por ancho de pulso (Pulse-Width Modulation)

RT Tiempo real (Real-Time)

RT-LAB Entorno de ejecución en tiempo real de OPAL-RT

SOC Estado de carga (State of Charge)

SUV Vehículo utilitario deportivo (Sport Utility Vehicle)

TI Texas Instruments

US06 Supplemental Federal Test Procedure (ciclo agresivo)

VE Vehículo eléctrico (Electric Vehicle)

VDC Voltaje de corriente continua (ej.: 12 VDC, 48 VDC)

WLTP Worldwide Harmonized Light Vehicles Test Procedure

Simbología

a aceleración longitudinal [m/s^2] — usada en el cálculo de torque del vehículo.

C capacitancia [F] — capacitores de filtrado en el convertidor (100–470 μF).

E energía [J o Wh] — para integrar potencia en escenarios.

f_{sw} frecuencia de conmutación PWM [Hz] — 100 kHz en el modelo.

G relación de engranajes (gear ratio) [–] — p. ej., 2:1.

i corriente [A] — corriente general en ramas del convertidor.

i_batt corriente de batería (genérica) [A] — usada en la lógica de modo.

i_conv corriente del convertidor [A] — sensada por shunt.

I_{12} , I_{48} corriente en los buses de 12 V y 48 V [A] — p. ej., $I_{48}=+30 \text{ A}$, $I_{12}=-8 \text{ A}$.

iB_ref48 referencia de corriente para el bus de 48 V [A].

L inductancia [H] — usada en $\text{V} = \text{L} \cdot \text{di}/\text{dt}$, inductores de transferencia.

m masa del vehículo [kg].

P potencia [W] — $\text{P} = \text{V} \cdot \text{I}$ para estimaciones energéticas.

r radio efectivo de la rueda [m] — cálculo del par en la rueda.

T torque/par [$\text{N} \cdot \text{m}$] — torque en rueda o motor.

T_c constante de tiempo del control de torque [s] — p. ej., $T_c = 0.02 \text{ s}$.

T tiempo [s].

v velocidad lineal del vehículo [m/s o km/h] — seguimiento del perfil.

V tensión/voltaje [V].

V_{12} , V_{48} tensiones nominales de los buses de 12 V y 48 V [V].

Letras griegas

H eficiencia [%] — eficiencia energética de las baterías/escenarios.

Subíndices y convenciones

$(*)_{12}$, $(*)_{48}$ magnitudes asociadas al bus de 12 V o 48 V (p. ej., V_{12} , I_{48}).

$(*)_r$ valor de referencia de control (p. ej., iB_{ref48}).

in/out entrada/salida del convertidor (cuando aplique).

Señales y banderas lógicas del modelo

AccelCmd, DecelCmd comandos normalizados de aceleración/freno (0–1) [-].

buck, boost banderas lógicas de modo reductor/elevador (0/1) [-].

SOC estado de carga de la batería [%].

Vel_Vehículo velocidad del vehículo obtenida del modelo [km/h].

Índice de figuras

Figura 1. Tipos de VE.....	22
Figura 2. Clasificación de vehículos eléctricos.	23
Figura 3. Modelado mediante la aplicación de VE en Matlab 2023	24
Figura 4. Secuencia de pasos a seguir para lograr los objetivos trazados.	28
Figura 5. Sistema de tracción del VE modelado en Simulink 2023a.	31
Figura 6. Sistema de tracción del VE modelado en Simulink 2023 ^a	31
Figura 7. Parámetros del motor y controlador.	33
Figura 8. Parámetros de la caja de engranaje.	34
Figura 9. Parámetros del diferencial.....	35
Figura 10. Parámetros de las llantas	36
Figura 11. Parámetros del cuerpo del vehículo.	36
Figura 12. Vista general del convertidor LM5170 en simulink.	38
Figura 13. Esquemático en bloques del convertidor DC/DC.	40
Figura 14. Esquema de diseño con la implementación del convertidor bidireccional entre las baterías.	41
Figura 15. Modo Boost con fuente de corriente controlada.	42
Figura 16. Modo BOOST	43
Figura 17. Modo Buck con fuente de corriente controlada.	43
Figura 18. Modo BUCK.....	44
Figura 19. Diagrama de vinculación entre MATLAB/Simulink, LM5170EVM-BIDIR y OPAL-RT.	45
Figura 20- Modelamiento para simulación en OPAL-RT.....	46
Figura 21. SC_HMI	47
Figura 22. SM_PROCESS.....	48
Figura 23. Modo buck de la batería de 48 VDC.....	49
Figura 24. Modo de boost de la batería de 12 VDC.	50
Figura 25. Osciloscopio con variables de interés.	52
Figura 26. Perfil de manejo vs la velocidad del vehículo eléctrico.	53
Figura 27. Tramo inicial del escenario donde el VE realiza su recorrido hasta la electrolinera.	54
Figura 28. Perfil de carga de la electrolinera.....	55
Figura 29. SOC de la batería en la electrolinera.....	55

Figura 30. SOC inmediatamente que el VE deja la electrolinera.....	56
Figura 31. Perfil de carga boost de la batería de 12 a la de 48 VDC.....	57
Figura 32. SOC mientras el VE está andando y la batería de 12 VDC envía energía a la de 48 VDC.....	57
Figura 33. Relación entre la velocidad del vehículo y el estado de carga de la batería. .	58
Figura 34. Relación entre el voltaje y el estado de carga de la batería.....	59
Figura 35. Simulacion en OPAL RT.....	60
Figura 36. Comportamiento del voltaje, SOC y corriente ante una variación positiva de la corriente referencial.....	61
Figura 37. Comportamiento del voltaje, SOC y corriente ante una variación positiva de la corriente referencial.....	62
Figura 38. Comportamiento del voltaje, SOC y corriente ante una variación negativa de la corriente referencial.....	64
Figura 39. Comportamiento del voltaje, SOC y corriente ante una variación negativa de la corriente referencial.....	65
Figura 40. Cuadrantes del bloque motor and drive (System level).	72
Figura 41. Torque vs velocidad actuando desde la mecánica c hasta el puerto R.....	72
Figura 42. Parámetros adicionales del longitudinal driver.....	73
Figura 43. Ajustes de las unidades empleadas en la simulación.	74
Figura 44. Gains para convertir las señales adimensionales de aceleración y freno en torque.....	74

Capítulo 1

1. Introducción

Los vehículos eléctricos (VE) se han posicionado como una de las soluciones tecnológicas más relevantes dentro de la transición hacia una movilidad sostenible, al contribuir a la reducción de emisiones y a la disminución de la dependencia de combustibles fósiles [1]. No obstante, a pesar de los avances alcanzados en la electrificación del transporte, los sistemas de potencia de los VE aún enfrentan limitaciones importantes relacionadas con la eficiencia energética y la integración de arquitecturas más flexibles.

En respuesta a estos desafíos, los fabricantes han comenzado a implementar configuraciones basadas en sistemas de batería dual de 12 V y 48 V, especialmente en vehículos tipo SUV y de gama media-alta. Este tipo de arquitectura permite atender de manera diferenciada los requerimientos energéticos de los subsistemas de tracción y de los sistemas auxiliares, como climatización, iluminación o electrónica embarcada. Sin embargo, la coexistencia de dos niveles de tensión exige la aplicación de estrategias de control más avanzadas que garanticen la coordinación efectiva y la transferencia de energía en ambos sentidos [2].

Ante este contexto, se plantea la necesidad de un sistema de control de potencia bidireccional que optimice el flujo energético entre las baterías duales, adaptándose dinámicamente a las condiciones de operación del vehículo. En este trabajo se aborda el modelado y simulación del convertidor LM5170EVM-BIDIR de Texas Instruments, un dispositivo diseñado específicamente para aplicaciones automotrices con sistemas de 48 V y 12 V [3]. Dicho convertidor será implementado en un entorno de simulación en MATLAB/Simulink, acoplado a un motor síncrono de imanes permanentes (PMSM) y gestionado mediante la tarjeta de control TI Delfino LAUNCHXL-F28379D.

Finalmente, el modelo será integrado en la plataforma OPAL-RT para validación en tiempo real, lo cual permitirá evaluar su desempeño bajo perfiles de manejo representativos y condiciones dinámicas cercanas a la operación real. En consecuencia, el presente proyecto constituye un aporte técnico a la electromovilidad, orientado a mejorar la eficiencia energética en los VE y a consolidar soluciones escalables aplicables al sector automotriz moderno.

1.1. Descripción del problema

El desarrollo de vehículos eléctricos constituye una respuesta estratégica frente a la dependencia global de combustibles fósiles y a la creciente preocupación por las emisiones contaminantes. A pesar de los avances alcanzados, los sistemas eléctricos de potencia en estos vehículos continúan presentando desafíos significativos en cuanto a eficiencia energética, gestión del flujo de potencia y coordinación entre subsistemas que operan a diferentes niveles de tensión.

En particular, uno de los retos más actuales es la coordinación efectiva de la transferencia de energía entre baterías duales de 48 V y 12 V, una arquitectura que se ha consolidado en vehículos modernos tipo SUV debido a la necesidad de suministrar energía diferenciada a subsistemas de tracción y auxiliares [2]. Frente a este contexto, se identifica la necesidad de un sistema de control de potencia bidireccional que gestione de manera eficiente la energía entre ambas baterías, adaptándose al estado operativo del vehículo.

El convertidor LM5170EVM-BIDIR de Texas Instruments constituye una plataforma idónea para validar esquemas de transferencia bidireccional en tiempo real, al ofrecer la capacidad de operar en ambos sentidos de flujo de energía bajo condiciones controladas

[3]. De esta manera, el problema técnico central abordado en este proyecto consiste en diseñar e implementar un sistema de control que, mediante la operación del convertidor LM5170, maximice la eficiencia energética del vehículo eléctrico. Este control debe considerar parámetros dinámicos como el perfil de conducción, la demanda de cargas auxiliares y el estado de carga de cada batería, garantizando así un uso equilibrado y sostenible de los recursos energéticos.

1.2. Justificación del problema

La eficiencia en la gestión de energía constituye uno de los principales retos en el diseño de vehículos eléctricos, pues de ella depende tanto la autonomía como el aprovechamiento óptimo de los recursos disponibles. En este contexto, la implementación de un sistema de control bidireccional de potencia entre baterías duales de 12 V y 48 V se plantea como una alternativa estratégica para maximizar el uso energético bajo condiciones reales de conducción, adaptándose a las demandas cotidianas de un usuario.

La propuesta integra convertidores bidireccionales de última generación, modelado computacional en MATLAB/Simulink y validación en tiempo real mediante plataformas de simulación, lo cual garantiza un desempeño caracterizado por seguridad, fiabilidad y eficiencia. Un incremento en la eficiencia energética se traduce en un menor consumo eléctrico, con el consecuente beneficio de reducir tanto la huella de carbono como los costos operativos del vehículo.

Adicionalmente, el proyecto aporta al avance de la electromovilidad al alinearse con políticas internacionales de sostenibilidad y movilidad limpia [1]. Su valor diferencial radica en el énfasis en condiciones de conducción reales, aspecto crucial para evaluar el desempeño práctico del sistema. Finalmente, la solución propuesta posee potencial de escalabilidad industrial, al ser viable para su incorporación por fabricantes automotrices como parte de estrategias de innovación y mejora continua. De esta manera, el proyecto

combina innovación tecnológica, impacto social y sostenibilidad, respondiendo a una necesidad crítica del sector automotriz eléctrico desde un enfoque integral [2].

1.3. Objetivos

1.3.1. Objetivo general

Diseñar un sistema de control de potencia bidireccional para VE con batería dual 12V/48V mediante simulaciones en el software Matlab SIMULINK y plataformas de simulación en tiempo real, que permita la optimización de la eficiencia energética bajo perfiles reales de conducción.

1.3.2. Objetivos específicos

1. Modelar la parte de fuerza del convertidor LM5170EVM-BIDIR de Texas Instruments en MATLAB para su funcionamiento con un sistema eléctrico de automóvil con sistema de batería dual de 12/48 V DC.
2. Modelar sistema de tracción del vehículo eléctrico con un PMSM.
3. Simular en MATLAB/Simulink el comportamiento de un vehículo eléctrico bajo perfiles de manejo representativos, evaluando distintos escenarios de carga, descarga y transferencia bidireccional de energía entre baterías duales de 12 V y 48 V para el análisis del porcentaje de estado de carga (SOC) en cada escenario.
4. Adaptar el modelo de simulación del vehículo eléctrico con baterías duales de 12 V y 48 V a la plataforma OPAL-RT, mediante bloques de comunicación que permitan su ejecución en tiempo real y la verificación del desempeño del sistema de control bidireccional.

1.4. Marco Teórico

1.4.1. Tipo de VE

Se clasifican según el tipo de motores ya que estos pueden ser de combustión o eléctricos y como sabemos puede haber una combinación entre tipo de motores, así que tenemos lo siguiente:



Figura 1. Tipos de VE.

Los tipos HEV (Hybrid Electric Vehicle) son los que tienen un motor de combustión y uno o varios motores eléctricos, cabe recalcar que esa batería es no enchufable, mientras que los híbridos que tienen la batería enchufable se les conoce como PHEV (Plug in Hybrid Electric Vehicle). Los tipos FCEV (Fuel Cell Electric Vehicle) son los que tienen una pila de combustible de hidrógeno y sus motores solo son eléctricos, ya que la energía la obtienen de dicha pila de combustible. Por último, tenemos los BEV (Battery Electric Vehicle) que únicamente utilizan baterías para energizar los motores eléctricos, además no realiza emisiones lo cual reduce su impacto ambiental, al no consumir gasolina se reduce el costo por mantenimiento y lo que más resulta interesante es que tiene la ventana abierta a las energías renovables para la carga de la batería. Entre las desventajas que encontramos es que depende de la estructura del país para la carga de la batería, ya que hay pocos

puntos de carga hablando en el contexto ecuatoriano y el tiempo de carga es mayor en comparación a los demás tipos de VE .

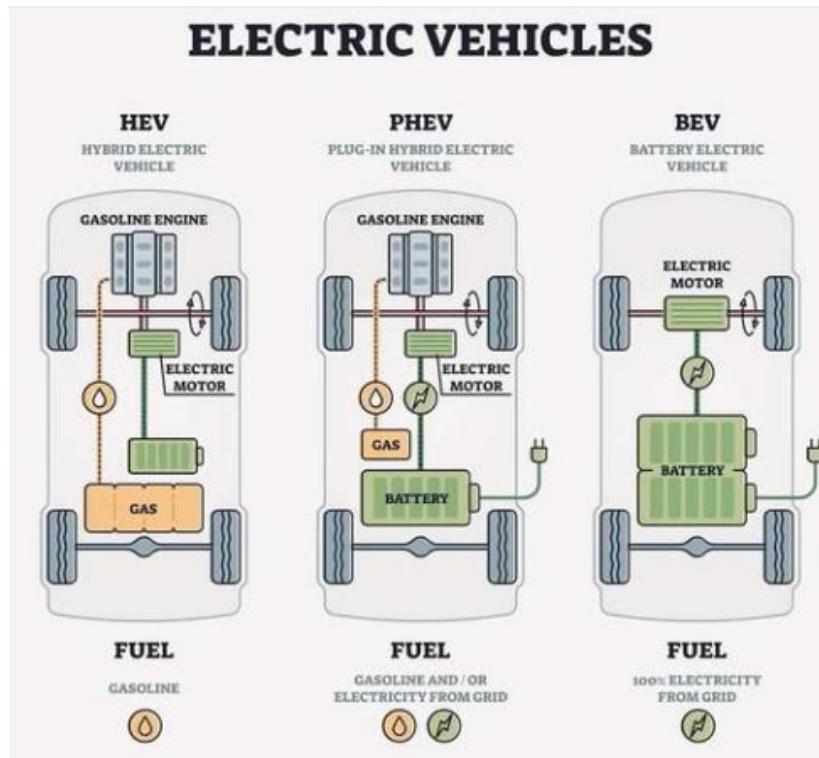


Figura 2. Clasificación de vehículos eléctricos.

Se puede observar en la ilustración 2 los componentes de los VE para una mejor comprensión de lo previamente tratado con la finalidad de entrar a detalle en las siguientes secciones del documento. Además, si analizamos el BEV podemos comprender mejor el sistema de batería duales que se encargan de alimentar al motor de imanes permanentes según lo que se solicita, es decir, si queremos climatización que el que alimente al motor eléctrico sea la batería de 12 V y que la de 48 V sea para la tracción y así lograr una mejora en la eficiencia energética. Finalmente, es necesario definir en esta sección que trabajaremos con vehículos con un nivel de tracción “Front Wheel drive” (FWD)

1.4.2. Componentes de un vehículo eléctrico

1.4.2.1. Sistema de tracción

El tren motriz de un BEV integra el convertidor/inversor, la máquina eléctrica, la transmisión (cuando aplica) y los elementos de acoplamiento mecánico (diferencial, ejes y ruedas). Entre las máquinas empleadas, el motor síncrono de imanes permanentes (PMSM) destaca por su alta densidad de potencia, elevada eficiencia en un rango amplio de velocidades y capacidad de control vectorial con excelente respuesta dinámica. El PMSM resulta especialmente adecuado para perfiles de manejo con demandas transitorias, al ofrecer alto par a bajas velocidades y una caída de par controlada a altas revoluciones por limitaciones de tensión y térmicas [5]. En simulación, los modelos a nivel de sistema (system-level) permiten capturar la interacción electro-mecánica con un costo computacional razonable, condición clave para estudios energéticos y de control.

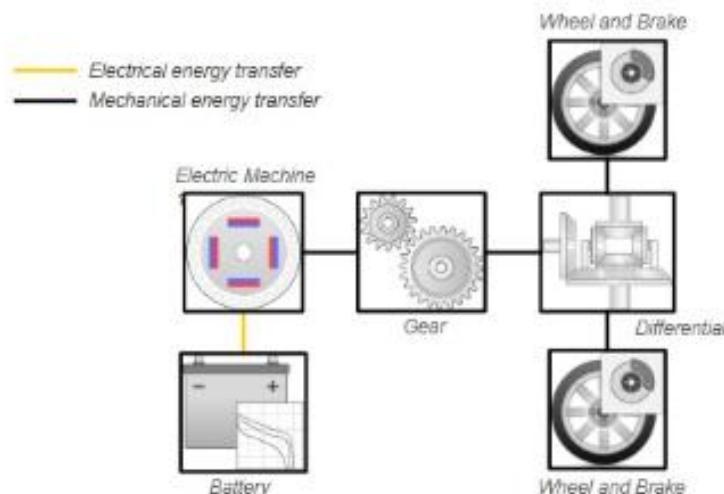


Figura 3. Modelado mediante la aplicación de VE en Matlab 2023

1.4.3. Baterías de ion-litio en movilidad eléctrica

Los BEV utilizan, de forma predominante, baterías de ion-litio por su alta densidad energética y buen rendimiento cíclico. El comportamiento electroquímico depende de variables como estado de carga (SOC), resistencia interna, temperatura y envejecimiento. Estos factores impactan la potencia instantánea disponible, la capacidad útil y la eficiencia de carga/descarga, por lo que la simulación requiere parametrizaciones realistas y un manejo explícito de límites operativos (ventanas de SOC y temperaturas seguras). Un sistema de gestión de batería (BMS) coordina medición, protección y balanceo, y aporta estimaciones de SOC/estado de salud (SOH) para la toma de decisiones del control energético [6]. En el presente proyecto se adoptan dos niveles de tensión (48 V y 12 V) con funciones diferenciadas (tracción y auxiliares), lo que demanda electrónica de potencia y control para coordinar el intercambio entre ambos buses.

1.4.4. Conversión DC/DC bidireccional en arquitecturas 48/12 V

La coexistencia de buses de 48 V (subsistemas de mayor potencia) y 12 V (auxiliares tradicionales) requiere convertidores DC/DC bidireccionales capaces de operar en modo buck (48→12 V) y modo boost (12→48 V) con alta eficiencia y respuesta rápida. La literatura reporta diferentes topologías —desde buck-boost síncrono a dual active bridge y soluciones multinivel—, con compromisos entre eficiencia, densidad de potencia, complejidad de control y comportamiento dinámico [7].

En este proyecto se emplea el LM5170-Q1/LM5170EVM-BIDIR como referencia tecnológica para el modelado. Este controlador está orientado a automoción, integra sensado de corriente y gestión de PWM sincronizado para flujos en ambos sentidos, y admite estrategias de control por lazo de corriente interno y lazo de tensión externo en arquitecturas 48/12 V [3]. Dichas características facilitan el diseño de esquemas de

gestión energética que comutan entre buck/boost según SOC y demandas instantáneas, minimizando el rizado de corriente/tensión y maximizando la eficiencia del intercambio.

Desde el punto de vista de modelado, resulta habitual utilizar modelos de promedio (average models) para capturar la dinámica del convertidor en estudios de eficiencia/energía con pasos de integración compatibles con validación en tiempo real; cuando interesa analizar fenómenos de conmutación, pueden emplearse modelos con MOSFETs y filtros LC explícitos, a costa de mayor carga computacional [7].

1.4.5. Simulación y validación en tiempo real (OPAL-RT)

La simulación en tiempo real (RT) permite ejecutar modelos con un paso fijo compatible con hardware dedicado, conectando el “planta modelo” con controladores/IO físicos (HIL, Hardware-in-the-Loop). En electrónica de potencia y tracción, esta metodología reduce riesgo experimental y acelera la iteración de control, al reproducir condiciones dinámicas cercanas a las reales con instrumentación determinística de entrada/salida.

La plataforma OPAL-RT proporciona planificación determinista, interfaces de E/S, y entornos como RT-LAB, facilitando la partición del modelo en procesos (planta) y HMI/IO, además de la integración con microcontroladores o tarjetas de control (p.ej., TI Delfino) mediante protocolos y bloques de comunicación estándar. Para alcanzar tiempos de ciclo en RT, es recomendable:

- Discretizar el modelo con pasos compatibles con la frecuencia de actualización del sistema
- Simplificar el detalle de conmutación (usando promedios) cuando la meta es energética

- Estructurar claramente los subsistemas para minimizar dependencias algebraicas y asegurar estabilidad numérica [8].

En el marco del presente trabajo, el uso de OPAL-RT habilita la evaluación HIL del control bidireccional y del tren de tracción bajo perfiles de manejo representativos, con métricas objetivas de desempeño (e.g., seguimiento de velocidad, flujos de potencia, evolución de SOC), sin incurrir en los riesgos y costos de un montaje físico temprano.

Capítulo 2

2. Metodología.

Para el desarrollo de este proyecto, se planteó un enfoque de modelado, simulación y validación experimental orientado al diseño de un sistema de control bidireccional de potencia en un vehículo eléctrico con sistema de baterías dual 12V/48V, la metodología se dividió en varias fases que permitieron un abordaje sistemático del problema técnico identificado.

2.1. Flujograma de la metodología

En este flujo se muestra de forma secuencial los pasos realizados en este proyecto de simulación.

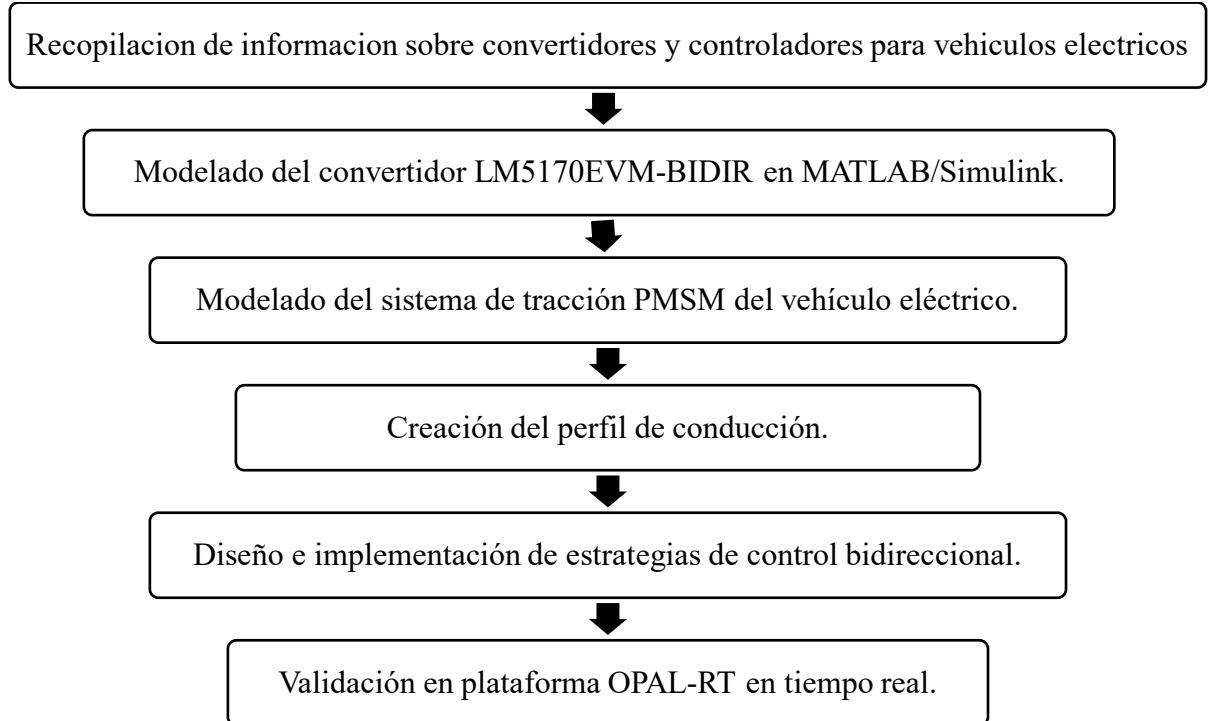


Figura 4. Secuencia de pasos a seguir para lograr los objetivos trazados.

2.2. Selección topología del convertidor

En el ámbito de la electrónica potencia moderna, existen múltiples opciones de convertidores bidireccionales DC-DC que permitan la transferencia controlada de energía entre dos baterías. Estos dispositivos son fundamentales en aplicaciones como VE, sistemas híbridos, entre otros ya que posibilitan la carga y descarga de baterías haciendo una correcta gestión energética entre fuentes. Entre los convertidores más reconocidos se encuentran el LTC3871 de Analog Devices, el TLE8366EV de Infineon, los módulos BCM/NBM de Vicor y el LM5170 de Texas Instruments. Cada uno ofrece características específicas según la aplicación [1].

El LM5170 está diseñado para control bidireccional de potencia en sistemas de baterías duales, empleando una topología sincronizada buck-boost, además de que soporta medición interna de corriente y voltaje, lo cual simplifica la integración con sistemas de control digital, permitiendo el diseño de lazos de corriente internos y lazos de voltaje externos mediante técnicas clásicas de control analógico o digital [2]. Este tipo de arquitectura ha sido ampliamente estudiada desde hace varios años en donde se resalta la importancia de lograr alta eficiencia, bajo volumen y adecuado manejo térmico en este tipo de convertidores [3].

2.3. Modelado y simulación en MATLAB/Simulink

Inicialmente, se evaluaron diversas arquitecturas de conversión de potencia disponibles para aplicaciones de batería dual. Se consideraron convertidores DC-DC bidireccionales comerciales, destacando el LM5170EVM-BIDIR de Texas Instruments por su capacidad de trabajar con voltajes de 12V y 48V y su versatilidad de control y amplia documentación técnica. Además, se analizaron distintas estrategias de control, optándose por un esquema de doble lazo, es decir un control de corriente interno y control

de voltaje externo, con posibilidad de operar en modos de carga, descarga y transferencia de energía bidireccional según los perfiles de manejo del vehículo.

Para el modelado del sistema completo se empleó MATLAB/Simulink en combinación con Simscape Electrical, permitiendo representar tanto los elementos eléctricos como mecánicos involucrados. Se desarrolló un modelo estructurado, dividiendo el sistema en tres subsistemas principales: el convertidor bidireccional LM5170, el sistema de tracción con el motor PMSM y el banco de baterías duales. El modelo del convertidor se implementó en base al diagrama de aplicación del datasheet del LM5170-Q1, incluyendo etapas de modulación PWM, sección de conmutación con MOSFETs, filtros LC, sensores de corriente tipo shunt y lógica de modo de operación (buck/boost) mediante señales condicionales [4]. La frecuencia de operación se fijó en 100 kHz conforme a lo recomendado por el fabricante. Además, se utilizaron componentes reales como inductancias de $4.7 \mu\text{H}$ y capacitores de $470 \mu\text{F}$ para simular el comportamiento dinámico del convertidor.

Por su parte, el modelo de tracción fue desarrollado utilizando bloques del entorno “Electric Vehicle Model” y “Simscape Driveline”. Se modeló un motor para aplicaciones de tracción como lo es el VE. Este motor fue acoplado a un sistema de engranajes, diferencial y ruedas, replicando la dinámica longitudinal del vehículo. Adicionalmente, se integró una lógica de control que gestiona el flujo de energía dependiendo del estado de carga (SOC) de cada batería y las demandas del motor.

2.3.1. Sistema de tracción

Se modeló el motor PMSM en MATLAB/Simulink, incluyendo el modelo de fuerza y el acoplamiento al sistema de transmisión básico del VE, tomando como referencia el modelamiento de la ilustración 5. El sistema de tracción cuenta con un motor de imanes permanentes, sistema de engranajes, diferencial, neumáticos y el cuerpo del

vehículo, algo que simula mucho a la realidad de la composición de un VE, cada bloque fue parametrizado en base a valores típicos y que permitieran la correcta funcionalidad de lo simulado [5]. El modelo permitió simular de forma precisa la respuesta dinámica del vehículo ante los perfiles de manejo.

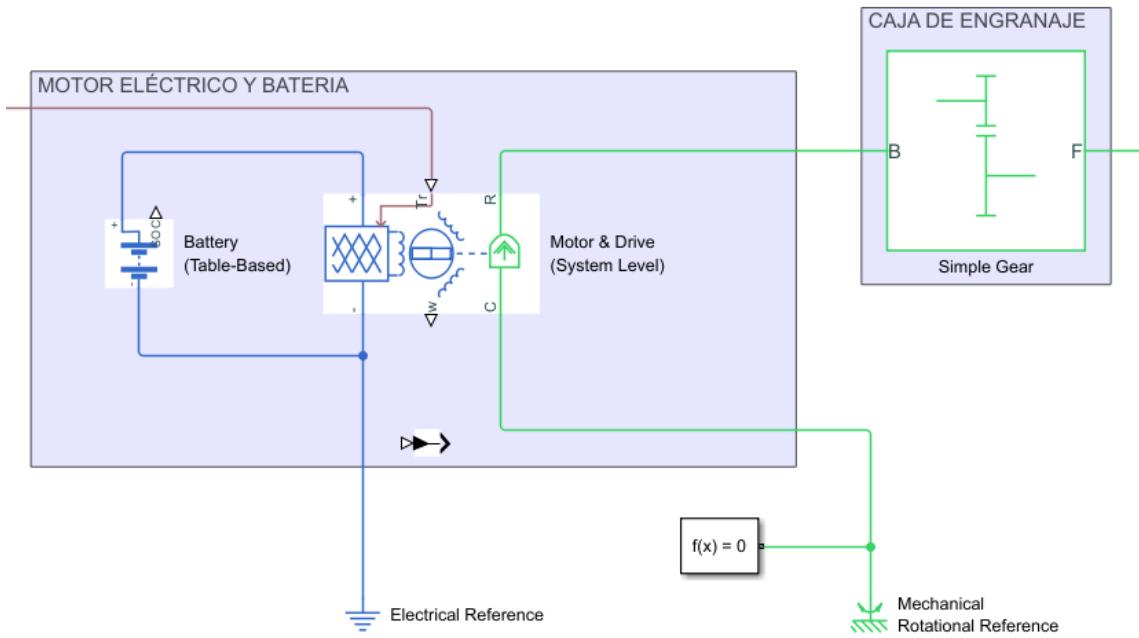


Figura 5. Sistema de tracción del VE modelado en Simulink 2023a.

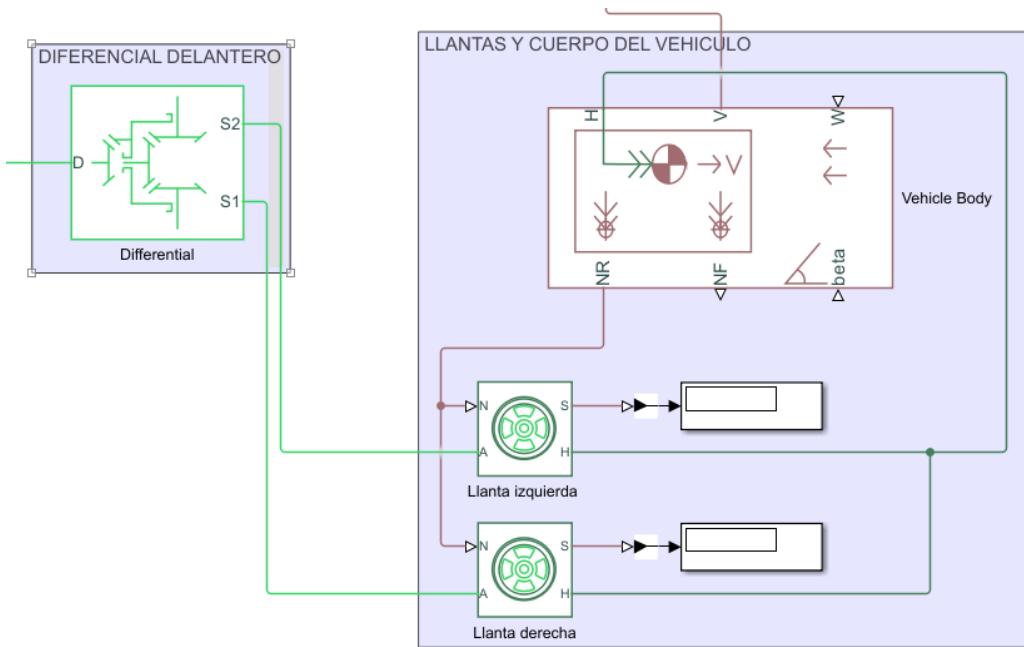


Figura 6. Sistema de tracción del VE modelado en Simulink 2023a.

2.3.1.1.Motor Eléctrico

El modelo permite representar de forma precisa la respuesta del motor frente a distintas demandas de torque y velocidad, para el presente proyecto se utilizó el bloque “Motor & Drive (System Level)” que representa a un motor de imanes permanentes al no tener escobillas y tiene integrado un inversor trifásico ideal y un controlador. Este bloque es adecuado debido a su énfasis eléctrico al momento de parametrizar y su enfoque en analizar la dinámica del VE mas no los detalles electrónicos como los del inversor y lo del controlador [6].

En el modelado del motor de imanes permanentes (PMSM) se utilizaron parámetros eléctricos y mecánicos realistas en motores comerciales de tracción vehicular. En la sección de torque eléctrico se parametrizó por tabulación de par con la velocidad, y los valores referenciales que se colocaron fueron los siguientes:

- Torque continuo máximo [400, 300, 200, 100] N·m
- Velocidades correspondientes [0, 2000, 4000, 6000] rpm

Esta curva refleja el comportamiento típico de un motor síncrono de imanes permanentes (PMSM) usado en VE, donde el torque es alto a bajas velocidades y decrece progresivamente por restricciones térmicas y de tensión [7]. Además, se estableció una constante de tiempo de control de torque $T_c=0.02s$, que simula una rápida respuesta del sistema de control embebido en el inversor. En la sección mecánica se colocaron valores de inercia y amortiguamiento que representan un rango realista para motores PMSM de tracción ligera [8]. Los demás detalles de la configuración del sistema Motor Drive el lector lo puede encontrar en la sección de anexos.

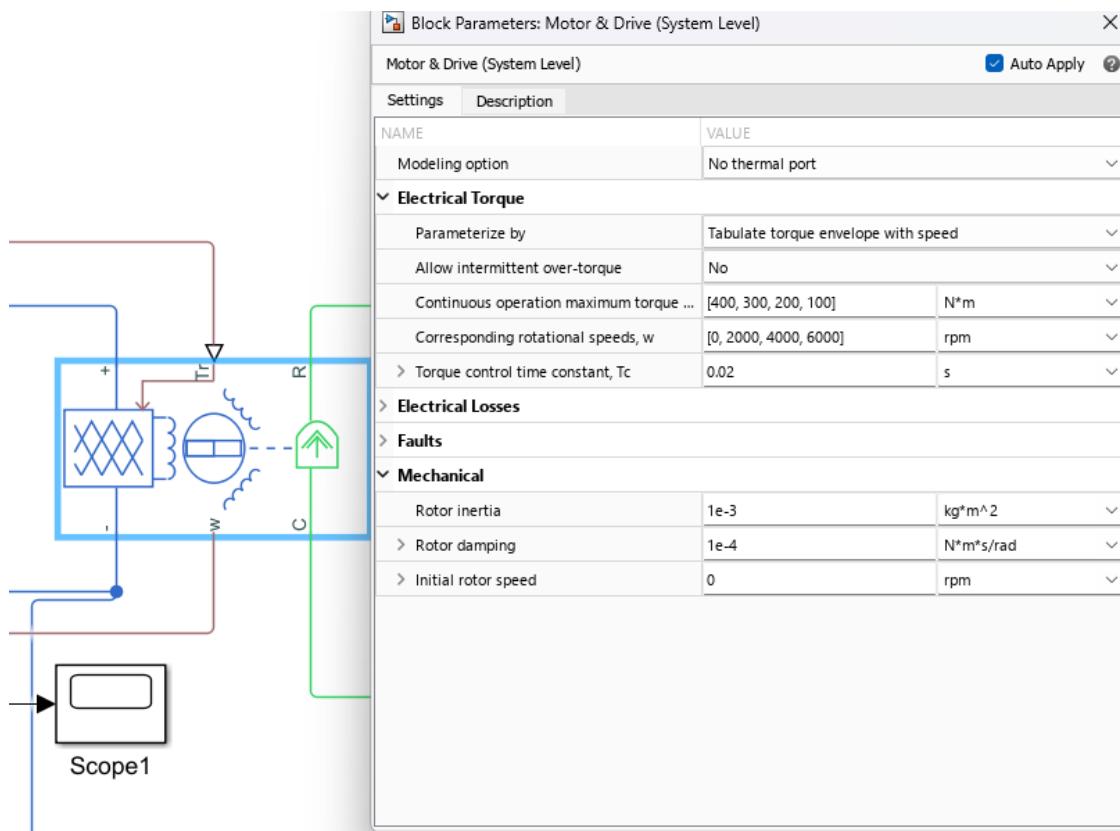


Figura 7. Parámetros del motor y controlador.

2.3.1.2. Sistema de engranajes

Se empleó un bloque de “Simple Gear” que representa una relación mecánica fija entre dos ejes rotacionales que vienen a ser la entrada (B) y la salida (F). Su función principal fue modificar el torque y la velocidad angular del eje de entrada (motor) hacia el eje de salida (transmisión final). El bloque permite simular la reducción de velocidad y aumento de torque entre el motor y el diferencial, este bloque nos permite representar la conversión de las RPM del motor en la fuerza que será transmitida a las ruedas. Tal como se muestra en la ilustración 7, se utilizó una relación de transmisión de 2:1, lo que

implica que el eje de salida gira a la mitad de la velocidad del eje de entrada, pero con el doble de par.

2.3.1.3. Diferencial

El bloque “Differential” representó un diferencial mecánico abierto de tres ejes:

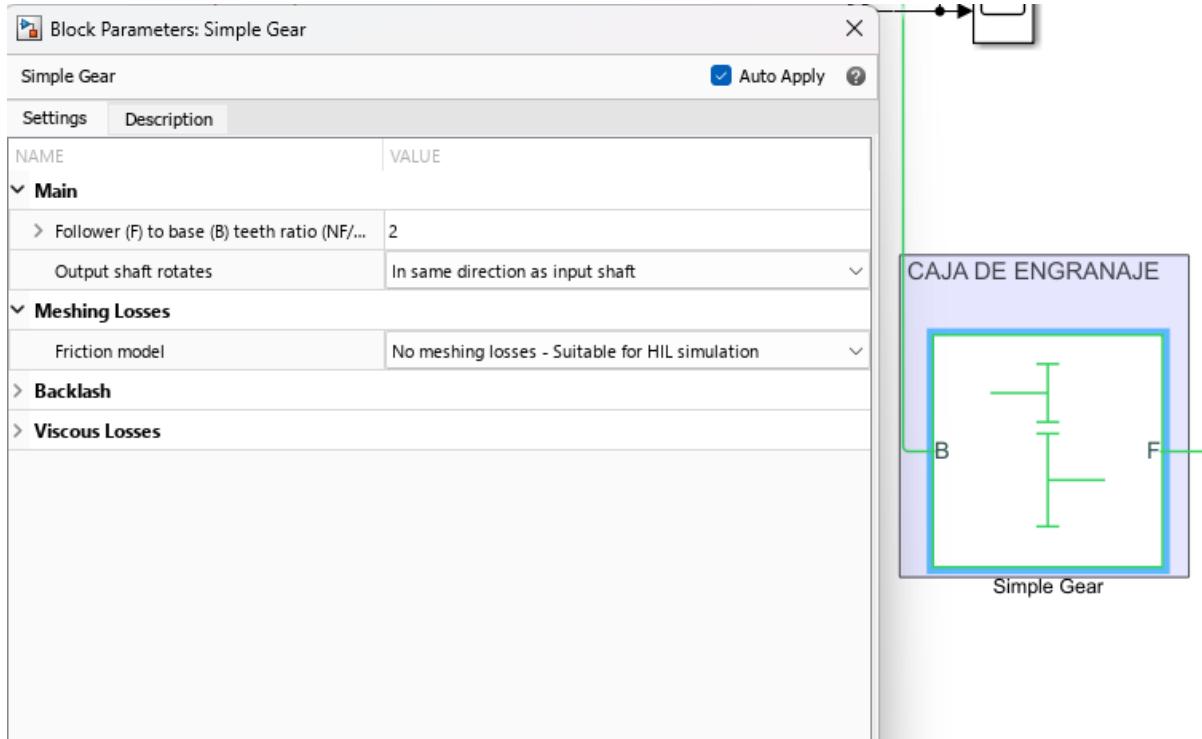


Figura 8. Parámetros de la caja de engranaje.

entrada (D) y dos salidas (S1 y S2). Este componente se encargó de dividir la potencia mecánica hacia las ruedas del eje para la tracción delantera o trasera. Este bloque permitió simular un comportamiento más realista de un vehículo que tracciona dos ruedas para movimientos longitudinales, es decir hacia adelante o hacia atrás. Se definió una relación de 4:1 entre el portador del diferencial (carrier) y el eje de salida (driveshaft), lo que se tradujo a una significativa reducción de velocidad y amplificación del par.

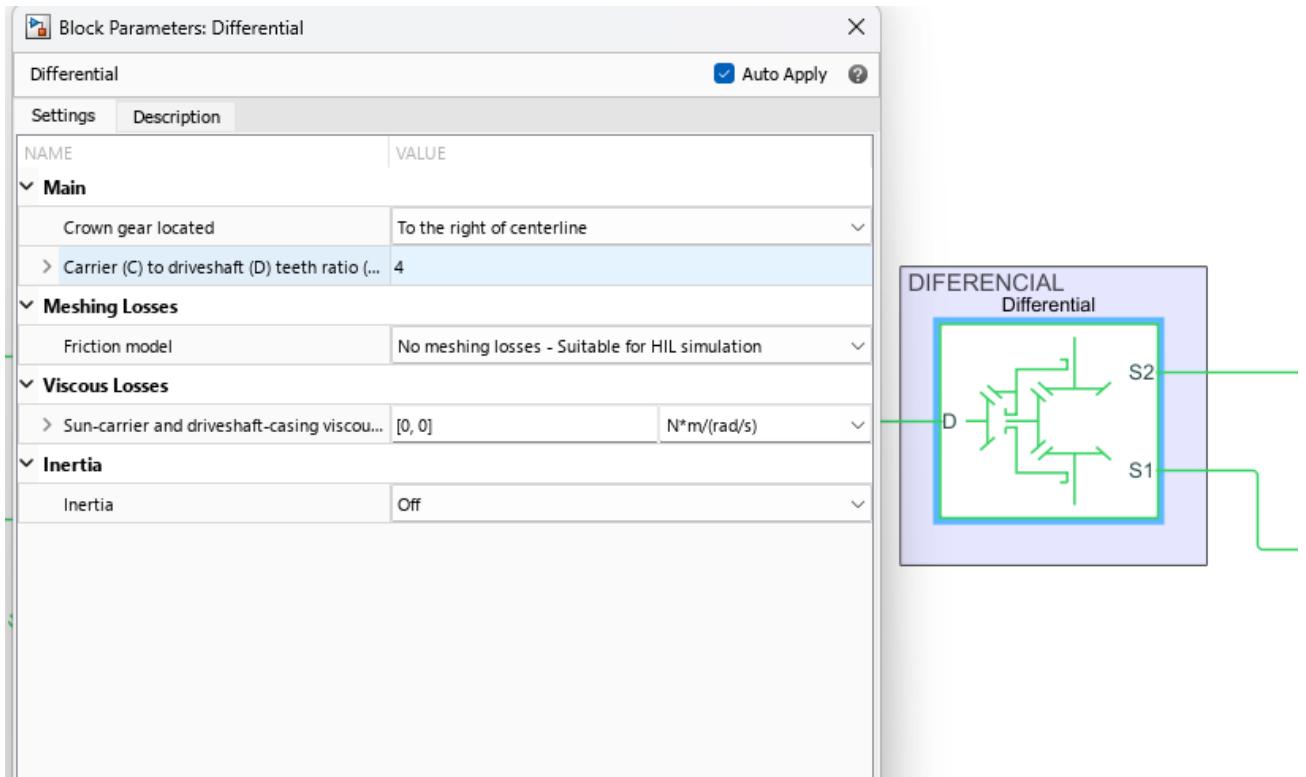


Figura 9. Parámetros del diferencial.

2.3.1.4. Neumáticos

Las ruedas fueron modeladas mediante el bloque “Tire”, este modelo permitió parametrizar el coeficiente de fricción, el deslizamiento y las fuerzas longitudinales que se desarrollaron durante la interacción neumático-superficie; esto es algo adicional que nos permitió realizar una simulación más realista. Se definió una salida de deslizamiento absoluto para facilitar la medición directa del comportamiento del neumático respecto al pavimento, por otra parte, se optó por un modelo de fricción cinética fija para reducir la complejidad numérica.

Para el coeficiente de fricción estática se colocó 0.90, ya que este valor representa un excelente agarre sobre asfalto seco, típico en condiciones ideales es decir sin agua, sin aceite etc. Como esta es una simulación este valor de coeficiente permite que la energía se transmita eficazmente desde el motor a las ruedas, sin pérdidas por deslizamiento. Para

el coeficiente de fricción cinética se colocó un valor de 0.70 dado que estamos simulando al vehículo en condiciones normales y controladas.

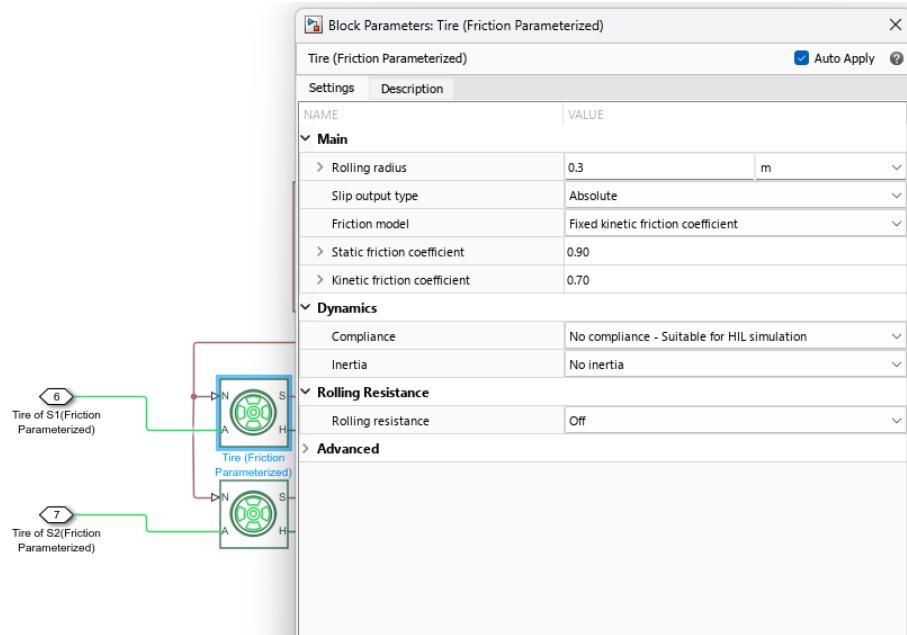


Figura 10. Parámetros de las llantas

2.3.1.5.Cuerpo del vehículo

El bloque “Vehicle Body” representó el chasis del vehículo como un sistema de masa con inercia lineal y angular. Fue el núcleo de la dinámica vehicular y se encarga de calcular la aceleración, velocidad, posición y orientación del vehículo en el plano longitudinal.

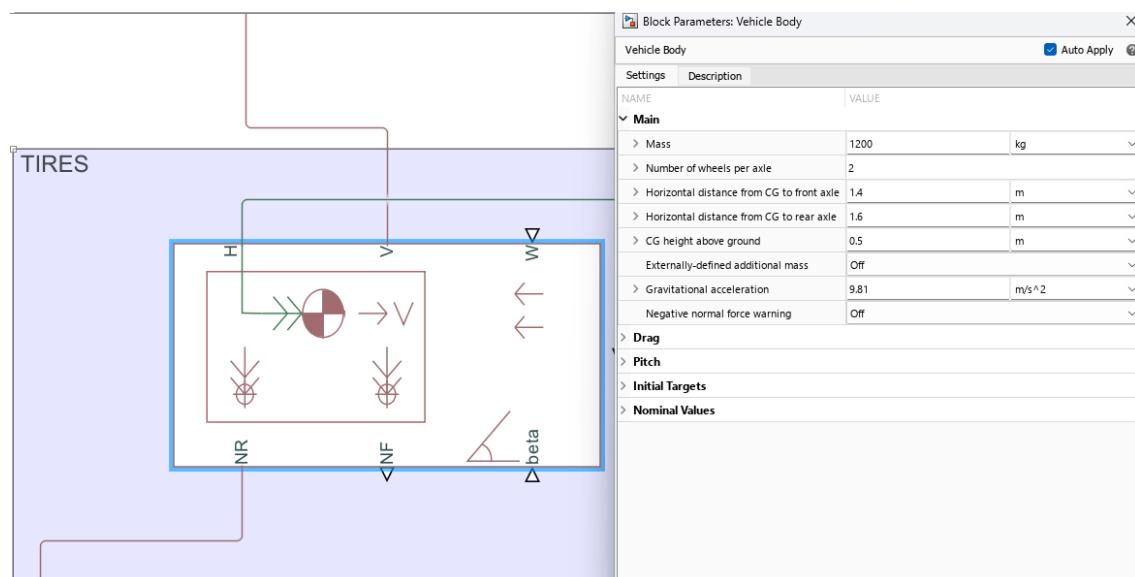


Figura 11. Parámetros del cuerpo del vehículo.

Este bloque permitió saber la respuesta del vehículo ante el torque que sale del motor. Se colocó una masa de 1200 kg para representar un VE compacto urbano, similar a un Nissan Leaf o Renault Zoe, los cuales presentan masas entre 1100 y 1500 kg. Las distancias desde el centro de gravedad hacia los ejes delantero y trasero definen la distribución de peso longitudinal, entonces se eligió una configuración levemente desplazada hacia el eje delantero (1.6 m en comparación a 1.4 m), la cual favorece el comportamiento de tracción trasera que en la industria se le conoce como Front Wheel drive (FWD). Este bloque se conectó directamente con los modelos de neumáticos y tren motriz, permitiendo una simulación realista de la velocidad, aceleración, transferencia de carga y respuesta del vehículo ante comandos de aceleración y frenado.

2.4. Modelado del convertidor bidireccional LM5170EVM-BIDIR

El convertidor bidireccional fue modelado en Simulink siguiendo la topología sugerida por el datasheet del LM5170-Q1 de Texas Instruments, con adaptación al sistema dual de baterías 48/12 V [2]. La estructura modular del modelo permite analizar el comportamiento del convertidor en ambos modos: buck ($48V \rightarrow 12V$) y boost ($12V \rightarrow 48V$). La etapa de potencia se compone de inductores de $4.7 \mu H$, capacitores de $100 - 470 \mu F$, y MOSFETs controlados por señales PWM generadas mediante controladores PID.

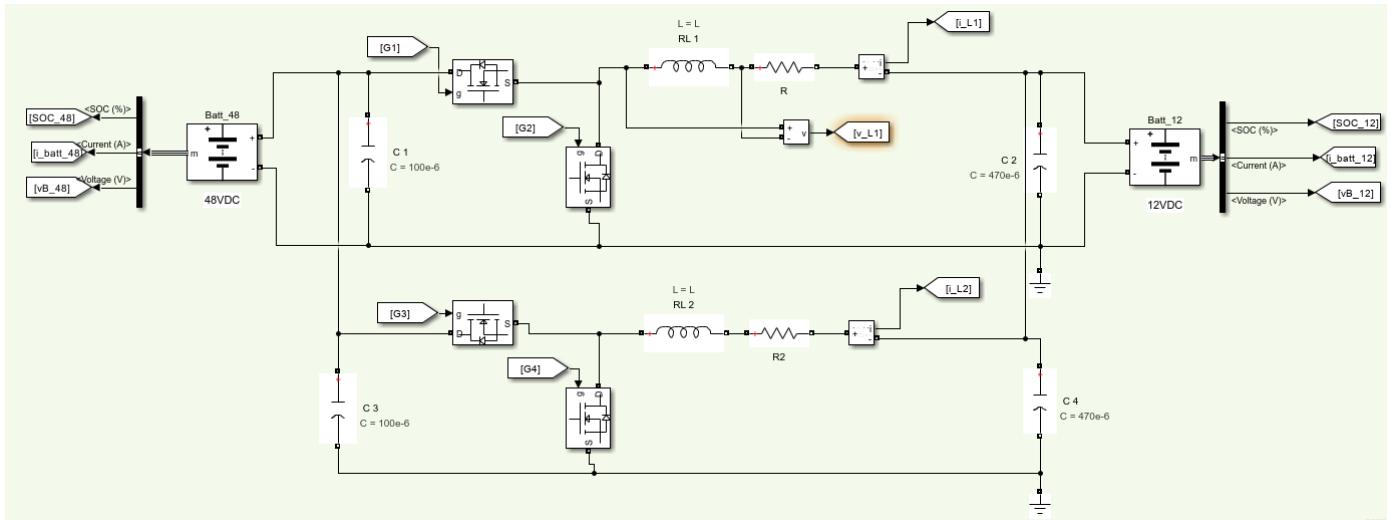


Figura 12. Vista general del convertidor LM5170 en simulink.

2.4.1. Módulo de control PWM

Esta sección genera las señales de modulación para los MOSFETs activos de ambas etapas (48V a 12V y 12V a 48V). El LM5170 usa modulación PWM sincronizada para ambos sentidos de potencia, por lo que se replicó esta lógica con bloques de generación de pulsos sincronizados en frecuencia. La frecuencia se fijó en 100 kHz, conforme al datasheet (p. 4, sección 'Switching Frequency') [2]. Esta frecuencia ofrece buena eficiencia y respuesta dinámica aceptable. Se usaron bloques de tipo Pulse Generator y lógica de control condicional para definir el modo de operación (buck o boost).

2.4.2. Sección de conmutación (MOSFETs)

Contiene los transistores de potencia que realizan la conmutación de energía. Cada etapa cuenta con dos MOSFETs: uno superior y otro inferior. Se modelaron como interruptores ideales con parámetros de conducción y retardo, ajustados según las curvas típicas del LM5170 y MOSFETs recomendados (CSD19536KTT) [2]. Se emplearon bloques MOSFET de Simscape Electrical, comandados por la señal PWM.

2.4.3. Inductancias de transferencia

Las inductancias conectan los nodos de commutación con los puntos de carga o batería, permitiendo el almacenamiento y transferencia de energía entre los niveles de tensión. Se utilizaron valores de $4.7 \mu\text{H}$ con una resistencia serie de 1Ω para cada etapa. Este valor fue elegido considerando la fórmula clásica $V = L \cdot di/dt$, buscando limitar el ripple de corriente. La resistencia representa pérdidas reales. El valor se estimó a partir del datasheet y simulaciones previas.

2.4.4. Capacitores de filtrado

Se usaron varios capacitores en los nodos de entrada y salida para estabilizar la tensión y reducir el ripple. $C1$ y $C3 = 100 \mu\text{F}$; $C2$ y $C4 = 470 \mu\text{F}$. Estos valores se seleccionaron con base en el diseño de referencia LM5170EVM-BIDIR, garantizando un bajo ripple y buena respuesta transitoria [2].

2.4.5. Sensado de corriente (Shunt resistors)

Resistencias de bajo valor se usaron para sensar la corriente de entrada y salida. El LM5170 utiliza detección tipo shunt para su lazo de control, por lo que se replicó este método para monitorear i_{batt} e i_{conv} . Se emplearon resistencias en serie con bloques de medición.

2.4.6. Banco de baterías

El modelo incluye dos fuentes de tensión: una para la batería de 48V y otra para la de 12V. Ambas se parametrizan con estado de carga (SOC), voltaje y corriente, permitiendo simular diferentes condiciones dinámicas. Se usaron fuentes controladas con bloques de Simscape, junto con sensores de monitoreo.

2.4.7. Lógica de modo de operación (converter mode)

Determina si el convertidor opera en modo boost o buck, según el flujo de corriente (i_{batt}) y la referencia ($i_{\text{B_ref48}}$). Se usó lógica condicional que activa los switches

adequados. Los componentes fueron: Switch, Compare to Constant y lógica combinacional.

2.5. Sistema de baterías

El modelo del sistema de baterías duales se implementó en Simulink utilizando bloques del entorno Simscape Electrical, representando dos subsistemas independientes: una batería de 48 V destinada a alimentar el sistema de tracción y una batería de 12 V encargada de los sistemas auxiliares del vehículo. Cada batería fue configurada con parámetros realistas como capacidad nominal, resistencia interna y estado de carga inicial (SOC), permitiendo simular condiciones dinámicas de operación.

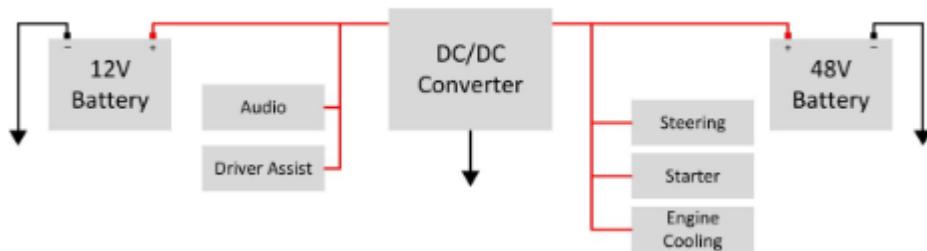


Figura 13. Esquemático en bloques del convertidor DC/DC.

Se incorporó una lógica de gestión del SOC que restringe o permite la transferencia de energía a través del convertidor LM5170 según los niveles de carga de ambas baterías, garantizando su protección y prolongando su vida útil. Este sistema permitió observar el comportamiento del flujo de energía en escenarios de carga, descarga y transferencia bidireccional, replicando con exactitud la arquitectura de un VE.

2.6. Diseño del sistema de control bidireccional

El sistema de control se diseñó en dos niveles: un control de corriente para el manejo inmediato de la transferencia de energía entre las baterías, y un control superior de gestión energética que optimiza la eficiencia global considerando el perfil de conducción y el estado de carga (SOC) de cada batería. El nivel inferior del sistema empleó un esquema

de control de corriente tipo lazo interno, encargado de regular la intensidad de corriente transferida en tiempo real entre ambas baterías, utilizando controladores PI con ajuste fino.

Este control se diseñó para trabajar tanto en modo buck (de 48 V a 12 V) como en modo boost (de 12 V a 48 V), comutando automáticamente mediante lógica condicional implementada con bloques y funciones lógicas. La detección del modo de operación se basó en el flujo de corriente entre las baterías y en la referencia de corriente definida por la carga activa [9]. El nivel superior se encargó de la gestión energética, considerando las condiciones dinámicas del vehículo. Este controlador recibió información proveniente del perfil de conducción (velocidad deseada), estado de carga (SOC) de las baterías, y demanda de torque del motor. En función de estas variables, se definieron estrategias para decidir cuándo activar la transferencia de potencia y en qué dirección, priorizando mantener el SOC en rangos seguros y aprovechar la recuperación energética en desaceleraciones.

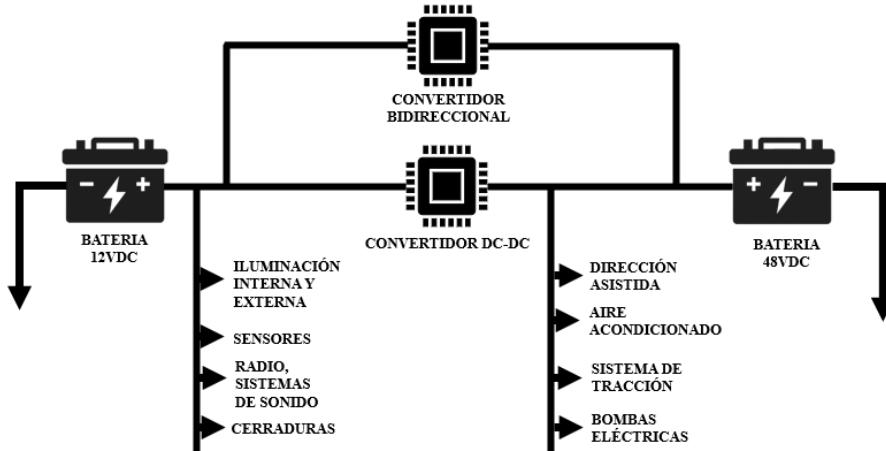


Figura 14. Esquema de diseño con la implementación del convertidor bidireccional entre las baterías.

2.7. Simplificación del convertidor LM5170-Q1-BIDIR

En la etapa de modelado se identificó una incompatibilidad entre las librerías de Simscape Electrical y los bloques mecánicos del sistema de tracción. Esto se debe a que en el modelado del convertidor bidireccional LM5170EVM-BIDIR, al estar implementado con electrónica de potencia, tales como moduladores PWM, drivers, MOSFETS.

Para superar este inconveniente se optó por simplificar el modelo del convertidor mediante el uso de fuentes de corriente y voltaje controladas, de modo que la transferencia de energía entre la batería de 48 V, la batería de 12 V y la carga auxiliar pueda representarse de manera equivalente sin necesidad de detallar elementos de electrónica de potencia.

De esta forma, aunque el modelo no replica el comportamiento en conmutación del LM5170, sí conserva la misma lógica de control bidireccional y del flujo entre las dos baterías, lo que permite evaluar con eficiencia el comportamiento del sistema y el impacto en la autonomía del vehículo eléctrico. Esta simplificación mantiene la idea central del proyecto y garantiza que los resultados obtenidos en la simulación sean representativos a tanto a nivel de eficiencia como a nivel funcional.

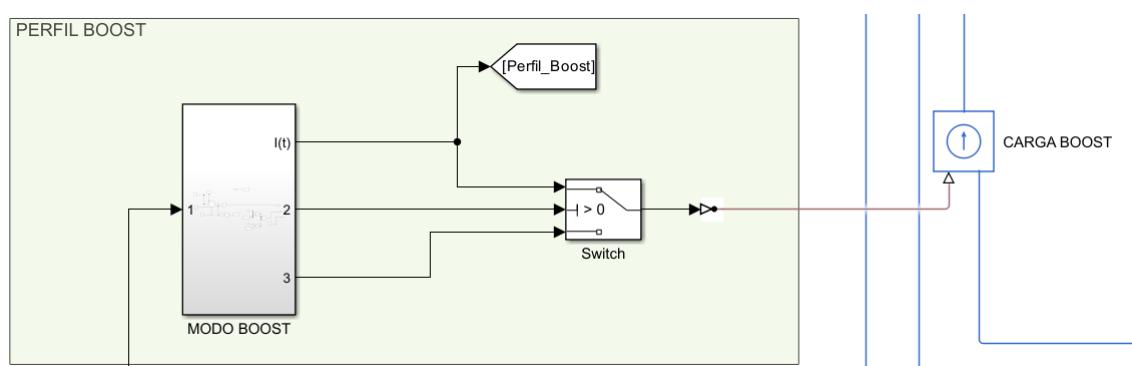


Figura 15. Modo Boost con fuente de corriente controlada.

La figura 16 se observa el modo Boost, compuesto de bloques Step que generan distintos escalones de potencia que simulan los momentos en los que se activa el envío de energía. Estas señales se suman y forman la potencia total, la cual al dividirse por el voltaje de 48 V se convierte en la corriente de referencia. La lógica temporal, implementada mediante comparadores y un bloque AND, determina la ventana de tiempo en la que se permite esta transferencia.

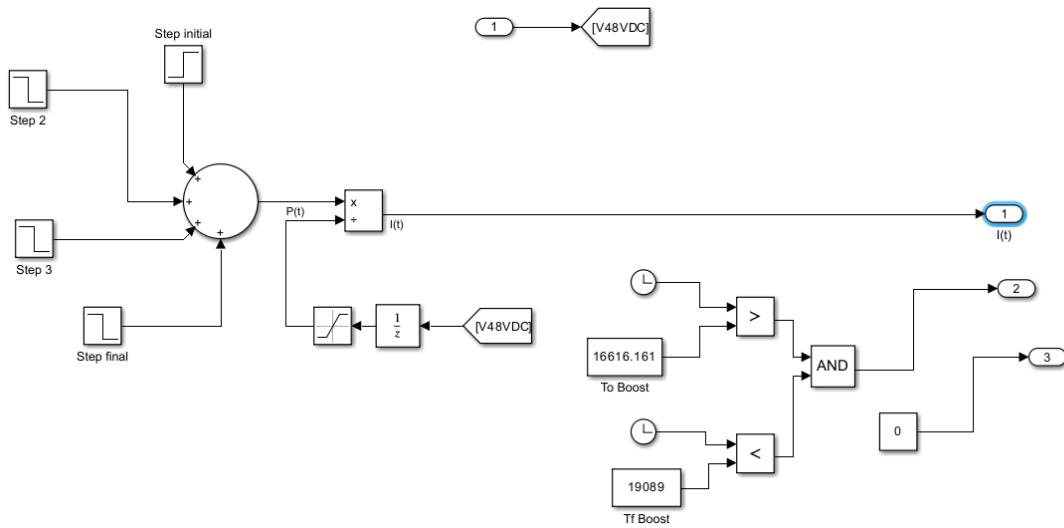


Figura 16. Modo BOOST.

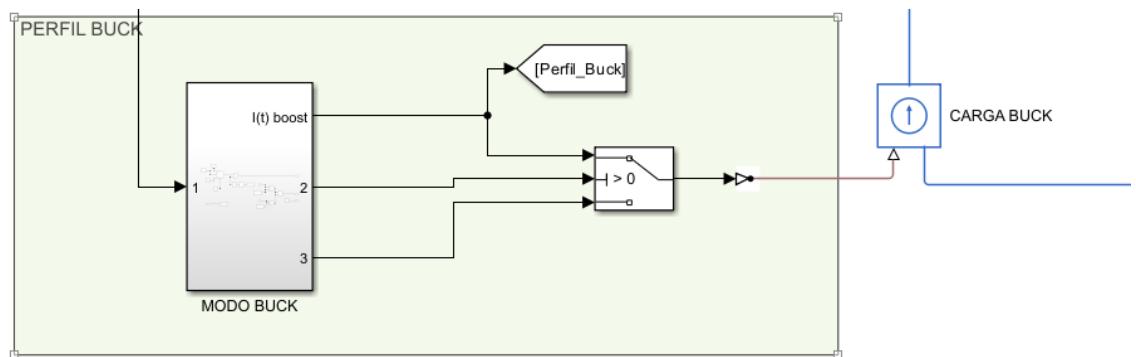


Figura 17. Modo Buck con fuente de corriente controlada.

La figura 18 muestra la composición del modo Buck, también se emplean varios bloques Step que suman diferentes niveles de potencia a lo largo del tiempo, formando un perfil escalonado de transferencia de energía. Esa potencia es dividida entre el voltaje de la batería de 48 V, define la corriente de referencia que representa el flujo hacia la batería de 12 V. Mediante comparadores y un bloque AND, se fija un intervalo de tiempo en el

que esta transferencia está permitida, asegurando que el modo BUCK solo se active en los periodos deseados.

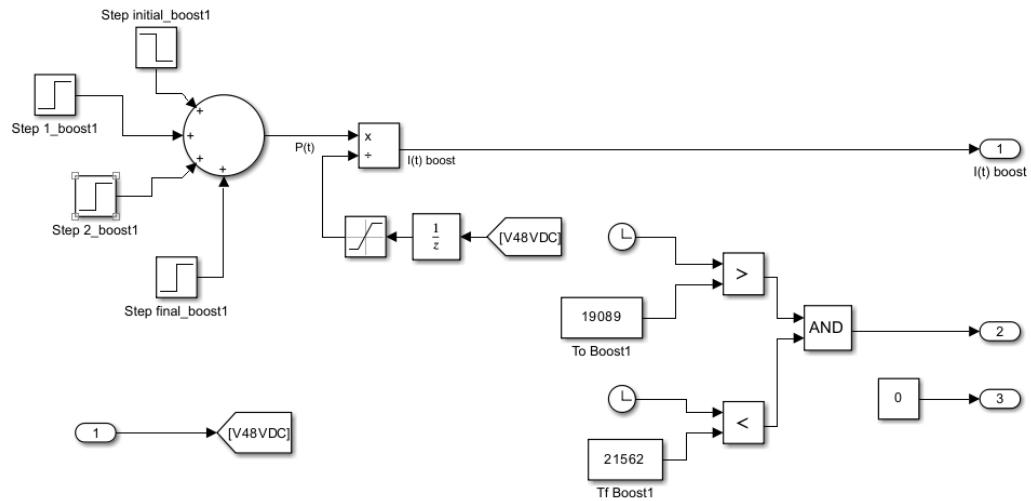


Figura 18. Modo BUCK.

2.8. Validación de la eficiencia energética mediante perfiles de conducción

Se implementaron perfiles de conducción representativos, basados en datos de ciclos de manejo estandarizados, que permitieron evaluar la respuesta dinámica del sistema de control bajo condiciones realistas. Es esencial probar los convertidores bajo distintos niveles de carga para evaluar su desempeño térmico, eficiencia y estabilidad de corriente [3]. Este enfoque fue adaptado al presente proyecto evaluando la operación tanto en modo buck como boost, con diversas condiciones de carga y descarga entre las baterías para observar la eficiencia. Con los valores de voltaje y corriente obtenidos en los puntos clave del sistema como las entradas de las baterías (12 V y 48 V) y las salidas del convertidor LM5170 se podrá validar la eficiencia energética mediante cálculos teóricos, por medio de las siguientes formulas.

$$Potencia \rightarrow P = V * I \quad (1)$$

$$Energia \rightarrow \int P(t) dt = \int V(t) * I(t) dt \quad (2)$$

$$\eta = \left(\frac{E_{motor}}{E_{bateria}} \right) * 100 \quad (3)$$

2.9. OPAL RT

Para la validación en tiempo real del sistema propuesto, se utilizará una plataforma OPAL-RT, la cual permite ejecutar modelos eléctricos complejos en hardware mediante simulación en tiempo real. Esta herramienta es fundamental para observar el comportamiento dinámico del convertidor bidireccional, evaluando su respuesta frente a variaciones de carga y condiciones de operación representativas de un vehículo eléctrico con baterías duales.

El modelo del convertidor será implementado dentro del entorno RT-LAB, integrando las señales de entrada y salida necesarias para cerrar el lazo de control con hardware externo. Esta configuración posibilita verificar la estabilidad del control bidireccional, analizar las transiciones entre los modos buck y boost y validar la eficiencia energética del sistema en condiciones dadas.

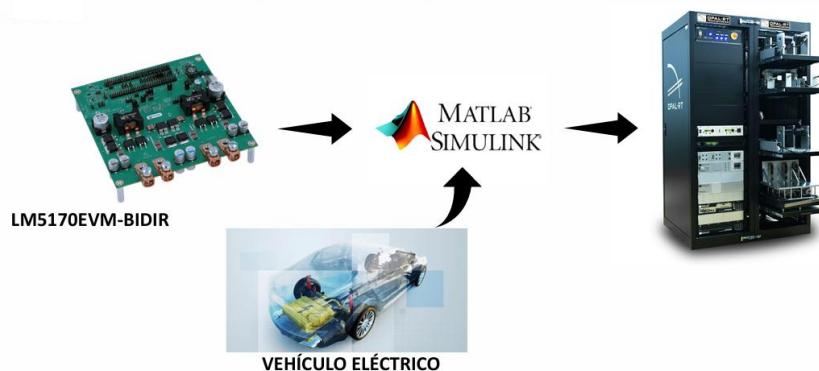


Figura 19. Diagrama de vinculación entre MATLAB/Simulink, LM5170EVM-BIDIR y OPAL-RT.

2.9.1. Modelamiento OPAL

El modelo se dividió en dos subsistemas principales: SC_HMI (interfaz hombre-máquina) y SM_PROCESS (proceso dinámico), los cuales se comunican mediante enlaces de entrada y salida definidos por bloques From/To.

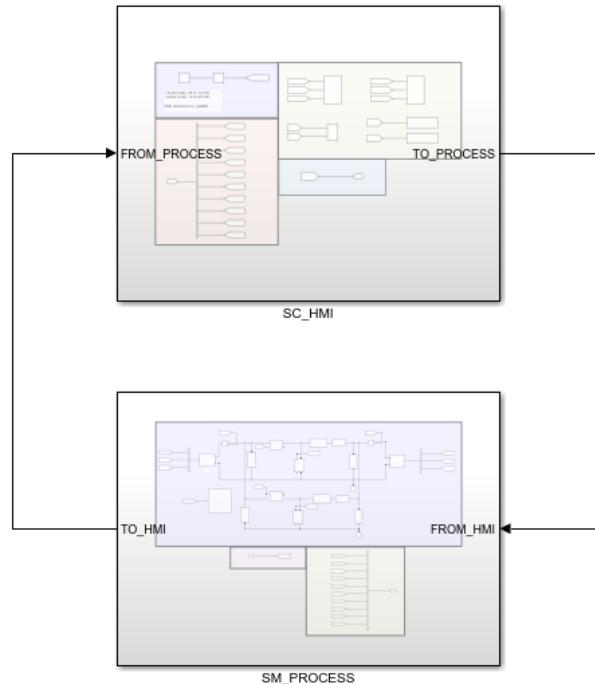


Figura 20- Modelamiento para simulación en OPAL-RT.

El bloque SC_HMI concentra los perfiles de manejo (ejemplo: FTP-75), la configuración de comandos de velocidad y torque, y la visualización de magnitudes críticas como el estado de carga de la batería (SOC), el voltaje de la batería de 48 V y la velocidad del vehículo. Este subsistema representa el entorno de interacción con el usuario y facilita la supervisión de la simulación mediante gráficas y displays en tiempo real.

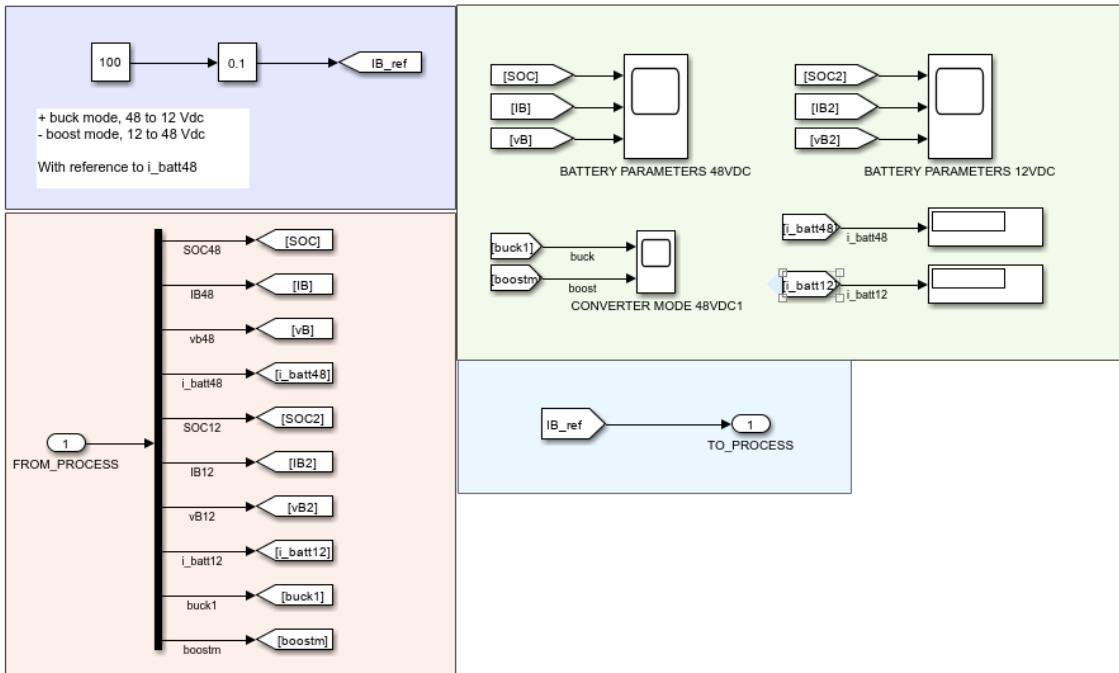


Figura 21. SC_HMI.

Por otro lado, el bloque SM_PROCESS integra el modelo físico del vehículo eléctrico, incluyendo el convertidor bidireccional, el motor PMSM, el cálculo de par a partir de las señales de aceleración y desaceleración, así como las mediciones asociadas a voltajes, corrientes y perfiles de operación (modo Boost y modo Buck). Esta separación entre HMI y proceso es esencial para la ejecución en OPAL, ya que distribuye la carga computacional y permite cumplir con los requisitos de paso de simulación discreto de 0,000001 s, garantizando precisión en los resultados.

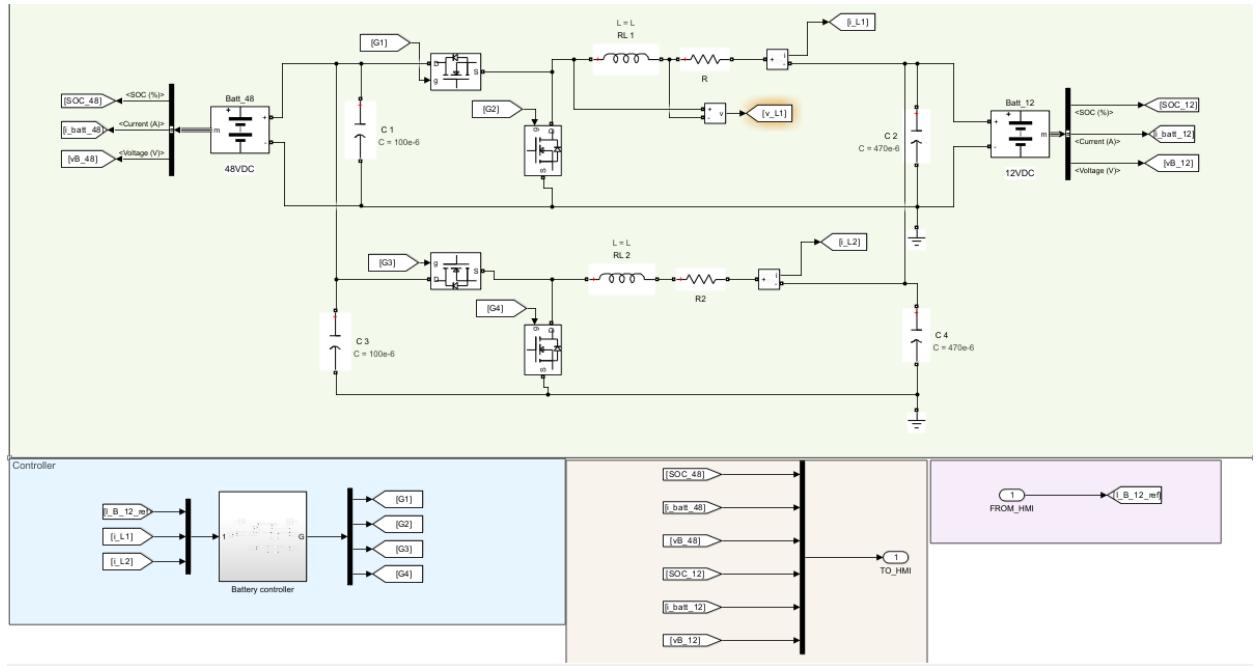


Figura 22. SM_PROCESS

El esquema general permite enviar desde el HMI hacia el proceso las referencias de conducción y, de manera inversa, recibir del proceso las variables de operación y desempeño energético. De esta forma, se asegura una interacción continua entre usuario y sistema, replicando de manera cercana el comportamiento real de un vehículo eléctrico con doble sistema de baterías.

Capítulo 3

3. Resultados y análisis

3.1. Resultados de simulación en Matlab/Simulink.

3.1.1. Convertidor bidireccional LM5170EVM-BIDIR

Tomando como referencia valores de corriente de 30 para la batería de 48VDC y de -8 para la batería de 12VDC, un valor positivo indica que la batería se está cargando y un valor negativo indica que la batería se está descargando.

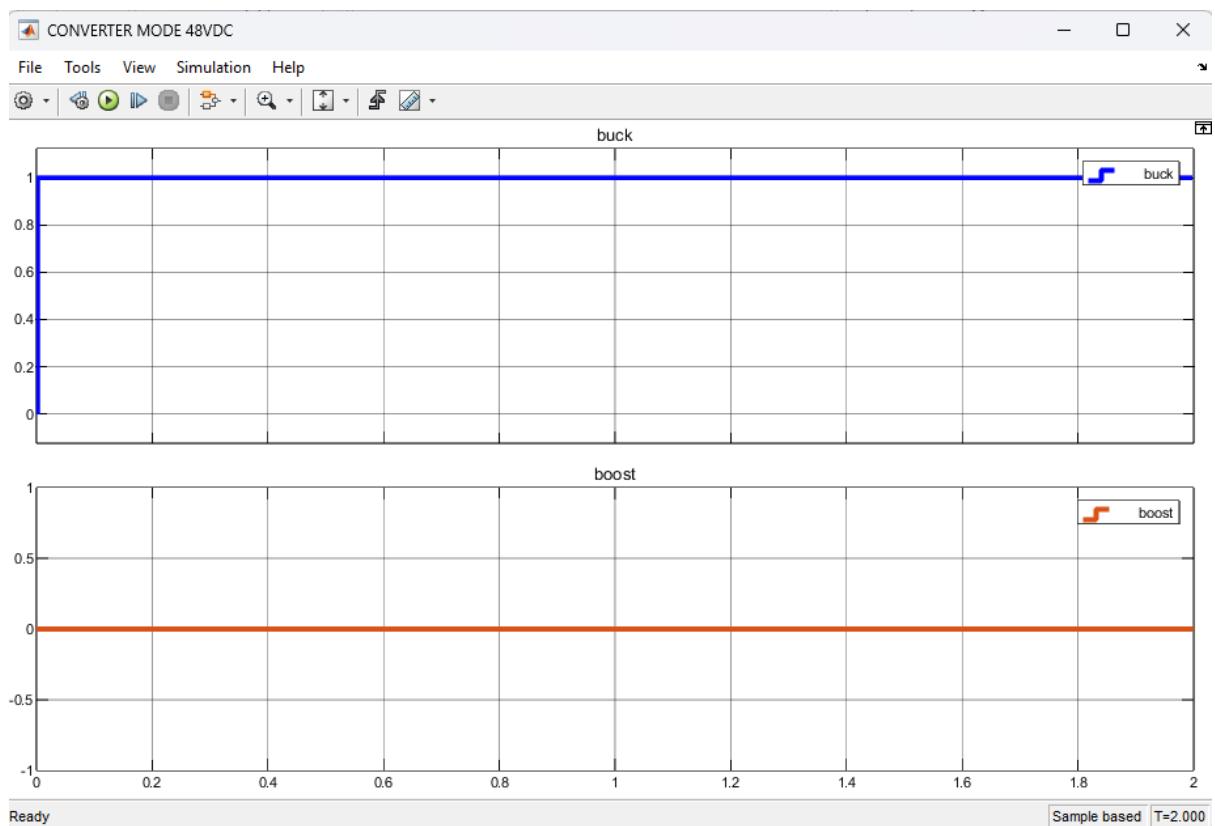


Figura 23. Modo buck de la batería de 48 VDC.

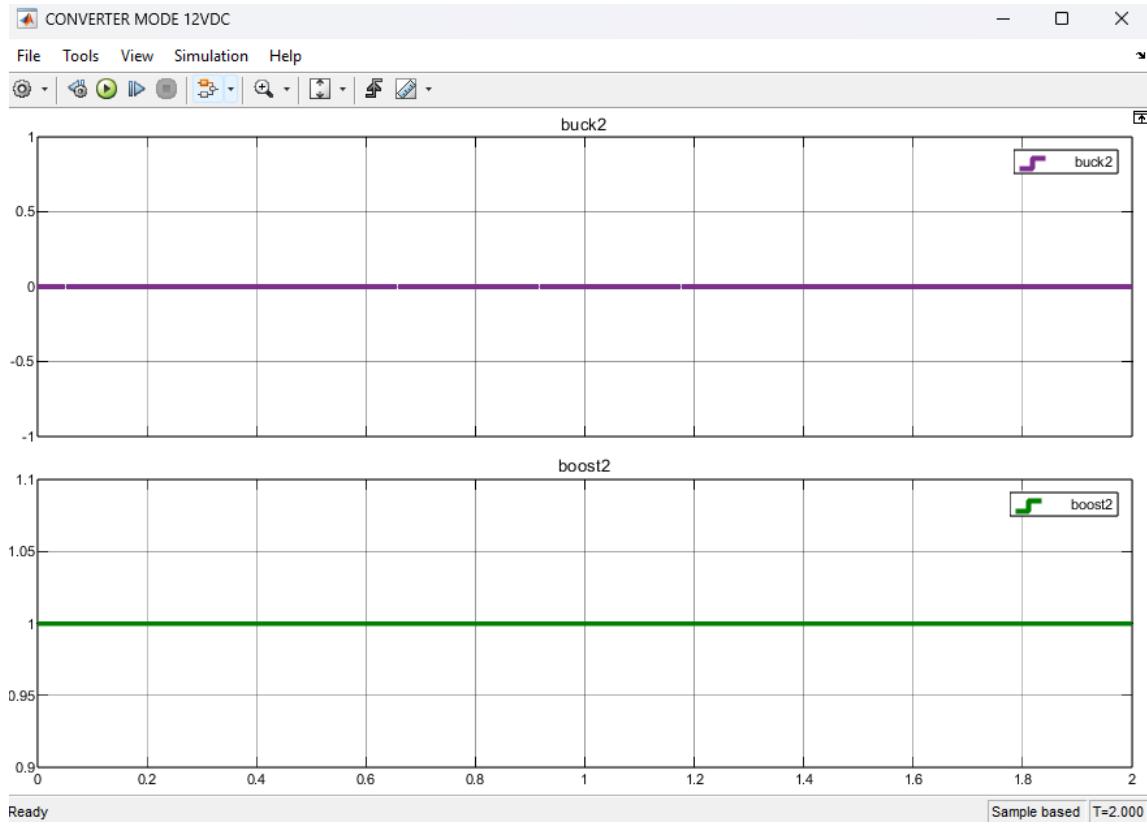


Figura 24. Modo de boost de la batería de 12 VDC.

El convertidor tiene dos modos de operación, el modo “boost” y “modo buck”, es decir modo elevador y reductor respectivamente. La figura 24 muestra como la batería de 12 VDC se está descargando, la batería de 48 VDC tiene que suplirle energía para cargarla por lo que el convertidor entra en modo buck, reduciendo la tensión para adecuarla a los niveles de carga de la batería de 12 VDC. Esto se confirma en la ilustración 15, donde la señal lógica de control está activa (valor 1), mientras que el modo Boost permanece inactivo. La batería de 12 VDC está actuando como receptora de energía, por lo que no está operando en modo buck ni boost, sino simplemente recibiendo carga en su voltaje nominal.

Los resultados de la figura 25 corresponden a la versión del modelo implementado con MOSFETs, lo cual representa la simulación más cercana al comportamiento real del convertidor. En esta figura se aprecia el inicio del estado de carga (SOC) de las baterías, junto con la evolución de los voltajes y corrientes de las baterías de 48 V y 12 VDC. En la gráfica del SOC, se observa que el porcentaje de carga de la batería de 48 V (curva azul) aumenta, mientras que el de la batería de 12 V (curva roja) disminuye. Este comportamiento se explica porque la corriente de referencia aplicada fue negativa, lo que provocó que el convertidor trabajara en modo Boost, transfiriendo energía desde la batería de 12 V hacia la batería de 48 V. Esta condición también se evidencia en la tercera gráfica, donde la corriente de la batería de 48 V invierte su polaridad, pasando de positiva a negativa y manteniéndose en ese estado durante un intervalo de tiempo, lo que confirma que esta batería dejó de entregar energía para comenzar a recibirla. De forma complementaria, el voltaje de la batería de 12 V pasó de valores negativos a positivos y luego se mantuvo estable, lo que está asociado al cambio de polaridad en el flujo de potencia. En términos prácticos, este escenario permitió identificar cómo la referencia de corriente controla la dirección de transferencia de energía: cuando es negativa, se invierte la polaridad del sistema y la batería de 12 V pasa a alimentar a la batería de 48 V, validando así la operación del convertidor en modo Boost.

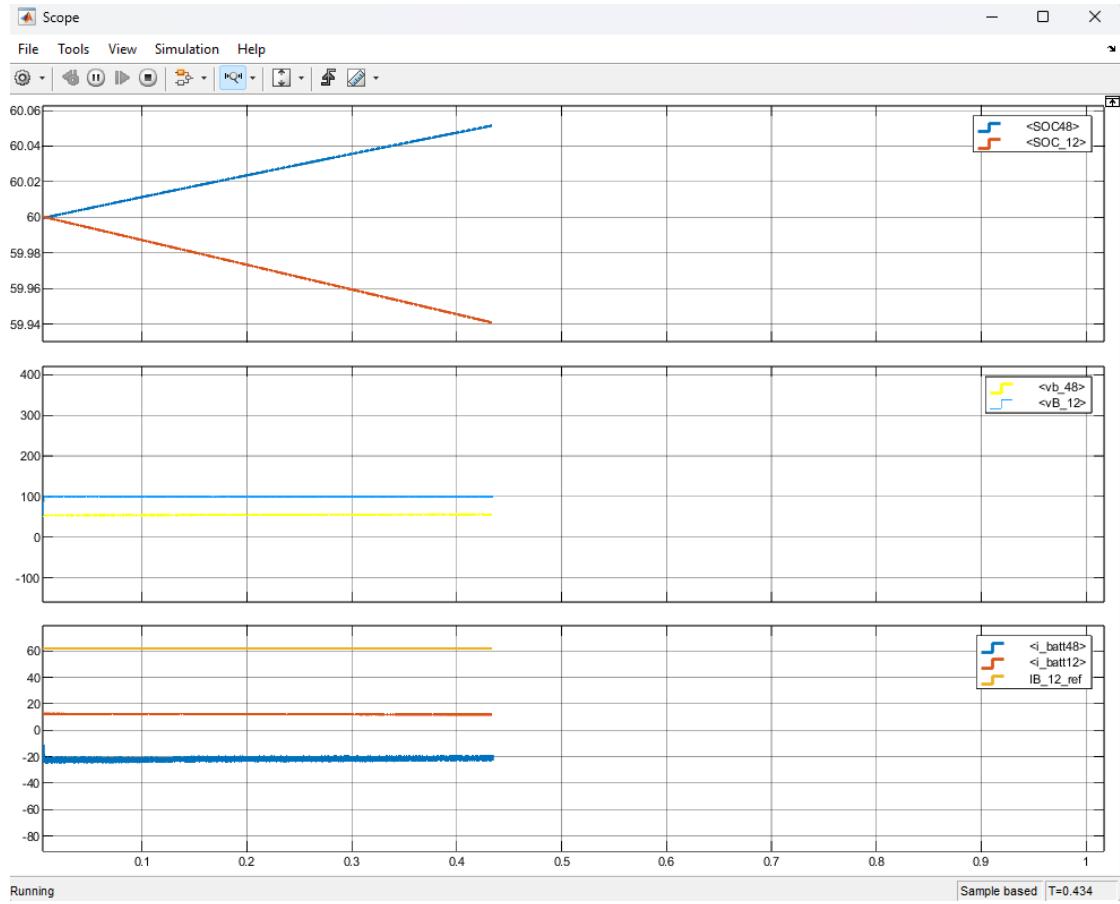


Figura 25. Osciloscopio con variables de interés.

3.1.2. Sistema de tracción

El perfil de manejo seleccionado para realizar la prueba del funcionamiento del sistema de tracción fue el FTP75 que tiene una duración de 2474 s; donde se creó un código en Matlab (Ver Anexos) para modificar dicho perfil y ajustarlo a los escenarios planteados que serán detallados en las siguientes ilustraciones.

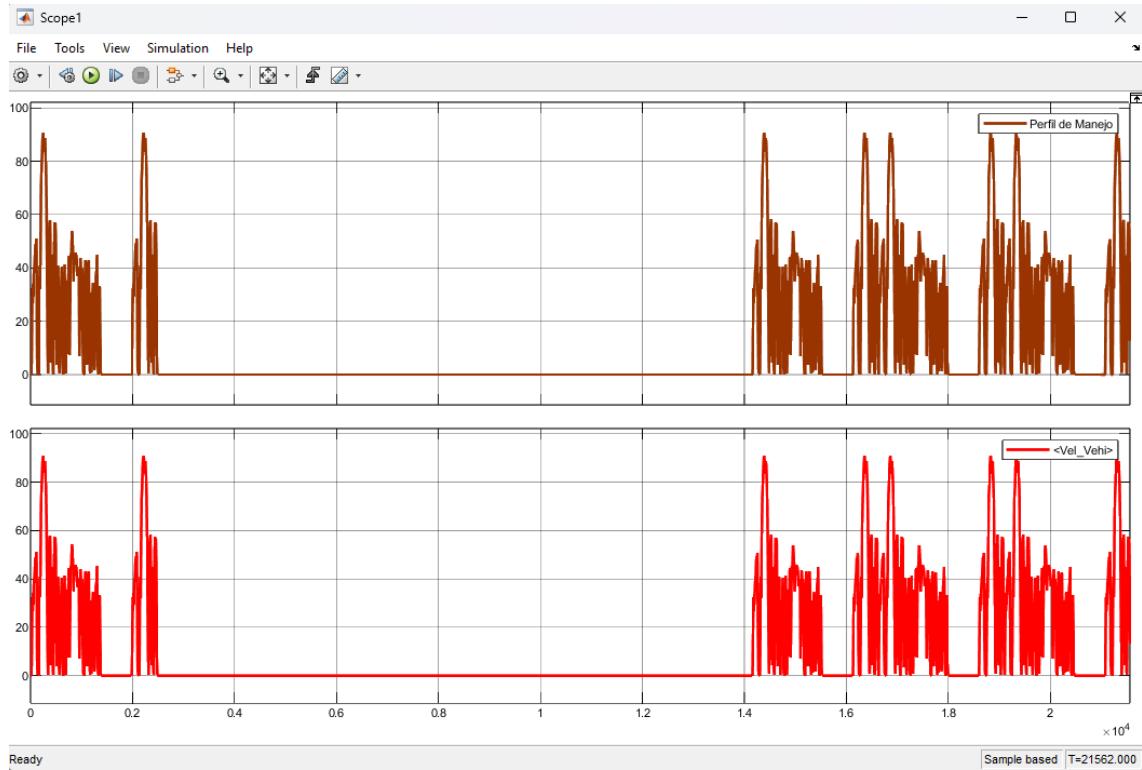


Figura 26. Perfil de manejo vs la velocidad del vehículo eléctrico.

En la gráfica 26, se presenta la comparación entre el perfil de conducción impuesto (Drive Cycle Source) que esta de color rojo y la velocidad real alcanzada por el vehículo eléctrico (Vel_Vehículo) que esta de color azul. Como puede observarse, existe una correspondencia muy precisa entre ambas curvas, lo cual indica que el sistema de control del motor compuesto por el controlador FOC, el inversor y el motor PMSM realiza un seguimiento eficaz del perfil de manejo. No se evidencian errores significativos ni rezagos apreciables entre la referencia y la respuesta, lo que sugiere que el sistema de tracción ha sido correctamente sintonizado y es capaz de replicar con fidelidad las condiciones dinámicas del ciclo FTP75.

Hemos creado el escenario (perfil de carga) para poder sensar el porcentaje de carga de la batería de 48 VDC. EL primer escenario corresponde al perfil de manejo que sería en términos eléctricos una batería en paralelo a la carga y su tiempo corresponde a

los primeros 2474 segundos, además, la batería empieza con un valor nominal del 60% y termina en 34.5%, es decir, el perfil de manejo hace que se descargue un 25.5%.

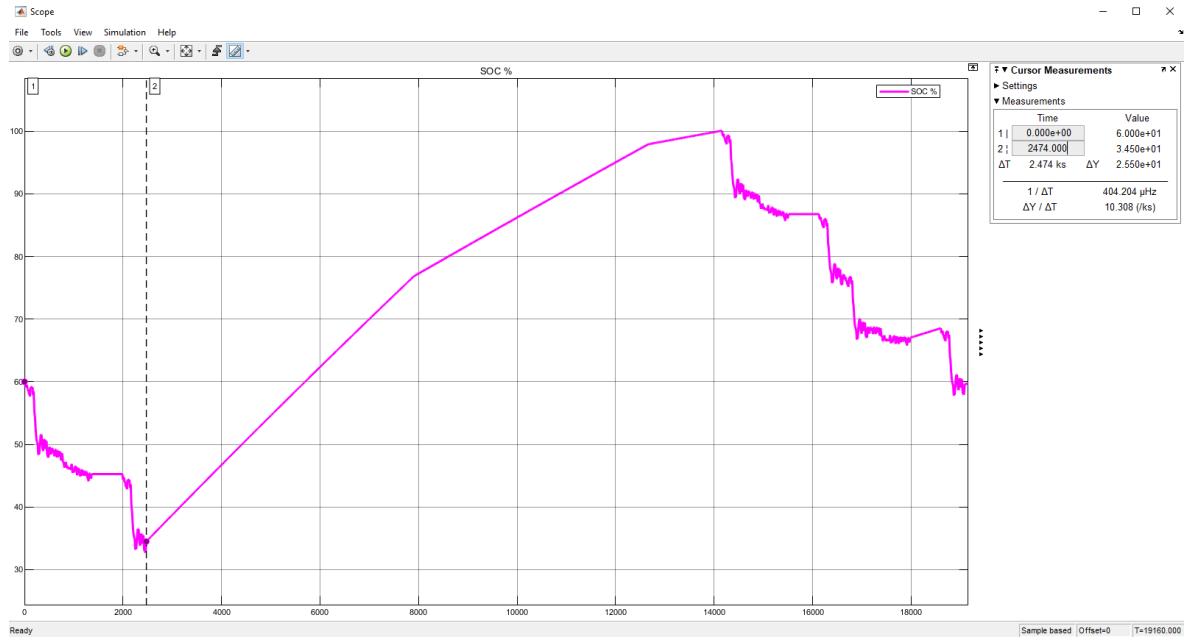


Figura 27. Tramo inicial del escenario donde el VE realiza su recorrido hasta la electrolinera.

Posteriormente, el usuario llega a una electrolinera donde se detiene para cargar el VE, siendo el tiempo inicial de carga en la electrolinera (To Electrolinera) de 2475 s hasta 14142.161 s. Cuando se revisó el SOC en este intervalo de tiempo coincidió con la escalonada de corriente que se le dio a la electrolinera (Ver ilustración 18) ya que se consideró un primer tramo inicial de mayor potencia y los siguientes dos tramos a menor potencia ya que así funcionan los cargadores reales. El SOC desde que llegó y se detuvo en la electrolinera fue de 34.5% hasta el 100% en un tiempo de 11668.161s que se traduce a 3.4 h.

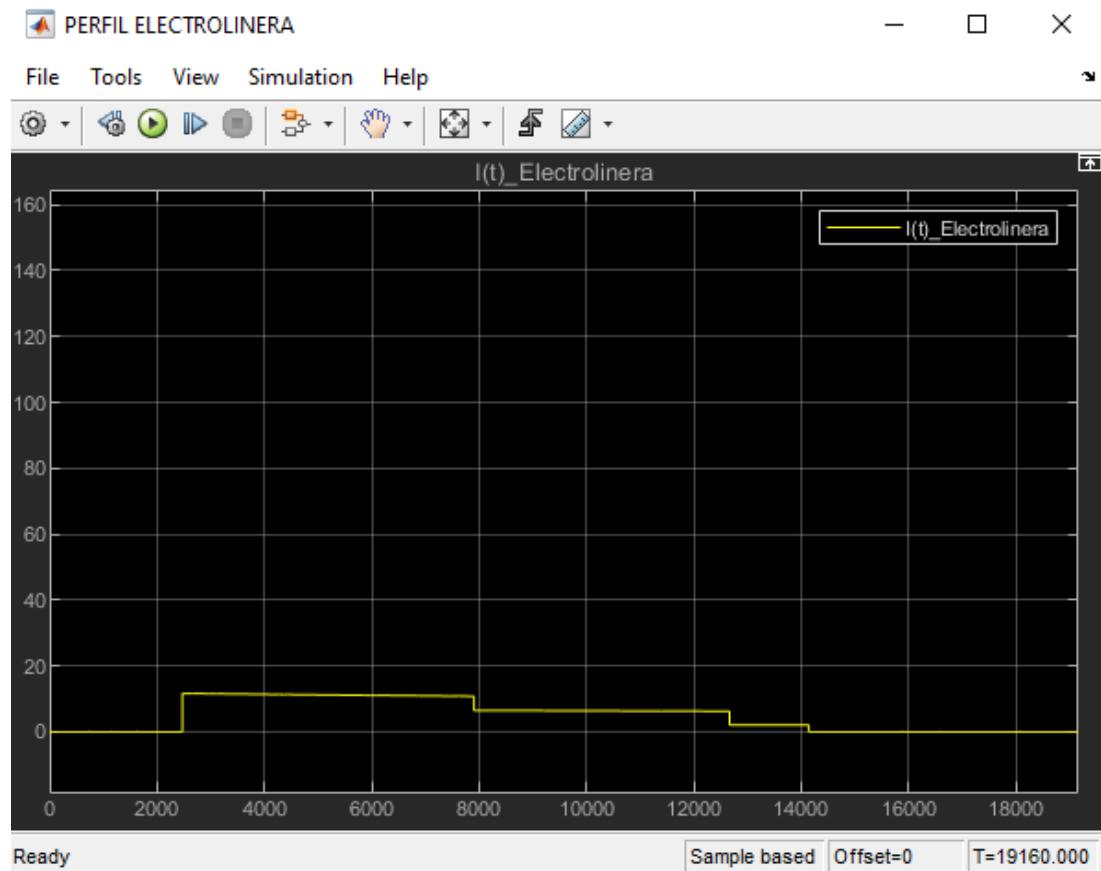


Figura 28. Perfil de carga de la electrolinera.

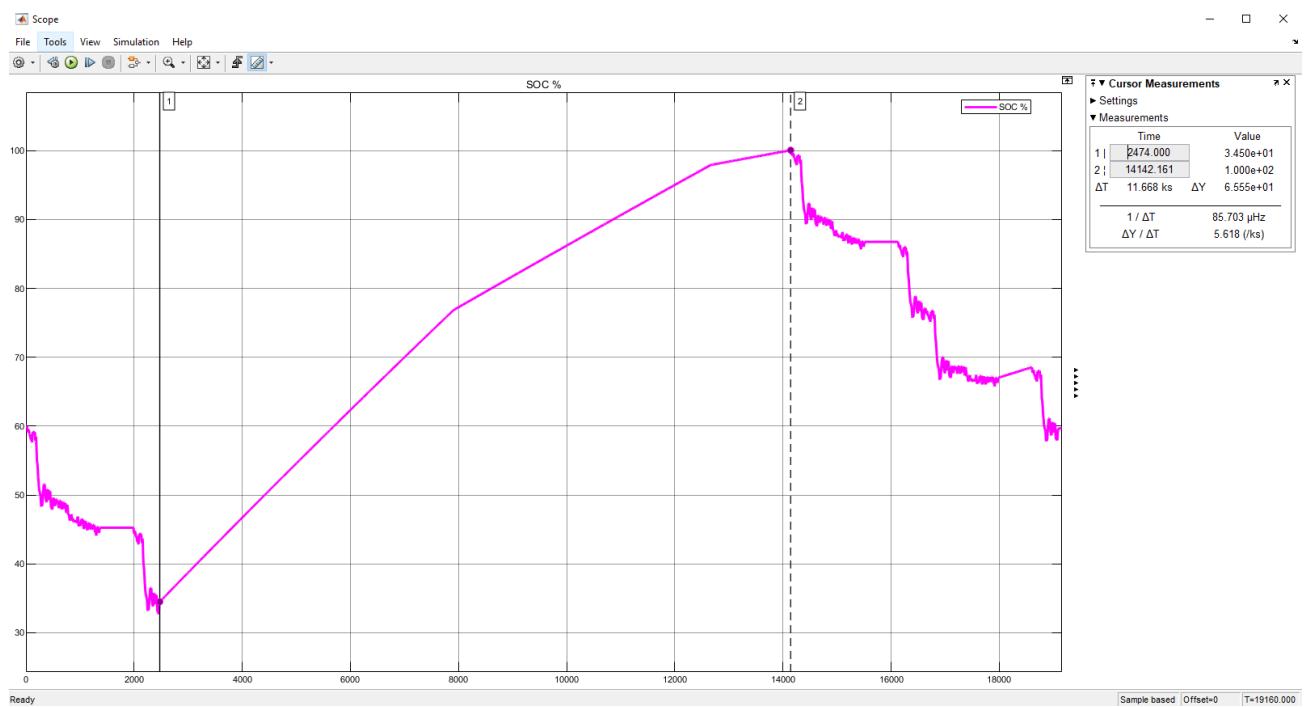


Figura 29. SOC de la batería en la electrolinera.

Luego, el carro deja la electrolinera y empieza a andar por lo que nuevamente ingresa la carga por 2474 s, lo que significa que se empieza a descargar la batería siendo el valor inicial de 100% hasta un 77.07%, tal como se puede apreciar en la ilustración 20. Así que básicamente el circuito equivalente corresponde a la batería siendo consumida por la carga, es decir, el perfil de manejo del VE.

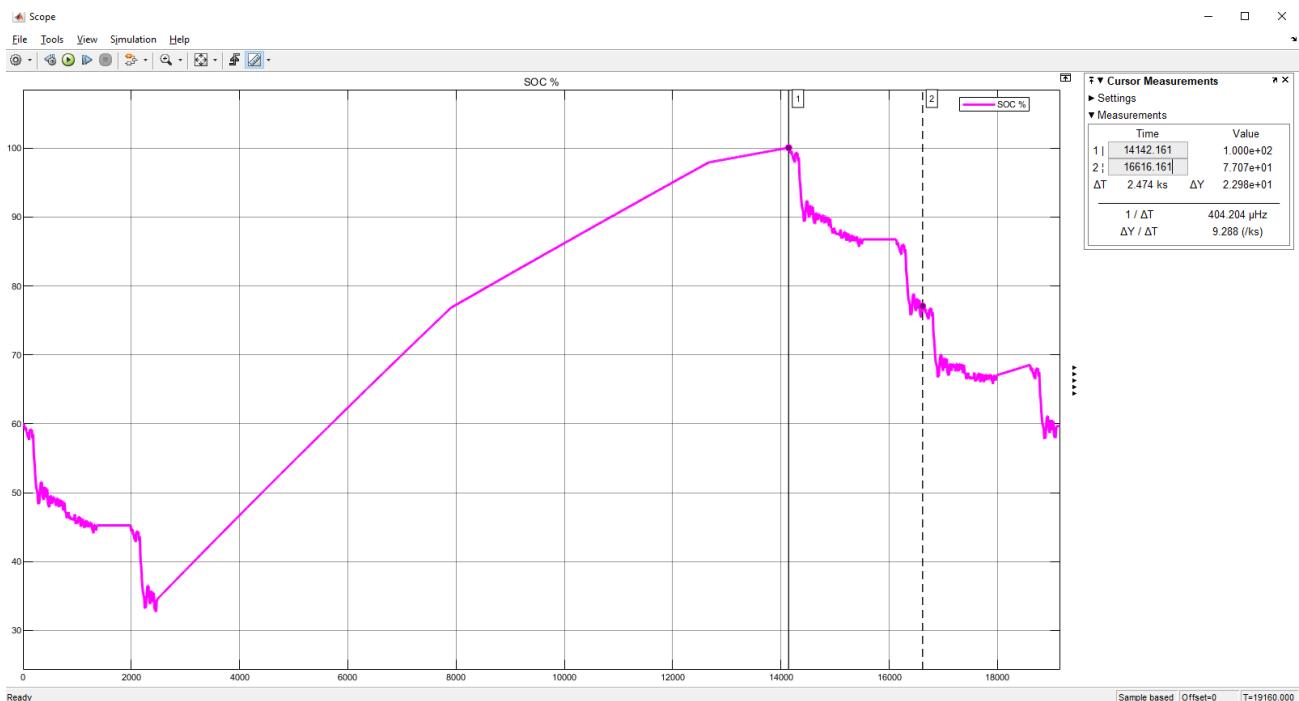


Figura 30. SOC inmediatamente que el VE deja la electrolinera.

A partir de este momento, entra el modo Boost que consiste en cargar la batería principal (48 VDC) desde la batería de sistemas auxiliares (12VDC) mientras el VE está andando, es decir, su circuito equivalente sería la fuente controlada de corriente en paralelo al perfil de manejo y a la batería de 48 VDC. Revisando el SOC donde el tiempo inicial del modo boost está en los 16616.161 s hasta donde termina la conducción que son 19090 s nos indica que pasó desde 77.07% hasta un 59.66% respectivamente. Además, se pudo verificar el perfil de carga del modo boost.

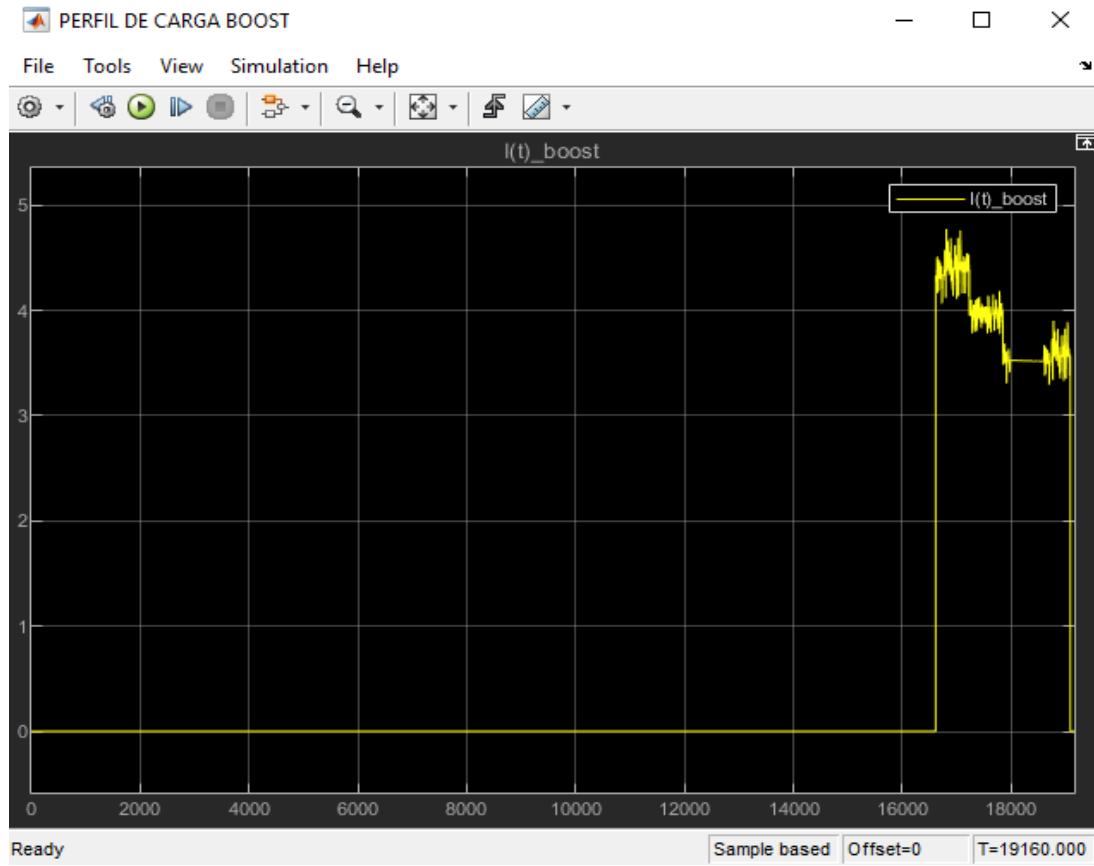


Figura 31. Perfil de carga boost de la batería de 12 a la de 48 VDC.

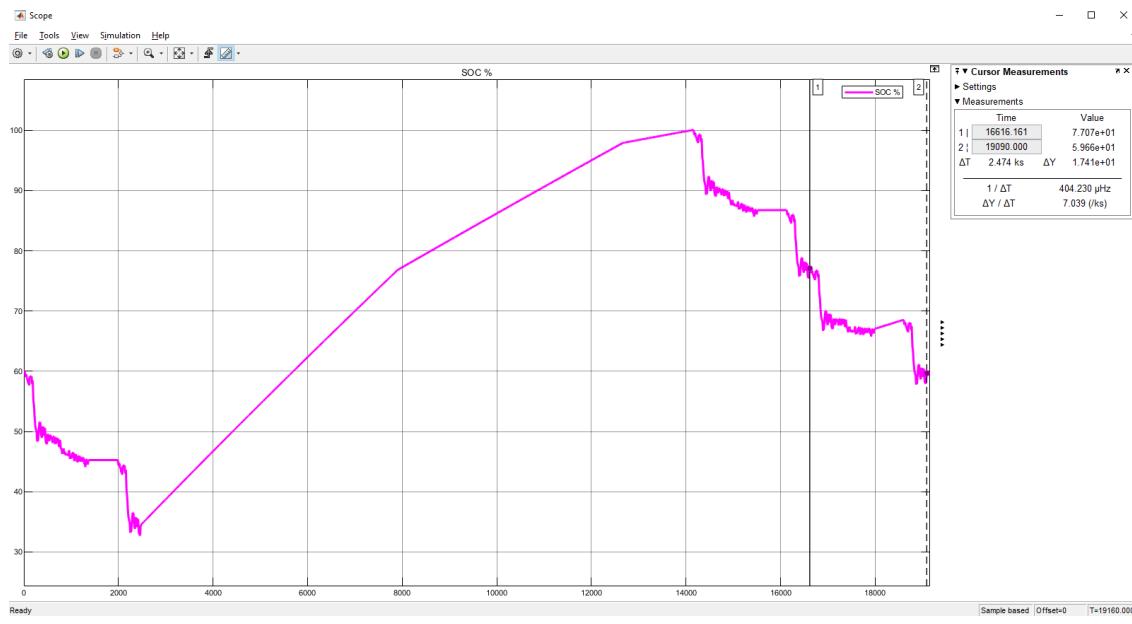


Figura 32. SOC mientras el VE está andando y la batería de 12 VDC envía energía a la de 48 VDC.

En la figura 33 se evidencia cómo la velocidad del vehículo influye directamente en el estado de carga (SOC) de la batería dentro del sistema. Se observa que, durante los períodos de aceleración sostenida, el SOC disminuye de manera progresiva, reflejando el consumo de energía necesario para mantener o incrementar la velocidad del vehículo, esta caída es proporcional al esfuerzo requerido por el motor para vencer la inercia. Por otro lado, cuando el vehículo reduce la velocidad o se activa el freno regenerativo, se aprecia un aumento temporal en el SOC, resultado de la conversión de la energía cinética en energía eléctrica que es devuelta a la batería. Este comportamiento dinámico confirma que el freno regenerativo no solo contribuye a una desaceleración controlada, sino que también optimiza la eficiencia energética del vehículo al recuperar energía que de otro modo se perdería en forma de calor, incrementando la autonomía y reduciendo el desgaste del sistema de frenos convencionales. Además, la gráfica permite identificar cómo los cambios frecuentes de velocidad, como los que ocurren en entornos urbanos, generan ciclos repetidos de descarga y recarga, lo que afecta a la eficiencia y la vida útil de las baterías.

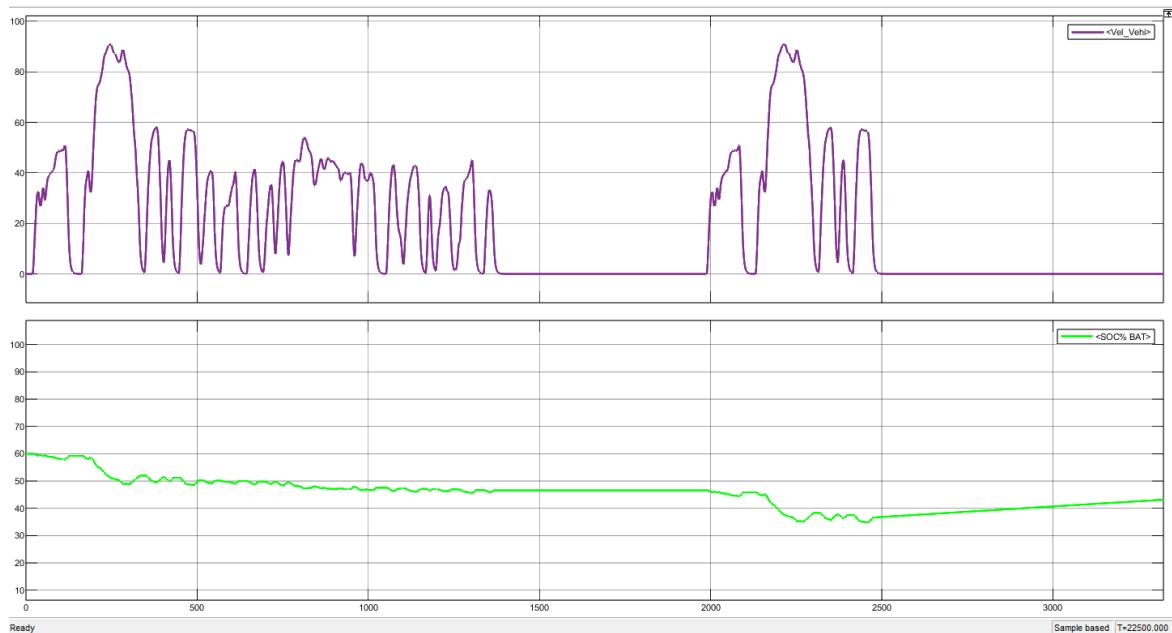


Figura 33. Relación entre la velocidad del vehículo y el estado de carga de la batería.

La figura 34 relaciona el voltaje de la batería con su estado de carga muestra un comportamiento característico de las baterías de iones de litio, donde el voltaje disminuye gradualmente a medida que el SOC disminuye. Este descenso es un reflejo directo de la reducción de energía disponible dentro de la batería y de la caída de potencial asociada al flujo de corriente a través de la resistencia interna de las celdas. Se observan además pequeñas oscilaciones en el voltaje, que pueden atribuirse a la interacción del sistema de gestión de batería, que regula de manera constante las condiciones de operación para proteger las celdas y maximizar su vida útil. Durante momentos de alta demanda, como aceleraciones intensas, el voltaje tiende a descender de manera más pronunciada, mientras que durante periodos de baja carga o de freno regenerativo, se observan pequeñas recuperaciones de voltaje. Este comportamiento no solo refleja la capacidad de la batería para entregar energía de forma segura y eficiente, sino que también evidencia la importancia de mantener el SOC dentro de rangos operativos óptimos para evitar caídas de voltaje críticas que podrían afectar el rendimiento del vehículo y la eficiencia global del sistema eléctrico.

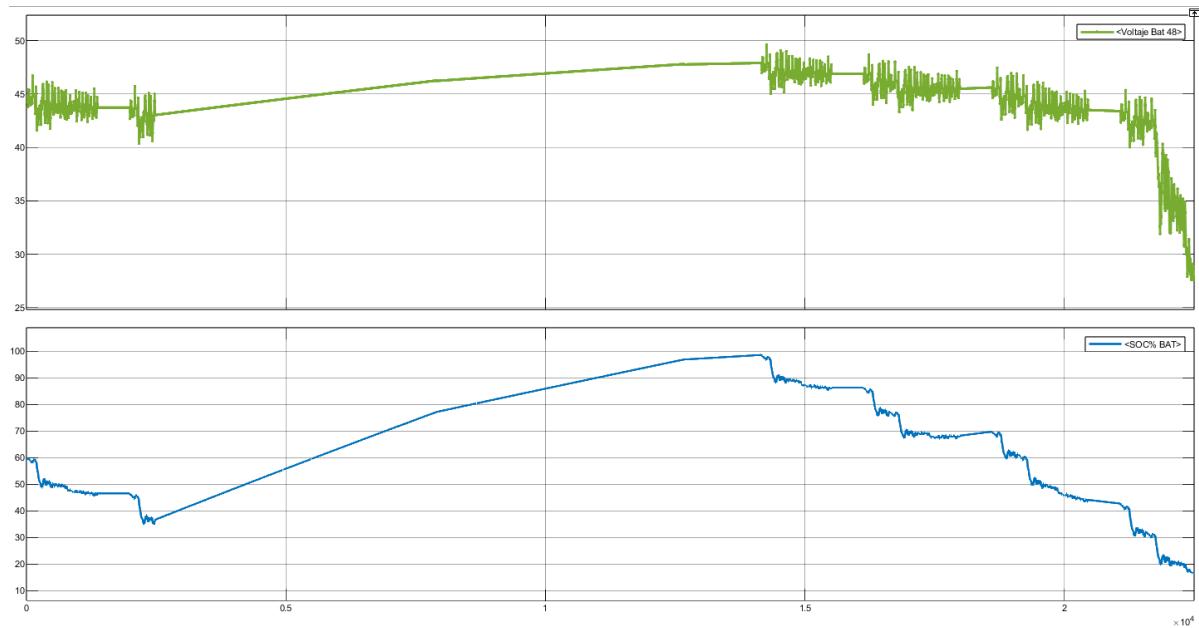


Figura 34. Relación entre el voltaje y el estado de carga de la batería.

3.2. Resultados en OPAL

La figura 35 muestra una prueba de la simulación en OPAL RT del modelo del convertidor simplificado, donde se evidencia la interfaz HMI. Por medio de esta interfaz se podrá manipular la corriente $I_B_{12_ref}$ para observar como por medio de las variaciones de corriente el convertidor entra en modo Buck y Boost. Si la corriente de referencia es colocada entre 0 y 1 el convertidor entra en modo Buck, pero si la corriente de referencia es colocada entre 0 y -1 el convertidor entra en modo Boost, tal como se muestra la etiqueta blanca en la parte superior izquierda.

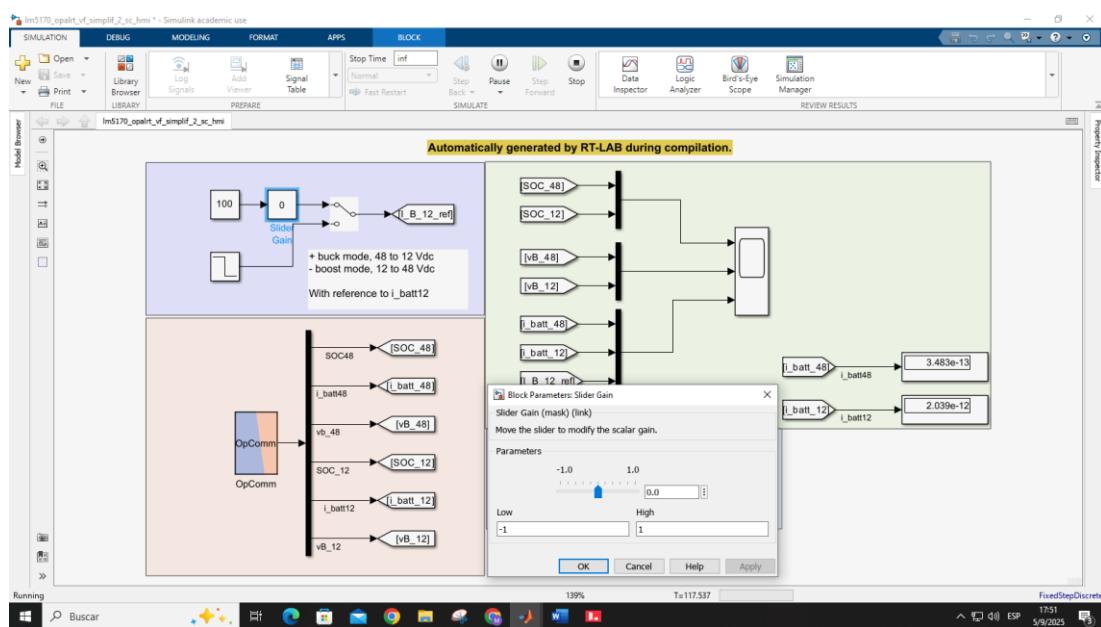


Figura 35. Simulación en OPAL RT.

La figura 36 muestra el comportamiento del voltaje, el estado de carga (SOC) y de las corrientes de las baterías cuando la corriente de referencia se fija aproximadamente en 60 amperios. Se observa que el convertidor entra en modo Buck, lo que implica que la batería de 48 V comienza a transferir potencia hacia la batería de 12 V. Como consecuencia, el voltaje de la batería de 48 V presenta una disminución gradual, mientras que el voltaje de la batería de 12 V experimenta un ligero incremento. Este comportamiento se refleja también en los SOC de ambas baterías: el SOC de la batería de 48 V inicia una tendencia

descendente debido a la entrega de energía, mientras que el SOC de la batería de 12 V aumenta levemente al recibir dicha energía. Aunque las variaciones en el SOC no son de gran magnitud en el intervalo observado, la tendencia confirma el correcto funcionamiento del convertidor en modo Buck.

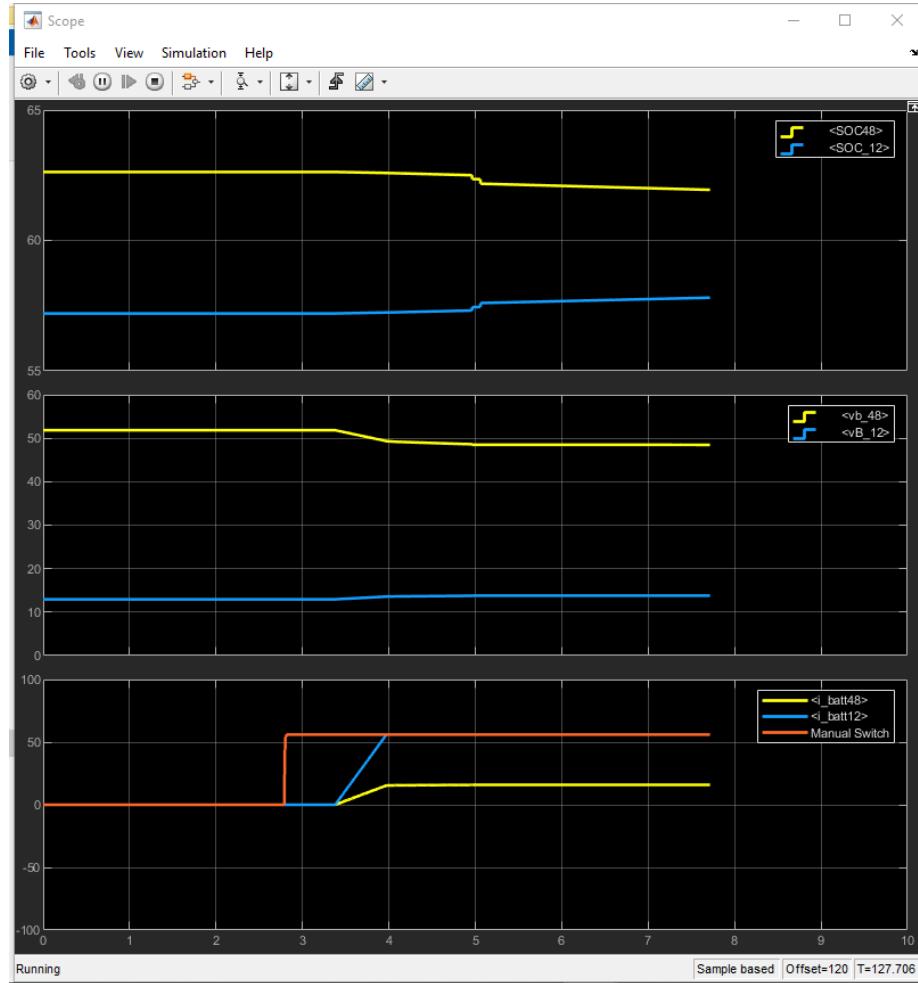


Figura 36. Comportamiento del voltaje, SOC y corriente ante una variación positiva de la corriente referencial.

En la figura 37 se observa que, al incrementarse de manera abrupta la corriente de referencia a 100 amperios, los efectos del modo Buck se vuelven más notorios. El estado de carga (SOC) de la batería de 48 V muestra una disminución progresiva, lo que confirma que esta batería está entregando potencia hacia el sistema. En contraste, el SOC de la batería de 12 V presenta una tendencia ascendente, indicando que comienza a

cargarse gracias a la energía recibida desde la batería de mayor voltaje a través del convertidor. En cuanto a los voltajes, se aprecia que el de la batería de 48 V disminuye ligeramente con el paso del tiempo como consecuencia de la transferencia de energía, mientras que el de la batería de 12 V se mantiene prácticamente constante alrededor de su nivel nominal de carga. Esto se debe a que la batería de 12 V no puede superar su voltaje máximo de carga, cercano a los 14 V, debido a las características químicas propias de las celdas. Este comportamiento valida la correcta operación del convertidor en modo Buck y evidencia cómo la batería de 48 V actúa como fuente principal de energía mientras la de 12 V se carga de forma controlada.

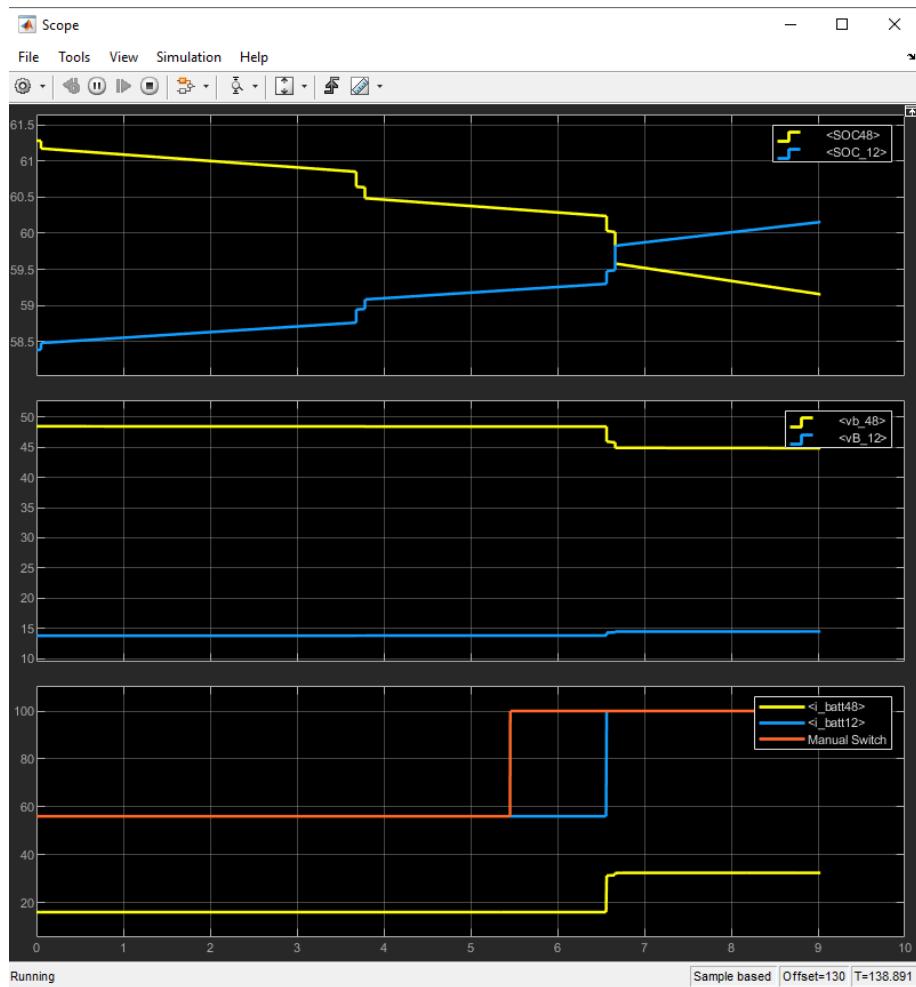


Figura 37. Comportamiento del voltaje, SOC y corriente ante una variación positiva de la corriente referencial.

En la figura 38 se aprecia el comportamiento del sistema cuando la corriente de referencia toma un valor negativo cercano a -30 A , lo que provoca que el convertidor opere en modo Boost. En este escenario, la batería de 12 V comienza a entregar potencia hacia el bus de mayor voltaje, mientras que la batería de 48 V actúa como receptora de energía. Como consecuencia, el estado de carga (SOC) de la batería de 48 V presenta una tendencia ascendente, reflejando que se encuentra en proceso de carga, mientras que el SOC de la batería de 12 V disminuye gradualmente al suministrar energía. Este mismo comportamiento se observa en los voltajes: el voltaje de la batería de 48 V aumenta progresivamente hasta aproximarse a su nivel óptimo de carga, mientras que el voltaje de la batería de 12 V experimenta una reducción debido a la descarga. En conjunto, los resultados validan la correcta operación del convertidor en modo Boost y demuestran el flujo bidireccional de potencia, confirmando que la batería de menor voltaje puede sostener temporalmente la recarga de la batería de mayor voltaje bajo condiciones de control adecuadas.

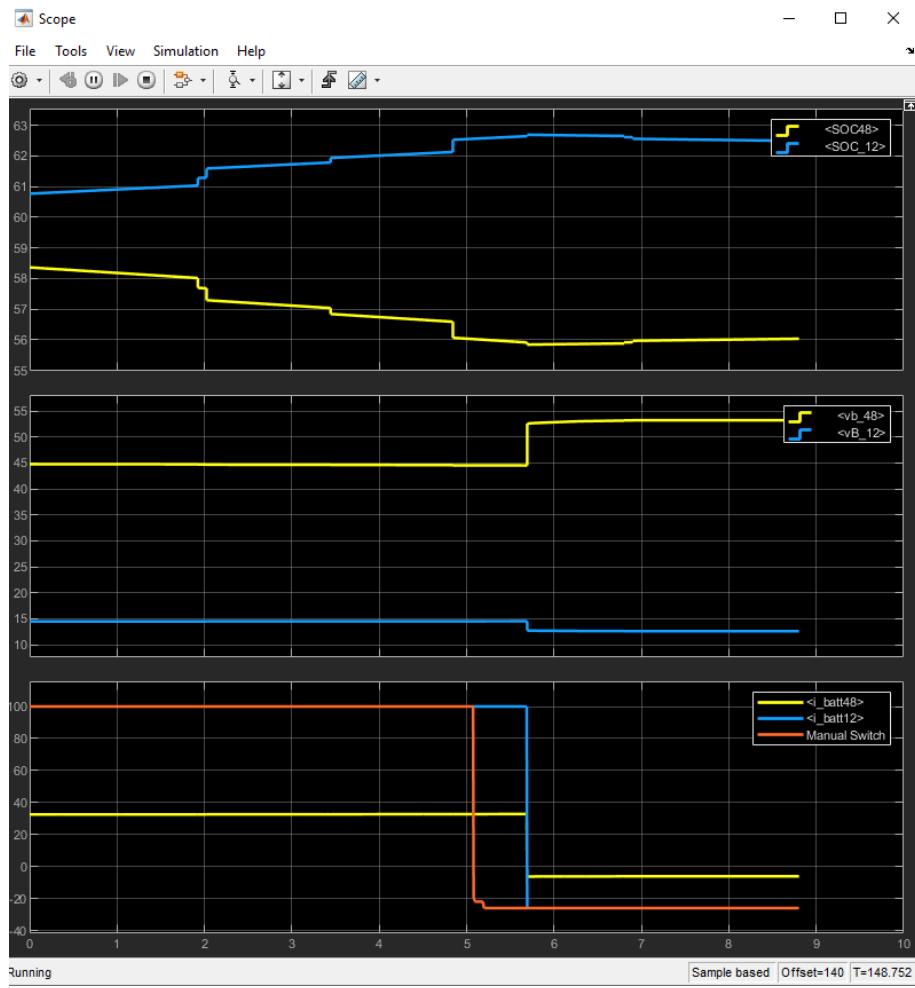


Figura 38. Comportamiento del voltaje, SOC y corriente ante una variación negativa de la corriente referencial.

En la figura 39 se observa un escenario más extremo debido a que la corriente de referencia se establece en -100 A, lo que representa un cambio abrupto que permite apreciar con mayor claridad el comportamiento de las variables del sistema en modo Boost. En este caso, la batería de 48 V incrementa su estado de carga (SOC) de manera progresiva, ya que comienza a recibir la potencia proveniente de la batería de 12 V. En contraste, el SOC de la batería de 12 V presenta una disminución sostenida como consecuencia de la entrega de energía hacia la batería de mayor voltaje. Este comportamiento se refleja también en las señales de voltaje: el voltaje de la batería de 48 V aumenta hasta aproximarse a su nivel máximo de carga permitido por su química y configuración, mientras que el voltaje de la batería de 12 V tiende a descender al estar

suministrando potencia. En conjunto, estos resultados validan la respuesta dinámica del convertidor en condiciones de referencia negativas altas, confirmando la correcta transferencia bidireccional de energía y la capacidad del sistema para garantizar la recarga de la batería principal a partir de la batería auxiliar.

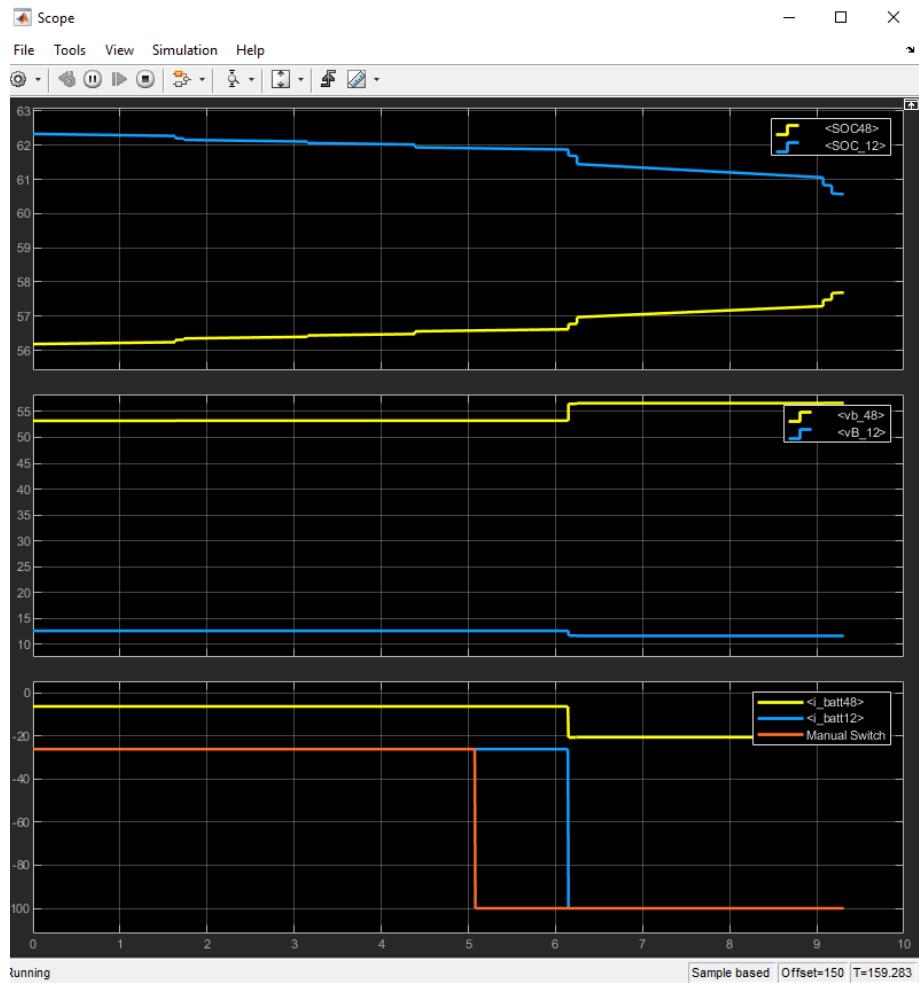


Figura 39. Comportamiento del voltaje, SOC y corriente ante una variación negativa de la corriente referencial.

Capítulo 4

4. Conclusiones y recomendaciones

4.1. Conclusiones

Tras aplicar las fases de modelado, simulación e integración de la propuesta, se obtuvieron las siguientes conclusiones primordiales:

- Una vez desarrollado el modelo en Simulink para su posterior validación en el OPAL RT, se demostró que la arquitectura del control bidireccional simplificado gestionó correctamente la transferencia de potencia entre las baterías de 48 y 12 VDC. Al modelar detalladamente se observó la respuesta mediante osciloscopios y display del controlador de batería, el pwm, el PI y las variables de interés. Esto nos permite constatar el objetivo principal de modelar un controlador bidireccional de potencia de manera exitosa capaz de operar entre los modos boost y buck que representa una mejor gestión energética.
- Al analizar los resultados obtenidos en la versión del modelo simplificado se puede demostrar que el control es estable al poder seguir la corriente de referencia mediante un lazo de corriente cerrado sin importar el perfil de manejo o situaciones de carga-descarga. Por ende, Al guardar coherencia los resultados medidos se pueden decir que el modelado garantiza un flujo de energía controlado en ambas direcciones que resulta esencial para la operación de un vehículo eléctrico ante el umbral de límites de profundidad de carga y descarga.

- Al analizar el porcentaje de las baterías se puede decir que la lógica de control empleada logra una redistribución energética razonable. Además, se observó que en situaciones específicas como la de los escenarios creado la batería no presentó problemas en recibir o enviar potencia. Esto aumenta la autonomía del sistema y se traduce en un aprovechamiento energético que permite recorrer una mayor distancia que la de los vehículos eléctricos que no poseen el control bidireccional.
- Como se pudo demostrar a lo largo de este trabajo, el modelo del vehículo eléctrico presentaba un frenado regenerativo y es que al considerarlo el motor podía seguir la velocidad de referencia, dicho de otra forma, el sistema es capaz de aprovechar las pérdidas por energía cinética y convertirla en energía eléctrica que típicamente represente entre un 0.5 a 1% de porcentaje en la batería. Por lo tanto, se cumplió con el objetivo de validar la estrategia de control bidireccional para un fortalecimiento en el aprovechamiento de los recursos energéticos del vehículo eléctrico.
- Al integrar un controlador PI en base a los valores de frecuencia de la data sheet como ancho de banda y margen de fase se obtuvo la función de transferencia que nos permitió calcular las constantes de proporcionalidad que se traduce a una rápida respuesta y un mejor manejo de las variaciones por la alta conmutación que en conjunto al ciclo de trabajo y una señal triangular permitieron modelar los pulsos acordes a lo solicitado. En conclusión, los resultados son concisos porque esta modelación fue clave para un diseño de control robusto y adaptable al perfil de manejo que se requiera.

- Finalmente, mediante la simulación en tiempo real con OPAL-RT se logró comprobar que esta plataforma constituye un entorno apropiado para evaluar el desempeño del sistema en condiciones muy similares a las reales. La ejecución en tiempo real permitió evidenciar fenómenos transitorios que probablemente no se apreciarían en una simulación convencional de Simulink, lo que aporta mayor confianza a los resultados obtenidos. Asimismo, se verificó que el uso de OPAL-RT disminuye de manera considerable los riesgos de una implementación física temprana, al ofrecer un espacio seguro para realizar pruebas y ajustar parámetros. De esta forma, se cumplió con el propósito de validar la viabilidad del control bidireccional dentro de un entorno de pruebas confiable, que puede servir como punto de partida para futuras aplicaciones en vehículos eléctricos reales.

4.2. Recomendaciones

- En primer lugar, se recomienda llevar el sistema a una validación experimental en tiempo real, utilizando la plataforma OPAL-RT junto con la tarjeta LAUNCHXL-F28379D, ya que esto permitirá comprobar la robustez del control bidireccional bajo condiciones dinámicas y ajustar los controladores con métricas objetivas de desempeño.
- Asimismo, resulta conveniente optimizar la transición entre los modos buck y boost, pues durante las simulaciones se evidenciaron limitaciones en la conmutación. Una línea de investigación futura podría enfocarse en algoritmos de control más avanzados, como control predictivo o lógica difusa, que permitan realizar dicha transición con mayor estabilidad y eficiencia.
- También se recomienda un refinamiento en el modelo de baterías, incorporando parámetros dinámicos como resistencia interna dependiente de la temperatura y efectos de envejecimiento. Esto permitiría mejorar la precisión en el cálculo del estado de carga y obtener proyecciones más realistas de autonomía.
- Otra recomendación importante es ampliar el análisis energético considerando diferentes perfiles de conducción, tales como WLTP, NEDC o US06, de modo que se pueda evaluar el comportamiento del sistema en escenarios variados y comparar los resultados con los obtenidos en el ciclo FTP75.
- De igual forma, en futuras fases podría integrarse un sistema de gestión energética global (EMS) que coordine el flujo de potencia no solo entre las dos baterías, sino también con fuentes externas como paneles solares o supercondensadores, lo que abriría la posibilidad de maximizar eficiencia y autonomía.
- Se recomienda usar tiempos de simulación más largos junto a cambios en la corriente de referencia para que el modelo tenga la capacidad de responder ante

estos cambios y se puedan apreciar de forma visual en los osciloscopios el cambio entre los modos buck y boost.

5. Referencias

- [1] O. P. Álvarez, «REVISIÓN Y MODELADO DE LOS CONVERTIDORES DC-DC BIDIRECCIONALES PRINCIPALES,» UNIVERSIDAD DE CANTABRIA, Santander, 2022.
- [2] T. Instruments, «LM5170-Q1 EVM User Guide,» Texas Instruments Incorporated, Dallas, 2016.
- [3] M. R. Ahmed, Design, Construction and Evaluation of a Power-Dense 12 V to 48 V Bidirectional DC-DC converter for Automotive Applications, Manchester: The University of Manchester Research, 2013.
- [4] How2Power, «Buck-Boost Controller Is Tailored To Dual Automotive Battery Systems,» How2Power, Hong Kong, 2017.
- [5] L. E. T. S. W. R. y. C. R. A. Juan Rocha-Hoyos, «Evaluación del Sistema de Tracción en un Vehículo Eléctrico Biplaza de Estructura Tubular,» Información Tecnológica, Quito, 2017.
- [6] P. G. X. Z. G. P. Z. P. W. Benjamin Cheong, «System-Level Motor Drive Modelling for Optimization-based Designs,» IEEE, Nottingham, 2020.
- [7] Y. G. a. S. E. A. Emadi, Modern Electric, Hybrid Electric, and Fuel Cell Vehicles, New York: CRC Press, 2009.
- [8] T. J. a. H. Toliyat, Introduction to Field-Oriented Control of AC Machines, IEEE Press, 2014.
- [9] J.-K. S. * a. C.-W. Ma, Li-Ion Battery Charging with a Buck-Boost Power Converter for a Solar Powered Battery Management System, Taipei: Energies, 2013.
- [10] G. G.-E. García, «LA TRANSICIÓN AL VEHÍCULO ELÉCTRICO Evolución y problemas,» Revistas ICE, Madrid, 2024.
- [11] « Dual Battery Charger System for Electric Vehicle,» IEEE, District Sangli, Maharashtra, 2021.

ANEXOS

Cuadrantes de operación del bloque motor+inversor+controlador

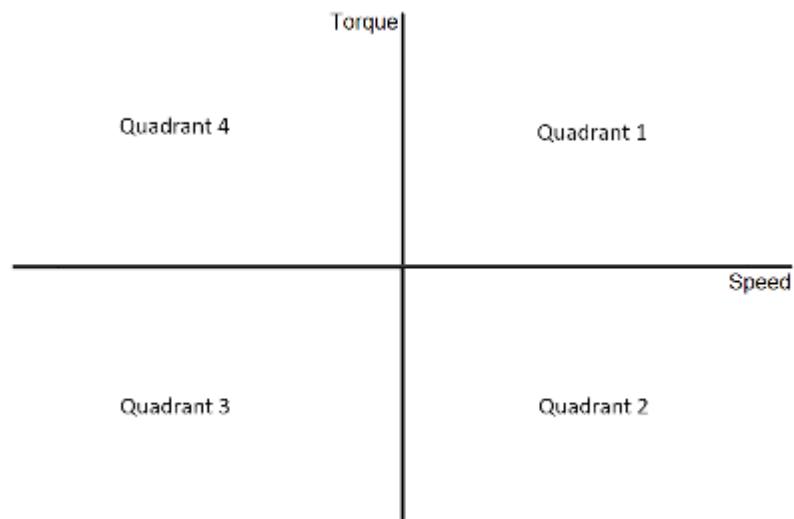


Figura 40. Cuadrantes del bloque motor and drive (System level).

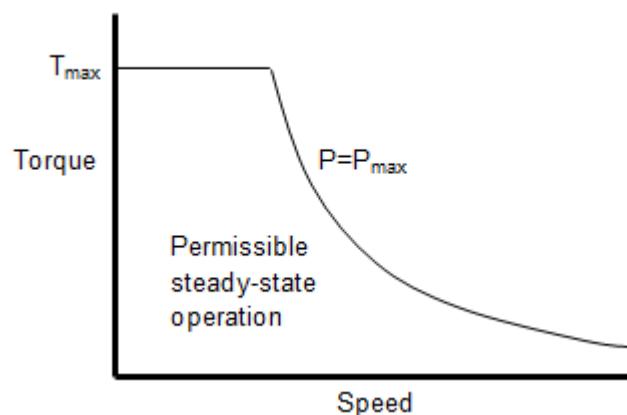


Figura 41. Torque vs velocidad actuando desde la mecánica c hasta el puerto R.

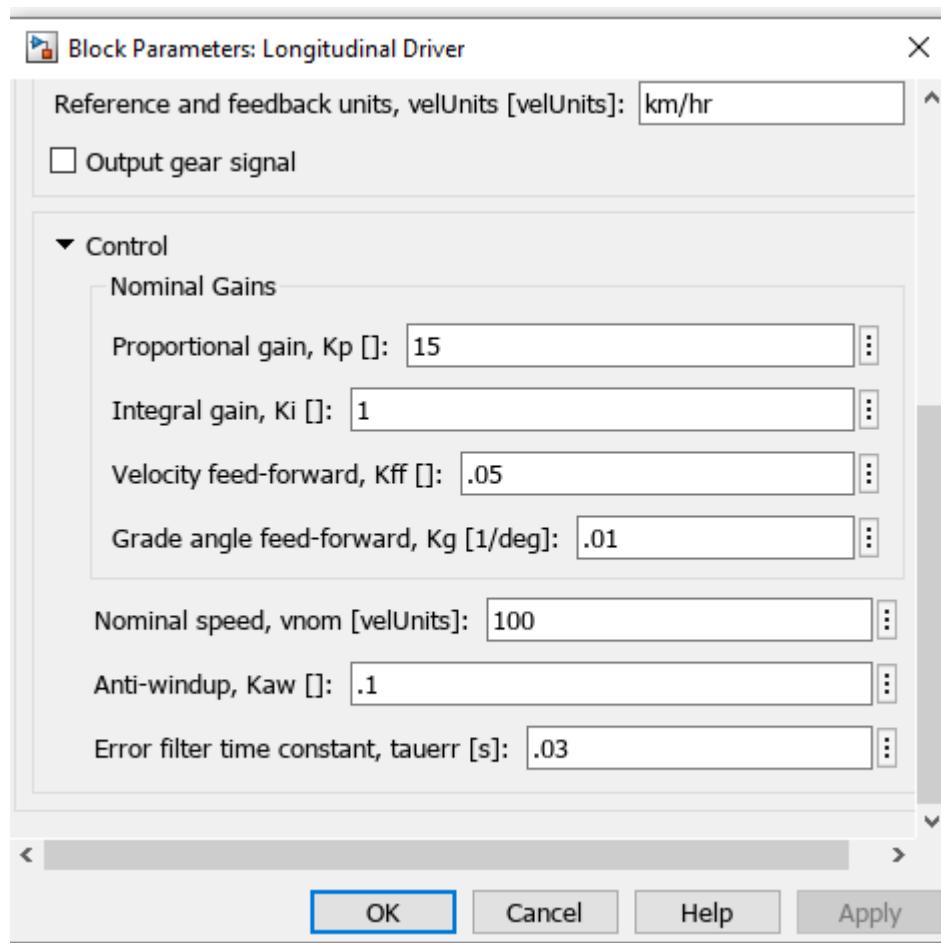


Figura 42. Parámetros adicionales del longitudinal driver.

Conversiones y ajustes

Se tuvieron que ajustar las unidades de los convertidores para que todo esté en una misma unidad y no le demos carga computacional al modelado al

tener que desarrollar un transformador para que todas las unidades estén en la misma escala.

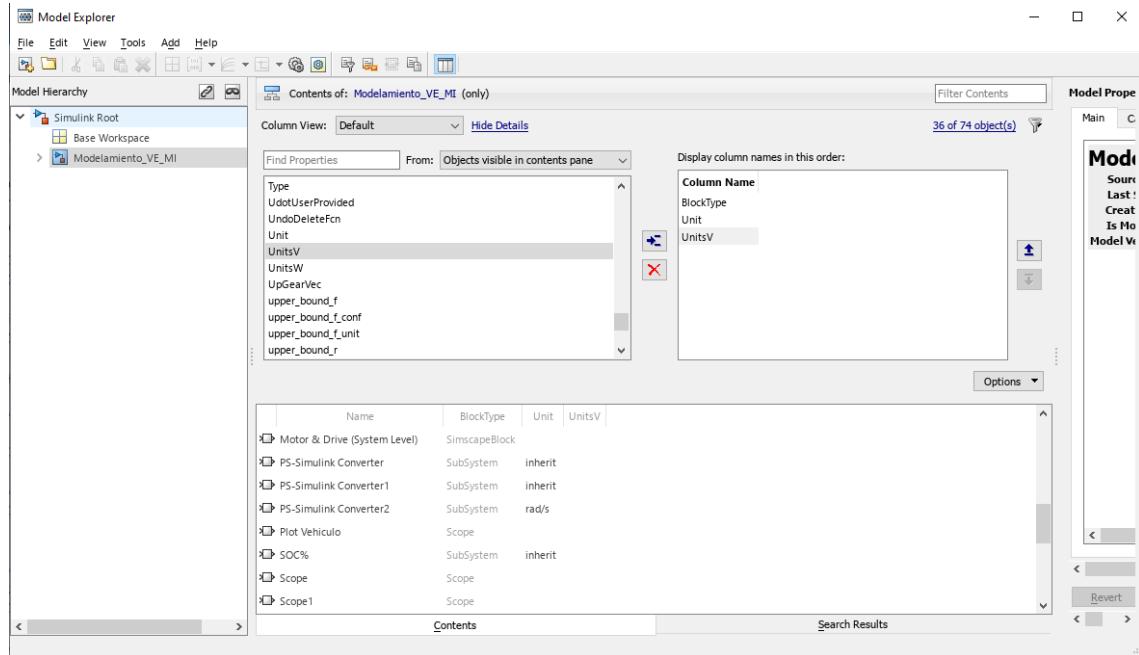


Figura 43. Ajustes de las unidades empleadas en la simulación.

El bloque longitudinal driver tiene salidas adimensionales como “AccelCmd” y “DecelCmd” que va entre 0 o 1, donde 1 significa que el conductor pisa el pedal a fondo y 0 que deja de pisarlo totalmente; de manera análoga ocurre para la otra señal pero en lugar de pisar el acelerador, lo que se pisa es el pedal de frenado. Se tuvieron que escalar dichas señales a la inercia del VE, que para nuestro simulado es 1200 N*m, 3 representa la aceleración longitudinal máxima y 400 a la masa por el radio equivalente de tracción.

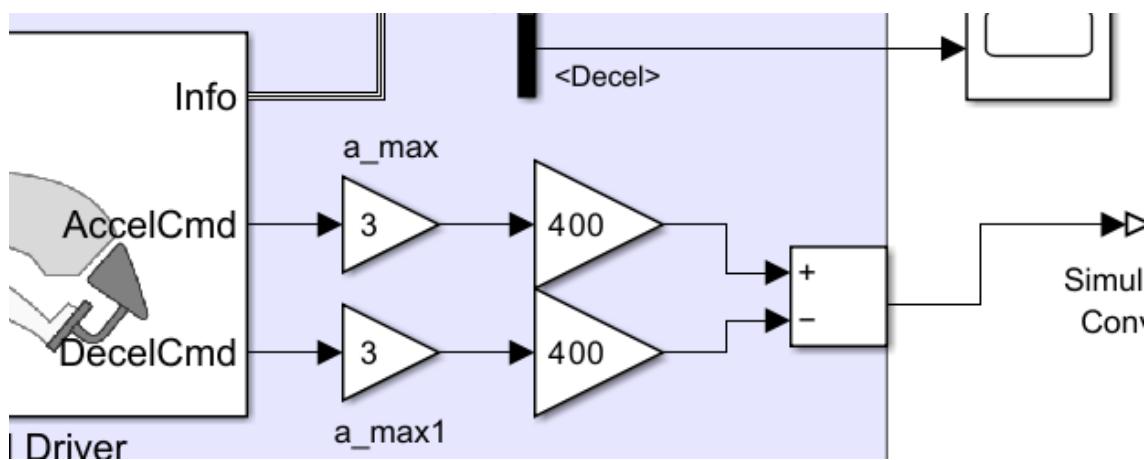


Figura 44. Gains para convertir las señales adimensionales de aceleración y freno en torque.

Cálculo de las ganancias empleadas para escalar la señal al torque que recibe el motor

Para estimar el torque necesario que debe generar el sistema de propulsión del vehículo eléctrico, se utiliza la expresión fundamental de dinámica lineal y rotacional:

$$T = m * a * r_{eq}$$

Ecuación 1.- Torque del motor

donde:

- T: torque en la rueda (N*m)
- m: masa del vehículo (kg)
- a: aceleración longitudinal deseada (m/s²)
- r_{eq} : radio equivalente de tracción (m), considerando el sistema rueda-transmisión

Parámetros utilizados:

- Masa del vehículo: 1000 kg
- Aceleración máxima esperada: 3 m/s²
- Relación de transmisión del diferencial: 2:1
- Rueda montada: **aro 16 pulgadas con neumático 205/55 R16**

Para el neumático 205/55 R16, el radio efectivo se calculó como:

$$r_{rueda} = r_{llanta} + \text{perfil del neumático}$$

Ecuación 2.- Radio de la rueda

$$r_{llanta} = \frac{16 \text{ inch} * 25.4 \text{ mm/inch}}{2} = 203.22 \text{ mm} = 0.2032 \text{ m}$$

$$\text{Perfil} = 55\% \text{ de } 205 \text{ mm} = 112.75 \text{ mm} = 0.1128 \text{ m}$$

$$r_{rueda} = 0.2032 + 0.1128 = 0.3160 \text{ m}$$

Considerando una inercia total equivalente en el eje motriz, definiremos un radio efectivo extendido a 0.4 m que contiene las pérdidas por deformaciones, rigidez torsional e inercia rotacional reflejada.

De esta forma es que hemos obtenido que el torque que le llega al motor es de $3 * 400$ que cumple con la inercia total del VE.

$$T = 1000 * (3) * (0.4) = 1200 \text{ Nm}$$

Código para generar el perfil de manejo según los escenarios planteados

```
%% Parámetros del perfil compuesto
fname    = 'cycleFTP75.mat'; % tu ciclo base
T_BASE_MAX = 2474;           % duración del ciclo base (s)
T_REPEAT1 = 14142.161;       % arranque de la 2da aparición (perfil
completo)
N_REPEATS = 2;               % # de apariciones completas después de la inicial
DT_UNI    = 1;                % muestreo uniforme requerido por el bloque (1 s)

%% Cargar ciclo base
if ~exist(fname,'file'), error('No encuentro %s.', fname); end
S = load(fname);

t0 = []; v0 = [];
for f = fieldnames(S).'
    x = S.(f{1});
    if isa(x,'timeseries'), t0 = x.Time(:); v0 = x.Data(:); break
    elseif isnumeric(x) && size(x,2)>=2, t0 = x(:,1); v0 = x(:,2); break
    end
end
if isempty(t0), error('No pude identificar [t, v] en el .mat'); end

t0 = t0 - t0(1);
if mean(v0) < 40, v0 = v0*3.6; end % m/s -> km/h si aplica

% recorte 0..2474 del perfil base
idxb = (t0>=0) & (t0<=T_BASE_MAX);
t_base = t0(idxb);
```

```

v_base = v0(idxb);

%% Construir la secuencia (no hace falta uniforme aún)
eps_t = 1e-9; % epsilon de tiempo para evitar empalmes exactos

% tramo 1: base en 0..2474
t_all = t_base; v_all = v_base;

% caer a 0 tras tramo 1 (en un tiempo > último)
t_all(end+1,1) = t_base(end) + eps_t;
v_all(end+1,1) = 0;

% tramo 2: ceros hasta 15830 (evita duplicar el tiempo inicial)
if t_all(end) < T_REPEAT1
    t_all(end+1,1) = T_REPEAT1; v_all(end+1,1) = 0;
end

% tramos 3..: repetir perfil completo N_REPEATS veces a partir de 15830, sin gap
t_offset = T_REPEAT1;
for k = 1:N_REPEATS
    % perfil completo desplazado
    t_rep = t_base + t_offset;
    v_rep = v_base;

    % añadir perfil
    t_all = [t_all; t_rep]; v_all = [v_all; v_rep];

    % caer a 0 al terminar (en tiempo > último)
    t_all(end+1,1) = t_rep(end) + eps_t;
    v_all(end+1,1) = 0;

    % siguiente repetición arranca inmediatamente después
    t_offset = t_rep(end) + eps_t;

```

```

end

% último punto: +1 s en cero después del último valor >0
idx_nz = find(v_all>0,1,'last');
t_last = t_all(idx_nz);      % ~20779 s
T_FINAL = ceil(t_last) + 1;    % 20780 s
if t_all(end) < T_FINAL
    t_all(end+1,1) = T_FINAL;    v_all(end+1,1) = 0;
end

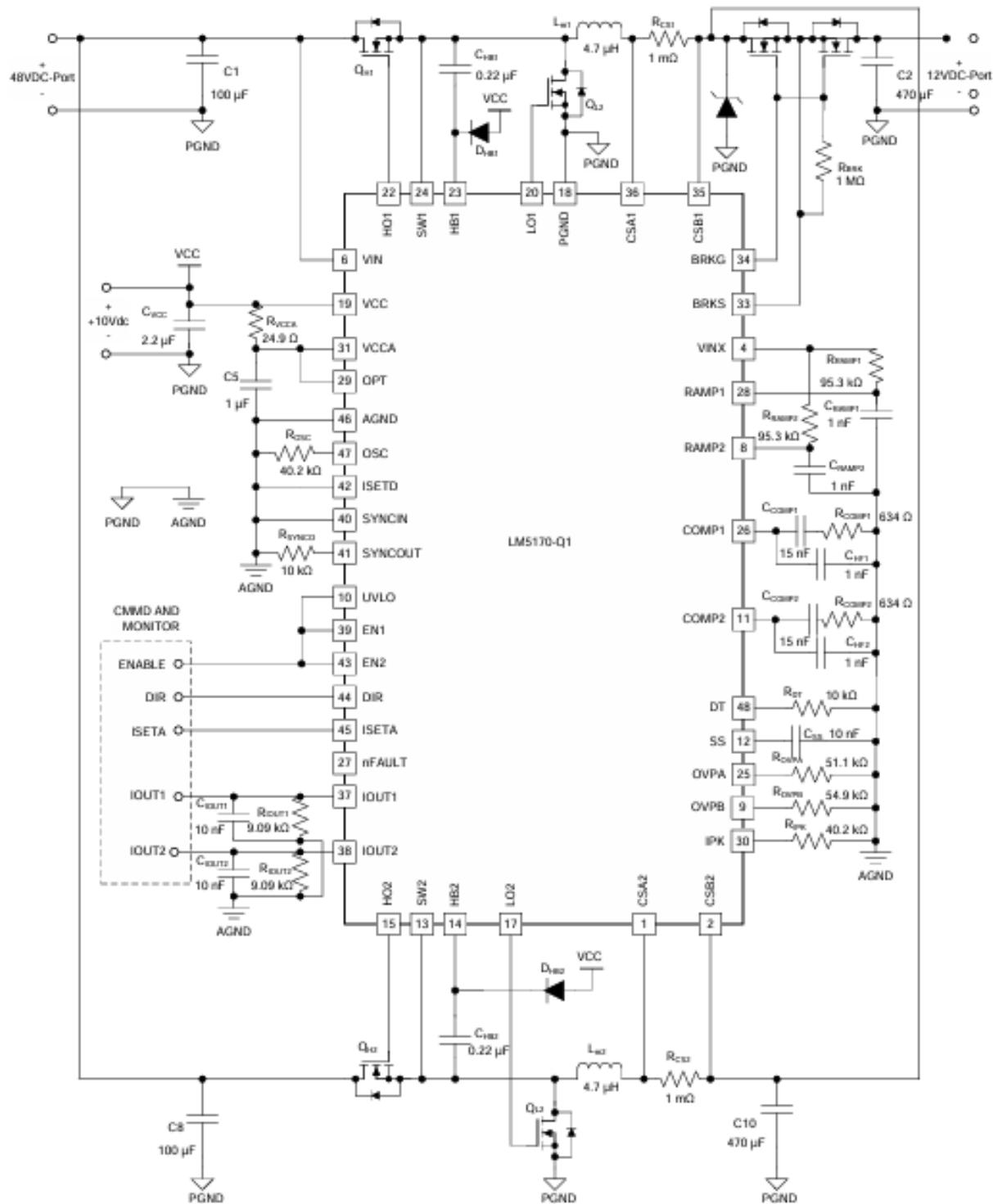
%% SANEAR: ordenar y eliminar tiempos duplicados (mantener ÚLTIMO valor)
[ts, idx] = sort(t_all);    vs = v_all(idx);
[tsu, ia] = unique(ts, 'last'); % <- clave: conservar la última ocurrencia
ts = tsu; vs = vs(ia);

%% RESAMPLE uniforme para el Drive Cycle Source
t_uni = (0:DT_UNI:T_FINAL)';      % 0,1,2,...,T_FINAL
v_uni = interp1(ts, vs, t_uni,'linear','extrap');
% asegurar 0 exacto luego del último no-cero:
v_uni(t_uni > t_last) = 0;

%% Variables para Simulink (UNIFORMES)
perfil_uniform = [t_uni, v_uni];    % para Drive Cycle Source → Workspace
variable
perfil_ts_uni = timeseries(v_uni, t_uni); % para From Workspace si prefieres

%% Verificación
figure; plot(t_uni, v_uni); grid on; xlabel('Time [s]'); ylabel('Velocity [km/hr]');
ESQUEMATICO UTILIZADO CIRCUITO DE FUERZA LM5170Q1-
BIDIR

```



Código empleado para el convertidor bidireccional

```
%Parameters for LM5170_OPALRT
```

```
% clc
```

```
Vbatt_48=48;
```

```
Vbatt_12=12;
```

```
L=4.7e-6*1;
```

```
R=1e-3;
```

```
fsw=100e3;
```

```
Tsw=1/fsw;
```

```
d=0.2;
```

```
deltaI=(Vbatt_48-Vbatt_12)*(d*Tsw)/L;
```

```
Gpi=tf(Vbatt_48,[L R]);
```

```
BW=fsw/100;
```

```
PM=60;
```

```
Gci=PI_Design(Gpi,BW,PM);
```

```
%Gci=K_Factor(Gpi,BW,PM);
```

```
[num,den]=tfdata(Gci);
```

```
Gc_Num = num{1};
```

```
Gc_Den = den{1};
```

```
Kp=Gc_Num(1)/Gc_Den(1);
```

```
Ki=1/Gc_Den(1);
```

```
% Kp=0.2;
```

```

% Ki=200;

Tsim=1000*Tsw;
% Ts=0.01*Tsw;
Ts=50e-6;

function [Gc, Gc_Num, Gc_Den] = PI_Design(sys,fc,pm_deg)
%PI_DESIGN Designs a PI controller.
% GC = PI_DESIGN(SYS,FC,PM_DEG) returns a PI controller for SYS with a
% open-loop bandwidth of FC herz and a phase margin of PM degrees.
% Both GC and SYS are continuous-time transfer functions.
%
% [GC, GC_NUM, GC_DEN] = PI_DESIGN(...) also returns the numerator and
% denominaotr of GC.

% Copyright 2007-2007 Xiaolin Mao.
% $Revision: 1.0 $ $Date: 2007/11/18 13:00 $

wc = 2*pi*fc;

[mag_sys, phase_sys] = bode(sys, wc);

PhaseBoost = pm_deg - ((phase_sys - 90) + 180);

if PhaseBoost <= 0,
    % Type I controller
    Gc = tf(1,[1 0]);
elseif PhaseBoost < 90,
    % Gc = Ki(1+s/wz)/s (wz = Ki/Kp)
    wz = wc/tan(PhaseBoost*pi/180);
    Gc = tf([1/wz 1], [1 0]);
else
    % PI controller cannot boost the phase higher than 90 degrees.

```

```
error('PI controller cannot boost the phase higher than 90 degrees.')
end

mag_wc    = bode(sys*Gc, wc);
Gc        = Gc/mag_wc;
[num, den] = tfdata(Gc);
Gc_Num = num{1};
Gc_Den = den{1};
```