



Instituto Tecnológico de Celaya

**Departamento de Ingeniería
Electrónica**

**“Diseño y simulación de un convertidor CD-CD
de múltiples entradas para su aplicación
en vehículos eléctricos”**

Tesis:

**Que para obtener el grado de
Maestro en Ciencias en
Ingeniería Electrónica**

Presenta:

Alfredo Alvarez Díaz-Comas

Asesor:

Dr. C. Héctor Juan Carlos López Tapia

Co-Asesor:

Dr. C. Roberto Valentín Carrillo Serrano

Celaya, Gto., 2019

Agradecimientos:

A mis compañeros de maestría por su amistad y por hacerme sentir como en casa.

A mis profesores por compartir sus conocimientos y tiempo.

A todos los profesores del Departamento de Electrónica por darme la oportunidad de realizar mis estudios de maestría.

A mis revisores por sus sugerencias para lograr un mejor trabajo.

A mi familia por todo su apoyo y cariño.

A mi papá por sus consejos.

A mi mamá por ser mi guía y compañera en este período.

A mi asesor Dr.C. Héctor Juan Carlos López Tapia por todo el tiempo que me dedicó, los conocimientos que me compartió y por su paciencia.

A Adyr, mi compañero en este viaje y sin el cual no hubiese sido posible.

A CONACyT por el apoyo económico que me brindó para la realización de este trabajo.

Índice general

Índice general.....	II
Lista de símbolos	IV
Índice de figuras.....	V
Índice de tablas	IX
Resumen.....	X
Abstract	XI
Introducción.....	XII
Estado del arte	1
1.1. Fuentes	3
1.2. Sistemas de administración de energía	6
1.3. Sistemas de propulsión eléctricos.....	7
1.4. Topologías de CD-CD.....	11
Análisis y diseño del convertidor propuesto	19
2.1. Propuesta de convertidor	20
2.2. Modos de operación.....	22
2.3. Dimensionamiento de los elementos almacenadores	24
2.4. Estrategia de control	25
2.4.1. Control por modos deslizantes para la corriente I_2	26
2.4.2. Control on-off para la tensión V_{bus}	27
2.4.3. Algoritmo del MPPT en el panel solar.....	28
2.4.4. Generación de energía en la máquina eléctrica	30
2.4.5. Gestor de energía.....	31
2.4.6. Decodificador.....	33
2.5. Sistema de propulsión.....	34

2.6. <i>Modelo de batería</i>	35
Resultados de simulación.....	40
3.1. <i>Simulación del modelo de batería</i>	42
3.2. <i>Simulación de los convertidores</i>	43
Conclusiones.....	57
Referencias bibliográficas	59

Lista de símbolos

S_x	Interruptor x
L_x	Inductor x
C_x	Capacitor x
PMSM	Motor síncrono de imanes permanentes
PMSG	Generador síncrono de imanes permanentes
PV	Panel solar
UC	Ultracapacitor
Bat	Batería
MPPT	Seguimiento del punto de máxima transferencia de potencia
EMS	Gestor de energía
Hist.	Controlador de histéresis
SMC	Controlador por modos deslizantes
Decod.	Decodificador
AND	Compuerta lógica AND
M/G	Máquina eléctrica
Fren.	Sensor de salida digital que indica si el pedal de freno está presionado
Estac.	Sensor de salida digital que indica si el vehículo se encuentra estacionado
band	Variable binaria necesaria para el control de histéresis
w	Velocidad del vehículo
I_{CC}	Corriente de cortocircuito del panel solar
V_{OC}	Tensión de circuito abierto del panel solar
P_{MPP}	Potencia en el punto de máxima transferencia en el panel solar
P_{out_PV}	Potencia a la salida del panel solar
P_{out_PMSG}	Potencia a la salida del generador

Índice de figuras

Capítulo 1

Figura 1.1. Diagrama de los elementos presentes en el vehículo eléctrico considerado.....	2
Figura 1.2. Clasificación de las estrategias de control utilizadas en el gestor de energía.....	7
Figura 1.3. Convertidor MIPEC, (a) convertidor base, (b) convertidor resultante para tres entradas.....	11
Figura 1.4. Convertidor de múltiples entradas propuesto en [14].....	12
Figura 1.5. Convertidor de múltiples entradas para un sistema híbrido de energía..	13
Figura 1.6. Convertidor de dos entradas propuesto en [15].....	15
Figura 1.7. Convertidor de múltiples entradas propuesto en [18].....	16

Capítulo 2

Figura 2.1. Convertidor de múltiples entradas propuesto.....	20
Figura 2.2. Diagrama de transferencias de energía en el convertidor.....	20
Figura 2.3. Convertidor asociado al panel solar.....	21
Figura 2.4. Convertidor de múltiples entradas.....	21
Figura 2.5. Modos de operación cuando $V_{UC} > V_1$, (a) modo 1A, (b) modo 1B.....	22
Figura 2.6. Modos de operación para la transferencia desde la batería hacia el capacitor C_{bus} , (a) modo 3A, (b) modo 3B.....	23
Figura 2.7. Diagrama en bloques del controlador.....	26
Figura 2.8. Circuito del SMC.....	27
Figura 2.9. Diagrama de bloques del controlador on-off.....	28

Figura 2.10. Diagrama de flujo del controlador on-off.....	28
Figura 2.11. (a) Característica V-I de una celda fotovoltaica, (b) Dependencia de la característica V-I con la irradiancia.....	29
Figura 2.12. Algoritmo para el MPPT, (a) utilizando el convertidor de múltiples entradas, (b) utilizando el convertidor asociado al panel solar.....	29
Figura 2.13. Diagrama de flujo del algoritmo utilizado para alcanzar el MPPT en el PMSG.....	31
Figura 2.14. Casos generales que se tienen en la aplicación.....	31
Figura 2.15. Diagrama de flujo cuando no se genera energía en el panel solar ni en el PMSG.....	32
Figura 2.16. Diagrama de flujo cuando solo se genera energía en el panel solar..	33
Figura 2.17. Diagrama de flujo cuando solo se genera energía en el PMSG.....	33
Figura 2.18. Diagrama de flujo cuando el vehículo se encuentra en marcha con aceleración positiva.....	33
Figura 2.19. Circuito del sistema de propulsión del vehículo eléctrico.....	35
Figura 2.20. Curva característica de descarga de una batería de ión-litio.....	35
Figura 2.21. Implementación en PSIM de la región exponencial.....	36
Figura 2.22. Implementación en PSIM de la región nominal.....	37
Figura 2.23. Implementación en PSIM de la región de descarga.....	37
Figura 2.24. Obtención de la carga de la batería en PSIM.....	38
Figura 2.25. Circuito del modelo de batería.....	38

Capítulo 3

Figura 3.1. Gráfica de la tensión de salida de la batería ante la corriente demandada.....	43
--	----

Figura 3.2. Transferencia desde la batería hacia el ultracapacitor.....	43
Figura 3.3. (a) MPPT del panel solar dedicando el convertidor de múltiples entradas, (b) MPPT del panel solar utilizando el convertidor asociado al mismo.....	44
Figura 3.4. Caracterización del PMSG utilizado.....	45
Figura 3.5. MPPT implementado para el PMSG.....	45
Figura 3.6. Ciclo de manejo UDC.....	47
Figura 3.7. Funcionamiento del vehículo mientras se encuentra parado.....	48
Figura 3.8. Funcionamiento del vehículo en marcha con aceleración positiva.....	48
Figura 3.9. Funcionamiento del vehículo frenando.....	49
Figura 3.10. Comportamiento de las variables de estado del convertidor de múltiples entradas durante el ciclo de manejo.....	50
Figura 3.11. Comportamiento de la batería y el ultracapacitor durante el ciclo de manejo.....	51
Figura 3.12. Comportamiento del panel solar y el PMSG durante el ciclo de manejo.....	51
Figura 3.13. Comportamiento del sistema cuando no existe energía en los elementos almacenadores ni se encuentre generando energía el panel solar.....	52
Figura 3.14. Comportamiento del sistema cuando no existe energía en los elementos almacenadores y se está generando energía en el panel solar.....	53
Figura 3.15. Comportamiento del sistema cuando hay energía en la batería y no se está generando energía en el panel solar.....	53
Figura 3.16. Comportamiento del sistema cuando hay energía en la batería y se está generando energía en el panel solar.....	54

Figura 3.17. Comportamiento del sistema cuando hay energía en el ultracapacitor y no se está generando energía en el panel solar.....54

Figura 3.18. Comportamiento del sistema cuando hay energía en el ultracapacitor y se está generando energía en el panel solar.....55

Figura 3.19. Comportamiento del sistema cuando hay energía en los elementos almacenadores y no se está generando energía en el panel solar.....55

Índice de tablas

Capítulo 1

Tabla 1.1. Características de las principales baterías del mercado.....	4
Tabla 1.2. Modos de operación del MIPEC.....	12
Tabla 1.3. Modos de operación del convertidor propuesto en [14].....	13
Tabla 1.4. Modos de operación del convertidor.....	14
Tabla 1.5. Modos de operación del convertidor presentado en [15].....	15
Tabla 1.6. Modos de operación del convertidor propuesto en [18].....	16
Tabla 1.7. Comparación de los convertidores existentes.....	18

Capítulo 2

Tabla 2.1. Modos de operación utilizados en el convertidor asociado al panel solar.....	22
Tabla 2.2. Modos de operación del convertidor de múltiples entradas.....	23
Tabla 2.3. Obtención del tamaño de los elementos almacenadores del convertidor.....	25
Tabla 2.4. Demostración de la homogeneidad del parámetro del controlador teniendo en cuenta solo un lazo de corriente	27
Tabla 2.5. Comportamiento del decodificador de salida.....	34

Capítulo 3

Tabla 3.1. Datos de las fuentes y del motor del vehículo eléctrico.....	41
Tabla 3.2. Datos del convertidor de múltiples entradas y el convertidor asociado al panel solar.....	41
Tabla 3.3. Datos del sistema de propulsión.....	42
Tabla 3.4. Valores del modelo de la batería.....	42

Resumen

Los vehículos eléctricos e híbridos son una alternativa a los automóviles con motor de combustión interna para reducir el impacto medioambiental en el sector del transporte. En los vehículos eléctricos es necesario administrar fuentes de energía de diferentes niveles de tensión, así como garantizar un flujo de potencia bidireccional. Además, es necesario cumplir con los requerimientos de la máquina eléctrica. Estas características se garantizan mediante un convertidor de CD-CD.

En la literatura se presenta una gran cantidad de trabajos con relación a los convertidores CD-CD para su aplicación en vehículos eléctricos. Estos convertidores tienen elementos en común como el hecho de manejar varias entradas y que permiten el flujo de potencia en ambos sentidos. Se pueden diferenciar en la cantidad de elementos utilizados, la topología o la posibilidad de tener múltiples salidas. Estos dispositivos son fundamentales para garantizar el correcto funcionamiento del sistema.

El objetivo de este trabajo fue diseñar y validar en simulación un convertidor de potencia CD-CD bidireccional y de múltiples entradas para lograr la interacción entre dos o más fuentes de energía. Además, con el convertidor diseñado fue posible cualquier combinación de los elementos del sistema como fuente y destino para una transferencia, así como realizar cualquier conversión reduciendo o elevando la tensión de entrada.

Abstract

Electric and hybrid vehicles are an alternative to cars with internal combustion engines in order to avoid the environmental impact in the transportation sector. In electric vehicles it is necessary to manage sources with different voltage levels, as well as guarantee a bidirectional power flow. Also, it is necessary fulfilling the requirements of the electric machine. All these characteristics can be guaranteed by a DC-DC converter.

The literature presents a large number of works in relation to DC-DC converters for electric vehicles application. These converters have elements in common such as the fact that they handle several inputs and allow the power flow in both directions. They can be differentiated in the number of used elements, the topology or the possibility of having multiple outputs. These devices are fundamental to guarantee the proper functioning of the system.

The objective of this work is to design and validate in simulation a multiple inputs bidirectional DC-DC power converter to achieve the interaction between two or more power supplies. In addition, for any transfer it was possible any combination of the elements of the system as a source and destination and to make any conversion by reducing or boosting the input voltage.

Introducción

El calentamiento global es uno de los mayores desafíos en la actualidad para la especie humana. El aumento de la temperatura ha provocado la desaparición de especies animales y vegetales, destrucción de glaciares, ascenso del nivel del mar, eventos meteorológicos extremos y muchos otros fenómenos que amenazan la vida en el planeta tal como la conocemos. La principal causa de este cambio es la emisión de gases de efecto invernadero a la atmósfera. Estos gases permiten que la luz proveniente del Sol los atraviese y lleguen a la Tierra; sin embargo, retienen parte de la radiación que es rebotada en la superficie de la misma [1].

Algunas de las principales fuentes de estos gases de efecto invernadero son: la generación de electricidad, el transporte, el sector industrial, la agricultura y los sectores comercial y residencial. El sector del transporte es uno de los mayores contribuidores, representando un 24 % del total de emisiones de CO₂ a nivel mundial. Este sector es el responsable del mayor crecimiento en emisiones de la actualidad debido al crecimiento del turismo, la economía globalizada y el aumento de los estándares de vida [2].

Una alternativa viable para disminuir las emisiones en este sector es la utilización de vehículos eléctricos, los cuales prácticamente se comportan como autos de cero emisiones. A pesar del reciente interés en estos coches, su invención data del siglo XIX. El primer automóvil eléctrico exitoso en los Estados Unidos se construyó en 1891 por William Morrison. Para 1914, las ventas de estos autos comenzaron un irreversible e inevitable declive debido a la competencia con los autos de combustión interna. Nunca desaparecieron del todo, pero su utilización quedó limitada a vehículos para trabajos ligeros [3].

Existen muchas razones por las cuales estos automóviles nunca llegaron a tener un uso extensivo, algunas de las cuales se mantienen hoy día. Uno de los principales obstáculos es la autonomía del vehículo, ya que depende de la batería. Además, el tiempo de carga de la misma lo hace poco atractivo. Otros factores que se pueden mencionar en detrimento de estos autos es su alto precio de venta, la existencia de pocas estaciones de carga y su pobre desempeño comparado con los autos basados en motores de combustión interna [4].

A pesar de estas limitaciones, en Estados Unidos se han proporcionado beneficios para incentivar la compra de este tipo de automóviles tales como: créditos para su compra, acceso a los carriles de viaje compartido, exención de inspecciones, reducción de cuotas de inscripción, entre otros. Esto y otros factores, ha provocado el crecimiento de las ventas de estos vehículos; para noviembre de 2015 llegaron a ser más de siete veces mayores que las ventas de enero de 2010 [5].

Aparejado a este auge de los vehículos eléctricos han surgido nuevos retos que la industria electrónica debe ser capaz de resolver. En [6] se describen las principales tendencias de la investigación aplicada a estos autos, donde se destacan: mejorar los ecualizadores de baterías existentes, perfeccionar y disminuir el tamaño de los cargadores de baterías desde la red, creación de convertidores de CD-CD para la interfaz de las fuentes con un bus común y la creación de nuevas topologías de inversores para el sistema de tracción.

El convertidor de CD-CD permite la interacción de diferentes fuentes de energía con la máquina eléctrica. Cuando se utiliza un sistema híbrido de energía, el convertidor debe ser de múltiples entradas. Este elemento va a impactar directamente en la eficiencia del sistema, el aprovechamiento de la energía y en la vida útil de la batería. Esta situación evidencia la importancia de las investigaciones enfocadas a este tipo de sistemas.

La tesis está estructurada en tres capítulos:

Capítulo 1. Estado del Arte.

Muestra una introducción a los elementos que conforman un vehículo eléctrico y los aspectos claves a tener en cuenta para su aplicación en los mismos. Además, se realiza la revisión de distintas topologías de convertidores CD-CD que se utilizan para la interacción de las fuentes con el bus de corriente directa.

Capítulo 2. Análisis y diseño del convertidor propuesto.

Contiene el análisis y diseño del convertidor propuesto y se muestran sus modos de operación. También se presentan las estrategias de control diseñadas para el control de las variables de estado del convertidor, cómo lograr la operación en el punto de máxima transferencia de potencia en el panel y el generador y cómo gestionar la energía del sistema.

Capítulo 3. Resultados de simulación.

Presenta las simulaciones realizadas en el software PSIM para comprobar la topología propuesta. Para finalizar se presentan las conclusiones generales de la tesis y los posibles trabajos futuros que derivan de la presente investigación.

Capítulo 1

Estado del arte

En el presente capítulo se introducen todos los elementos que conforman un vehículo eléctrico desde el punto de vista electrónico. Se realiza una comparación de las ventajas y desventajas de cada tecnología para esta aplicación. Además, se analizan varias topologías de convertidores de múltiples entradas que se presentan en la literatura atendiendo a sus modos de operación, el control de las variables de estado del convertidor y el gestor de energía utilizado.

Desde el punto de vista electrónico un vehículo eléctrico está conformado por fuentes que generen energía, una máquina eléctrica que permita el movimiento de las ruedas, convertidores de potencia para interactuar entre estos elementos y un sistema de administración de energía para gestionar el funcionamiento del vehículo. Todos estos elementos deben ser correctamente seleccionados, diseñados e implementados para un eficiente funcionamiento del sistema.

En [7] se muestran los modelos de vehículos eléctricos más representativos en el mercado desde 1969 hasta 2012. Del análisis de este artículo se puede apreciar que los motores más pequeños en estos automóviles son de 2.5 kW, un ejemplo de esto es el Citicar de 1974. A este rango de potencia es precisamente que se enfoca la presente investigación.

En este trabajo se consideraron tres fuentes principales de energía: un panel solar, un ultracapacitor y una batería. Además, es preciso considerar que la máquina eléctrica puede trabajar como generador y considerarse otra fuente en algún momento de su funcionamiento como en el frenado regenerativo. Para aprovechar esta capacidad de la máquina eléctrica se pensó en acoplarla a un pedal. De esta manera, cuando el vehículo se encuentre estacionado el conductor puede generar energía, mientras que cuando se encuentra en marcha se puede compartir la carga mecánica para que se consuma menos energía. La interacción de todos estos elementos se lleva a cabo a través de dos convertidores: un CD-CD de múltiples entradas y un inversor trifásico. Todos estos elementos se pueden apreciar en la figura 1.1.

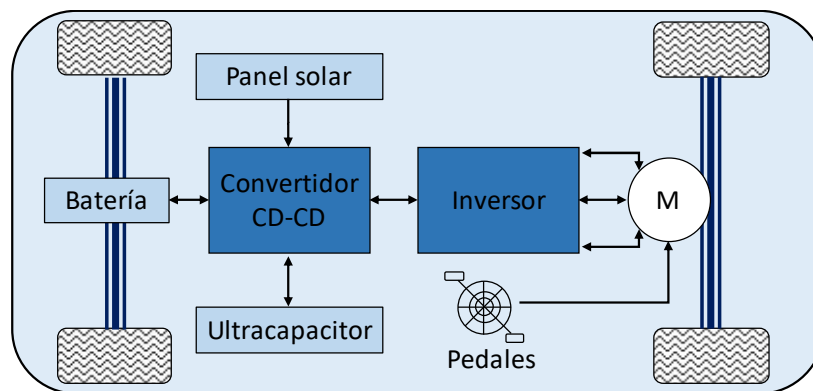


Figura 1.1. Diagrama de los elementos presentes en el vehículo eléctrico considerado.

1.1. Fuentes y almacenadores de energía

Los elementos almacenadores de energía son de vital importancia en los vehículos eléctricos. Estos dispositivos son capaces de entregar energía hacia el exterior (modo descarga) y de aceptar energía desde el exterior (modo carga). Existen varios tipos de elementos almacenadores que han sido propuestos para los vehículos eléctricos. Estos deben cumplir ciertos requerimientos para su aplicación en un automóvil como la densidad de energía, la densidad de potencia, la eficiencia, requisitos de mantenimiento, costo, peso y seguridad. En los vehículos eléctricos el parámetro principal es la densidad de energía, ya que este determinará la autonomía del automóvil; mientras que en los vehículos híbridos el parámetro más importante a tener en cuenta es la densidad de potencia, ya que existirá una fuente principal de energía y con el elemento almacenador de energía se desea mejorar el rendimiento del coche [8].

El mayor obstáculo para la comercialización de los vehículos eléctricos es la batería. Estos dispositivos en muchos casos son el único elemento almacenador de energía y son el componente más costoso, más pesado y de mayor volumen. Para esta aplicación se han propuesto al menos 20 tipos diferentes de celdas. No obstante, ninguna llega a hacer gran diferencia con las que se tienen actualmente cuando se escalan para un automóvil [8].

En dependencia del propósito que se desee para el automóvil se debe seleccionar la batería. A mayor tensión, se obtiene una mayor aceleración y una mayor velocidad se puede alcanzar. Por lo general, se tiene un banco de baterías de 144 V. Para alcanzar este nivel de tensión se pueden utilizar baterías de ciclo profundo de 6 V, estas pueden entregar más amperio-hora y pesan más. Esto provocará que se tenga un mayor rango, pero un pobre desempeño. Si por el contrario se utilizan baterías de 12 V, se mejorará el desempeño debido a que estas son más ligeras [8].

La energía almacenada en una batería se mide en amperio-horas. Si se tiene una batería de 20 Ah se pueden extraer 2 A por 10 horas o, en teoría, 20 A en una hora. En la realidad esto no ocurre así, mientras mayor sea la demanda de corriente menor será la capacidad de la batería. Este comportamiento es debido a efectos

indeseados en la celda electroquímica. Otro aspecto que afecta la capacidad de las baterías es la temperatura. La temperatura más eficiente que los fabricantes recomiendan es 25 °C. Es muy importante ser capaz de predecir con exactitud estos efectos al seleccionar una batería. Usualmente, la capacidad de las baterías que se utilizan en vehículos eléctricos se dimensionan para 5 horas [8].

A continuación, se realiza una breve descripción de otros términos que son importantes en la selección de una batería para una aplicación.

Energía específica: Es un factor determinante en la autonomía del vehículo. Es la cantidad total de energía en watt-horas (Wh), que una batería puede almacenar por kilogramo de su masa a una razón de descarga específica.

Densidad de energía: Se refiere a la cantidad de energía que posee una batería con respecto a su tamaño. Si tienen mayor densidad de energía menor será su tamaño.

Densidad de potencia: Es un factor importante para el rendimiento del vehículo durante la aceleración. Indica la potencia por peso (W/kg) que es capaz de entregar en un estado de descarga específico [9].

Las baterías más populares en el mercado actualmente para esta aplicación son las de plomo-ácido, níquel-metal hidruro (NiMH), ion de litio y las de sal fundida (ZEBRA). La tabla 1.1 relaciona las principales características de cada una [9].

Tabla 1.1. Características de las principales baterías del mercado.

<i>Característica</i>	<i>Plomo-ácido</i>	<i>NiMH</i>	<i>Ion de litio</i>	<i>ZEBRA</i>
<i>Energía específica (Wh/kg)</i>	30-45	30-80	90-220	90-100
<i>Densidad de energía (Wh/L)</i>	60-75	140-300	280-400	160
<i>Potencia específica (Wh/kg)</i>	180	250-1000	600-3400	150
<i>Auto-descarga (%/mes)</i>	2-4	20-30	2-5	0
<i>Costo relativo (\$/kWh)</i>	150	500	700	270
<i>Eficiencia (%)</i>	85	80	93	75-85

La carga y descarga bajo diferentes condiciones de los elementos almacenadores en los vehículos eléctricos es muy frecuente, debido a las paradas y marchas en la operación normal de estos. La potencia promedio que se requiere de las fuentes es mucho menor que la potencia pico requerida para la aceleración y para cuando se sube una colina. La relación entre la potencia pico requerida y la potencia promedio puede ser mayor de 10:1. Por otra parte, la energía presente en la aceleración y la desaceleración es apenas dos tercios del total de energía en un ciclo de manejo de un auto [8]. Esto implica que es necesario realizar un diseño correcto para poder entregar los picos de potencia demandados.

Los ultracapacitores se caracterizan por tener una potencia específica mucho mayor que las baterías electroquímicas, mientras que una densidad de energía mucho menor. Su potencia específica puede llegar al orden de 3 kW/kg, mucho mayor que cualquier tipo de batería. Por su baja densidad de energía y la dependencia de la tensión con el estado de carga, es muy difícil utilizar estos dispositivos como la única fuente de potencia en un vehículo eléctrico. No obstante, tienen ciertas ventajas que pueden ser aprovechadas si se utiliza como una fuente de potencia auxiliar [8].

De esta manera surgen los sistemas de almacenamiento híbridos. Estos consisten en utilizar ambas fuentes de potencia una batería y un ultracapacitor, para aprovechar las ventajas de cada dispositivo. Para lograr esto los requerimientos de potencia y de energía deben ser desacoplados. Los elementos almacenadores se diseñan de manera más eficiente para utilizar sus ventajas. Los altos picos de potencia que se presentan en el sistema durante la aceleración o el frenado son cubiertos por el ultracapacitor. Esta estrategia permite la utilización de una batería más pequeña, de menor costo y que tenga menor cantidad de ciclos de carga/descarga, provocando una mayor eficiencia del sistema [8].

Los paneles solares son dispositivos que convierten la luz solar en energía eléctrica. Esta producción de energía tiene muchas ventajas ya que está disponible, es sostenible, renovable y limpia. Su utilización en vehículos eléctricos permite o bien entregar energía a un motor o cargar una batería que suplirá la demanda del motor. La utilización de estos dispositivos aumenta la autonomía del vehículo y disminuye el impacto medioambiental de los mismos [10].

A pesar de las ventajas, esta tecnología también tiene limitaciones. Las celdas fotovoltaicas actuales son muy ineficientes y para lograr generar toda la demanda de un vehículo eléctrico se necesitaría un área demasiado grande. Además, solo producen electricidad cuando incide la luz solar sobre ellos. Por esto, casi no existen vehículos solares, aunque se pueden utilizar como fuente de energía complementaria para aprovechar sus ventajas [10].

Además de las fuentes anteriormente mencionadas pueden existir otras fuentes o elementos almacenadores alternativos de energía como: las celdas de combustible, los volantes de inercia y los generadores termoeléctricos automotrices. Estos elementos no son tan comunes de encontrar en esta aplicación y no se tuvieron en cuenta para la presente investigación [8].

1.2. Sistemas de administración de energía

El sistema de administración de energía es el encargado de controlar el flujo de la potencia y la fuente más indicada para suplir la demanda de la carga en cada momento. No basta con incluir en el sistema las fuentes de energía con diferentes características para lograr un aprovechamiento de sus ventajas. Este precisamente es el objetivo de incluir un controlador de un nivel superior.

La supervisión de alto nivel tiene como propósito el funcionamiento correcto del sistema. Este controlador mejora el rendimiento del vehículo, ya que la eficiencia depende de los datos actuales y futuros. El gestor de energía toma decisiones teniendo en cuenta condiciones basadas en tiempo o eventos, actuando sobre el convertidor con el que interactúan las fuentes. Este controlador se puede basar en reglas o puede estar basado en un controlador óptimo [11].

El controlador basado en reglas es un sistema de control que se fundamenta en la experiencia de algún ingeniero, heurísticamente, o incluso por intuición. Este controlador se razona a partir de un ciclo predefinido de manejo. Esta forma de implementar los controladores es bastante sencilla y no requiere de tanto tiempo de diseño ni recursos en la programación. Sin embargo, la eficiencia del rendimiento y la robustez para ciclos de manejo desconocidos no puede ser garantizada [11].

Para atender los desafíos anteriores otras estrategias de control fueron desarrolladas para este controlador de nivel superior. El control óptimo está basado

en operaciones analíticas o numéricas, con las cuales es capaz de minimizar la función de costo. De esta manera se garantiza una mayor robustez del sistema ante ciclos de manejo desconocidos. No obstante, requiere de un mayor tiempo de diseño y complejidad computacional. La figura 1.2 muestra las estrategias de control que pueden sustentar el gestor de energía [11].

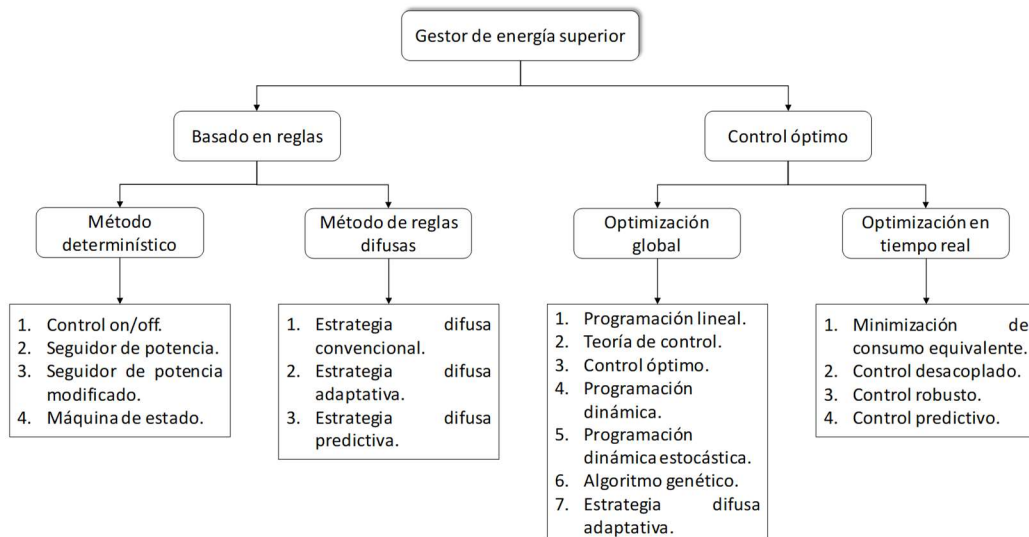


Figura 1.2. Clasificación de las estrategias de control utilizadas en el gestor de energía.

1.3. Sistemas de propulsión eléctricos

Otro elemento fundamental en los vehículos híbridos y eléctricos es el sistema de propulsión eléctrico. Este sistema consiste en una máquina eléctrica, un convertidor de potencia y un controlador electrónico. La máquina eléctrica convierte la energía eléctrica en mecánica para impulsar el auto, o viceversa, en el frenado genera electricidad para cargar los elementos almacenadores. El convertidor de potencia es utilizado para entregar la tensión y la corriente requerida por el motor. Mientras que el controlador electrónico gobierna el convertidor de potencia, al ser el encargado de proporcionar la señal de control para sus interruptores para lograr un torque y una velocidad correcta en el motor [8].

La selección de un sistema de propulsión depende de diversos factores como las expectativas del conductor, las restricciones del vehículo y las fuentes de energía disponibles. Las expectativas del conductor incluyen la aceleración, la velocidad máxima, la capacidad de subir colinas, el frenado y la autonomía. Las restricciones

del vehículo incluyen el peso del mismo, tipo y su carga útil. Las fuentes de energía se relacionan con la batería, el ultracapacitor, las celdas de combustible y las otras fuentes mencionadas en el apartado anterior [8].

Al contrario de las aplicaciones industriales, los motores utilizados en los vehículos eléctricos requieren de frecuentes paradas y marchas, altos índices de aceleración/desaceleración, alto torque para bajas velocidades, bajo torque para altas velocidades y un alto rango de operación. Es muy importante seleccionar correctamente el tipo de motor, con características adecuadas para esta aplicación. Por ejemplo, no es adecuado referirse a estos tan solo por los caballos de fuerza (hp); ya que estos varían con la tensión y la corriente, además los hp pico son mucho más altos que los que puede alcanzar un motor en su operación normal. Además, es confuso compararlos con los de combustión interna, ya que los motores eléctricos se caracterizan en condiciones de carga, mientras que los de combustión interna se caracterizan sin carga. Para la correcta identificación de un motor, se debe referir a este con un número de modelo [8]. A continuación, se hará referencia a los motores más comunes en los vehículos eléctricos.

Los motores de corriente directa consisten de un estator con campo estacionario y un rotor bobinado con un sistema de conmutación de escobillas. El campo en el estator generalmente es inducido por una bobina, aunque en máquinas pequeñas puede tener una excitación a través de imanes permanentes. El bobinado del estator puede estar conectado en serie o en paralelo con respecto al del rotor. Las ventajas principales de este tipo de motor es que es una tecnología bien establecida, confiable, barata y se puede controlar de manera simple y robusta. Sus limitaciones más importantes son una baja densidad de potencia comparada con tecnologías alternativas, alto costo de mantenimiento y una baja eficiencia [7].

Los motores de inducción o jaula de ardilla contienen un rotor conformado por barras conductoras longitudinales de aluminio o de cobre con surcos y conectados juntos en ambos extremos poniendo en cortocircuito los anillos que forman la jaula. El campo magnético en el estator rota a una velocidad mayor que la velocidad del rotor, induciendo una corriente en el rotor que produce el torque. Son motores de fácil construcción, baratos, requieren de poco mantenimiento y son confiables. Para

su aplicación en vehículos eléctricos se sacrifica la eficiencia en aras de tener un mayor rango de frecuencias de trabajo [7].

Los motores síncronos de imanes permanentes (PMSM, por sus siglas en inglés), se caracterizan por su constante magnetización del rotor. Los imanes permanentes en el rotor inducen un campo magnético sin necesidad de corrientes de excitación. Esta característica provoca que tengan una alta densidad de potencia, una alta eficiencia y poca necesidad de enfriamiento. El costo para obtener estas ventajas es un control más complejo ya que el campo de excitación no puede ser regulado [7].

Los motores de reluctancia variable han ganado atención debido a que son muy baratos. Su principal característica es que hace uso de los polos salientes del rotor. El torque es producido por la diferencia entre el eje directo y el eje de cuadratura, ya que el rotor carece de excitación. Otras ventajas son que su comportamiento no se modifica con la temperatura a la cual opera y que es fácil de implementar un control sin sensores. Su principal limitación es que posee un elevado rizo en el torque, lo que provoca un mayor ruido y mayores vibraciones. Estos motores todavía no han sido utilizados en vehículos eléctricos comerciales, pero han despertado un gran interés ya que se han reportado prototipos exitosos. Además, sí han sido utilizados para bicicletas eléctricas [7].

Los motores síncronos con escobillas presentan una bobina en el rotor conectada a una fuente de tensión estacionaria a través de un anillo giratorio de acero. El campo magnético en el rotor es inducido por la corriente de campo que pasa a través de la bobina del rotor. La principal ventaja de estos motores es la posibilidad de regular el enlace de flujo magnético. La reducción del enlace de flujo magnético permite la operación a muy alta velocidad sin el debilitamiento del campo. Además, ofrece un alto torque de arranque y su control es simple y robusto. Como principal limitación se puede decir que cuando trabaja a carga completa presenta una baja eficiencia [7].

En [7] se puede apreciar las máquinas empleadas en los autos comerciales hasta 2012. Se observa que en los autos posteriores al 2000, más de la mitad presentan motores de inducción, seguido por los motores de imanes permanentes que

representan aproximadamente un 25 % y en menor medida también están presentes los motores de corriente directa y los síncronos con escobillas.

Para la excitación de estos motores, es necesario un convertidor de potencia adecuado. En dependencia de las características del motor se utilizará algún convertidor en específico. Como se mencionó anteriormente la mayoría de los motores utilizados en la actualidad para este tipo de aplicación son de corriente alterna; por tanto, el convertidor más común en los sistemas de propulsión es el inversor. Las tendencias a futuro de estos convertidores en los vehículos eléctricos incluyen aumentar su potencia y eficiencia, así como disminuir el peso y el volumen. Las mejoras de estos dispositivos dependen de avances en los materiales semiconductores, innovaciones en la tecnología de encapsulado, nuevos diseños para los sistemas de enfriamiento y en el perfeccionamiento en las topologías de los convertidores [12].

El último elemento que conforma el sistema de propulsión eléctrico es el circuito de control de velocidad. La estrategia de control a utilizar depende de la máquina eléctrica utilizada. En los motores de corriente directa se controla la velocidad del motor actuando sobre la tensión en la armadura o debilitando el campo magnético. La independencia de estas dos variables permite un control más sencillo y flexible. En los motores de corriente alterna, el método más común para modificar la característica de torque-velocidad de una máquina específica es el control volt/Hertz. Utilizando esta estrategia se actúa sobre dos variables simultáneamente, la frecuencia de conmutación y la amplitud de la tensión de entrada del inversor. De esta manera se mantiene el flujo magnético en la banda de aire constante. Esta estrategia de control es muy sencilla y barata de implementar. Sin embargo, no proporciona un control de velocidad preciso, no tiene un buen desempeño para altas velocidades y no propicia una alta eficiencia en los motores. Estos problemas se resuelven utilizando el control vectorial. El objetivo al utilizar esta estrategia de control es mantener el campo del estator perpendicular al campo del rotor, para producir el máximo torque, como en los motores de corriente directa. No obstante, este controlador es complicado y requiere un mayor tiempo de diseño. Además, debido a los sensores necesarios es caro de implementar [12].

1.4. Topologías de CD-CD

Las fuentes de energía interactúan con el sistema de propulsión eléctrico a través de un convertidor CD-CD. Cuando se utiliza un sistema híbrido de energía es necesario que este convertidor sea de múltiples entradas. Existen diferentes topologías que se han propuesto en la literatura para este convertidor.

En [13] se propone un convertidor de múltiples entradas (MIPEC) para su aplicación en vehículos eléctricos. Este es un convertidor modular y bidireccional capaz de elevar el nivel de la tensión en un sentido y reducirlo en el otro. Además, no es posible realizar una transferencia directa entre las fuentes de alimentación. Se consideraron tres fuentes por estos autores: una celda de combustible, un ultracapacitor y una batería. Requiere de un inductor y dos interruptores por entrada para su implementación. Para tres entradas necesita de 6 interruptores y tres inductores.

En la figura 1.3 (a) se muestra el convertidor base, mientras que en la figura 1.3 (b) se muestra cómo quedaría el convertidor para tres entradas.

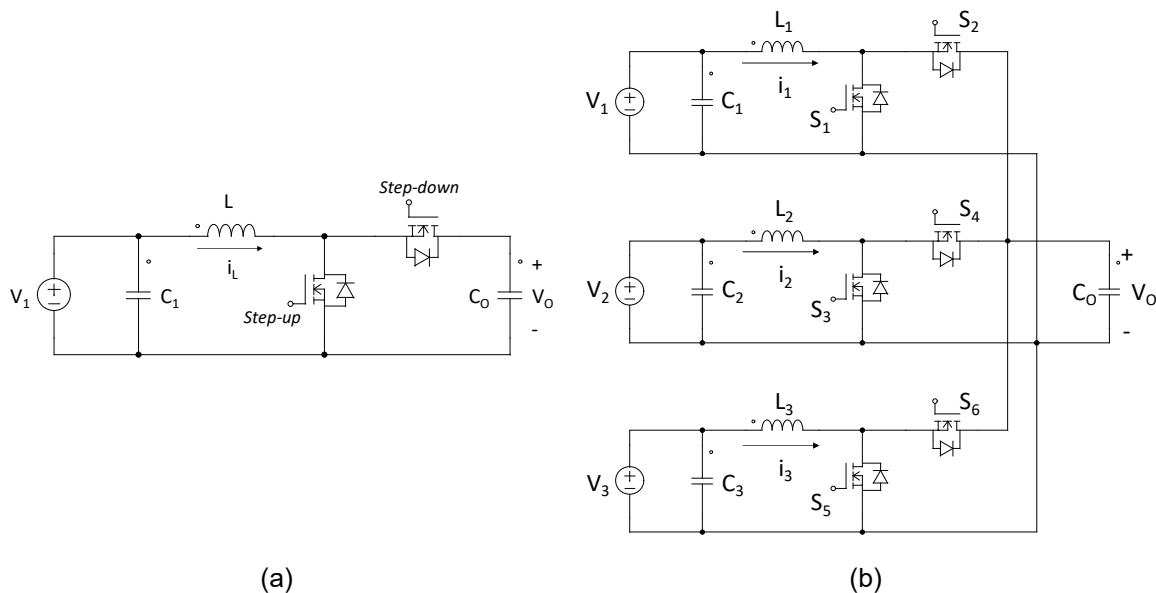


Figura 1.3. Convertidor MIPEC, (a) convertidor base, (b) convertidor resultante para tres entradas.

Los modos de operación del convertidor base se sustentan en los convertidores reductor y elevador. Se puede elevar el nivel de la tensión desde la fuente hacia el bus y reducir el nivel de tensión en el sentido inverso. La tabla 1.2 muestra los modos de operación posibles para una entrada.

Tabla 1.2. Modos de operación del MIPEC.

<i>Transferencia</i>	<i>Comportamiento</i>	t_1	t_2
<i>Fuente -> Bus</i>	Elevador	S_1	D_2
<i>Bus -> Fuente</i>	Reductor	S_2	D_1

t_1, t_2 : Tiempos definidos que suman el período de la señal de control.

El control de las variables de estado del convertidor se logra mediante el control clásico. Se propone una estrategia de doble lazo, con la tensión como lazo externo y la corriente como lazo interno. Con este objetivo, se obtiene el modelo promediado del convertidor y se obtiene la función de transferencia del controlador mediante un diagrama de bode.

En [14] se presenta una topología considerando una batería y un ultracapacitor. Este convertidor permite el flujo bidireccional de energía y tiene la capacidad de reducir o elevar el nivel de tensión en cualquier sentido. Además, tiene un bajo número de componentes. En detrimento de este convertidor se puede señalar que no permite la transferencia de energía directa entre las fuentes. La figura 1.4 muestra el convertidor en cuestión.

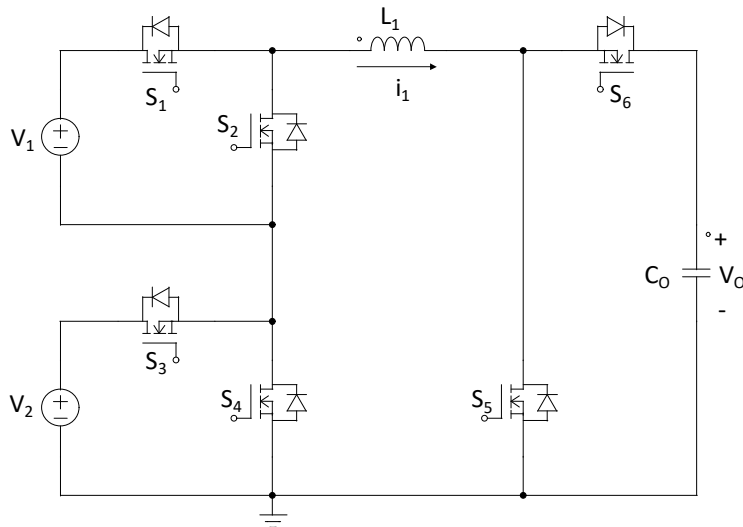


Figura 1.4. Convertidor de múltiples entradas propuesto en [14].

Este convertidor permite una gran cantidad de modos de operación, por lo que es muy versátil. Estos modos se muestran en la tabla 1.3. Además, permite realizar las transferencias de fuente a bus reduciendo el nivel de tensión, o del bus hacia las fuentes elevando el nivel de tensión.

Tabla 1.3. Modos de operación del convertidor propuesto en [14].

<i>Transferencia</i>	<i>Comportamiento</i>	t_1	t_2
$V_1 \rightarrow Bus$	Elevador	S_1, D_4 y S_5	S_1, D_4 y D_6
$V_2 \rightarrow Bus$	Elevador	D_2, S_3 y S_5	D_2, S_3 y D_6
$V_1, V_2 \rightarrow Bus$	Elevador	S_1, S_3 y S_5	S_1, S_3 y D_6
$Bus \rightarrow V_1$	Reductor	D_1, S_4 y S_6	D_1, S_4 y D_5
$Bus \rightarrow V_2$	Reductor	S_2, D_3 y S_6	S_2, D_3 y D_5
$Bus \rightarrow V_1, V_2$	Reductor	D_1, D_3 y S_6	D_1, D_3 y D_5

En este artículo no se desarrolló un gestor de energía, por lo que la validación del funcionamiento del convertidor tuvo que realizarse para cada transferencia por separado. Para el control de las variables de estado se realizó un control en lazo abierto definiendo el ciclo útil necesario para la señal de control del interruptor en cuestión, para cada caso.

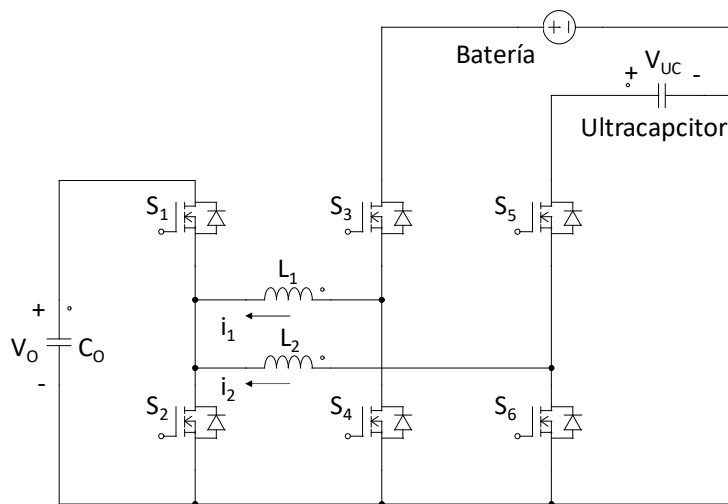


Figura 1.5. Convertidor de múltiples entradas para un sistema híbrido de energía.

En [15] se propone un nuevo convertidor de múltiples entradas bidireccional, para interactuar dos o más fuentes de corriente directa de diferentes niveles de tensión. Se presenta con un sistema híbrido de energía compuesto de una batería y un ultracapacitor. Este convertidor puede trabajar elevando o reduciendo el nivel de tensión en cualquier sentido de flujo de potencia. Es posible controlar independientemente la potencia demandada a cada fuente y se pueden realizar transferencias de energía directamente entre las fuentes. Requiere de un inductor

y dos interruptores por entrada más dos interruptores. La figura 1.5 muestra el convertidor en cuestión.

Este convertidor es más versátil, ya que cualquier elemento del sistema puede actuar como fuente o destino para una conversión de energía. Además, cualquier conversión puede ser lograda elevando el nivel de tensión de entrada o reduciéndolo. La tabla 1.4 muestra los modos de operación utilizados. Además, existen otros modos de operación que no son necesarios para la aplicación, pero pueden ser útiles en otro contexto. Un ejemplo de esto son las transferencias de las fuentes al bus reduciendo el nivel de tensión.

Tabla 1.4. Modos de operación del convertidor.

<i>Transferencia</i>	<i>Comportamiento</i>	t_1	t_2
<i>Batería -> Bus</i>	Elevador	S ₃ y S ₂	S ₃ y D ₁
<i>Ultracapacitor -> Bus</i>	Elevador	S ₅ y S ₂	S ₅ y D ₁
<i>Bus -> Batería</i>	Reductor	S ₁ y D ₃	D ₂ y D ₃
<i>Bus -> Ultracapacitor</i>	Reductor	S ₁ y D ₅	D ₂ y D ₅
<i>Batería -> Ultracapacitor</i>	Reductor	S ₃ y D ₅	D ₄ y D ₅
<i>Ultracapacitor -> Batería</i>	Elevador	S ₄ y S ₅	S ₅ y D ₃

Para lograr el control de las variables de estado del convertidor se realizó un controlador para cada conversión. Todos los controladores diseñados son de un solo lazo, aunque en dependencia de la conversión la variable controlada puede ser la corriente o la tensión.

En [16] se presenta otro convertidor de varias entradas para su utilización en vehículos eléctricos. Este es un convertidor modular basado en el MIPEC, pero con menor cantidad de interruptores. Permite elevar y reducir el nivel de la tensión desde la fuente hacia el bus y solo reducirlo en el sentido contrario. Como limitación se puede destacar que no es posible la conversión de energía directamente entre las entradas. Necesita un interruptor, un diodo y un inductor por entrada más dos interruptores. La figura 1.6 muestra el convertidor propuesto con dos entradas.

Este convertidor es muy parecido al MIPEC en cuanto a los modos de operación. Al ser modular, se puede analizar el modo de operación para una entrada y extenderlo a las otras. La tabla 1.5 muestra los modos de operación utilizados.

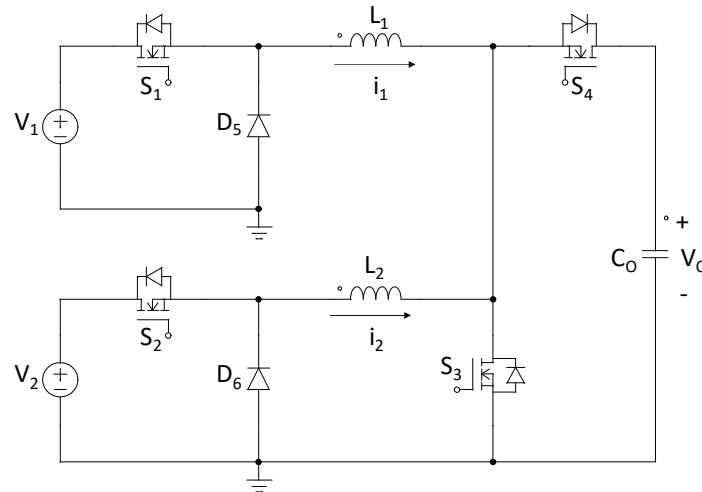


Figura 1.6. Convertidor de dos entradas propuesto en [15].

Tabla 1.5. Modos de operación del convertidor presentado en [15].

<i>Transferencia</i>	<i>Comportamiento</i>	t_1	t_2
<i>Fuente -> Bus</i>	Elevador	S_1 y S_3	S_1 y D_4
<i>Bus -> Fuente</i>	Reductor	S_4 y D_1	D_3 y D_1

Para validar el funcionamiento del convertidor se propuso un sistema híbrido de energía con un ultracapacitor y una batería. Para el control de las variables de estado del convertidor se implementaron dos modos, carga de las fuentes y descarga de las fuentes. En ambos modos se logra la regulación de la corriente y la tensión a través de controladores PI. Se decide entre un modo u otro atendiendo a una histéresis en V_0 .

Para controlar el nivel de potencia entregado por cada fuente se diseñó un sistema de administración de energía basado en lógica difusa, presentado en [17]. Si la salida necesita energía, la potencia que entrega la batería es determinada por el controlador difuso, teniendo en cuenta el estado de carga del ultracapacitor. El valor de la tensión del ultracapacitor debe ser regulado de manera que pueda suministrar la potencia necesaria y acepte la energía generada en el frenado. Con esta estrategia se suavizan los picos de potencia demandados a la batería y se aumenta su vida útil en un 55 %.

En [18] se introduce una topología de múltiples entradas que presenta una mayor ganancia comparada con otras existentes, lográndose con cuatro interruptores y

cinco diodos para tres entradas. Solo tiene la capacidad de elevar el nivel de la tensión desde las fuentes hacia el bus y no es bidireccional. Este convertidor no es modular y considera una celda de combustible, un panel solar y una batería como fuentes de energía. El convertidor tiene la capacidad de suministrar la energía necesaria en caso de que una o dos fuentes se encuentren descargadas. La figura 1.7 muestra el convertidor desarrollado.

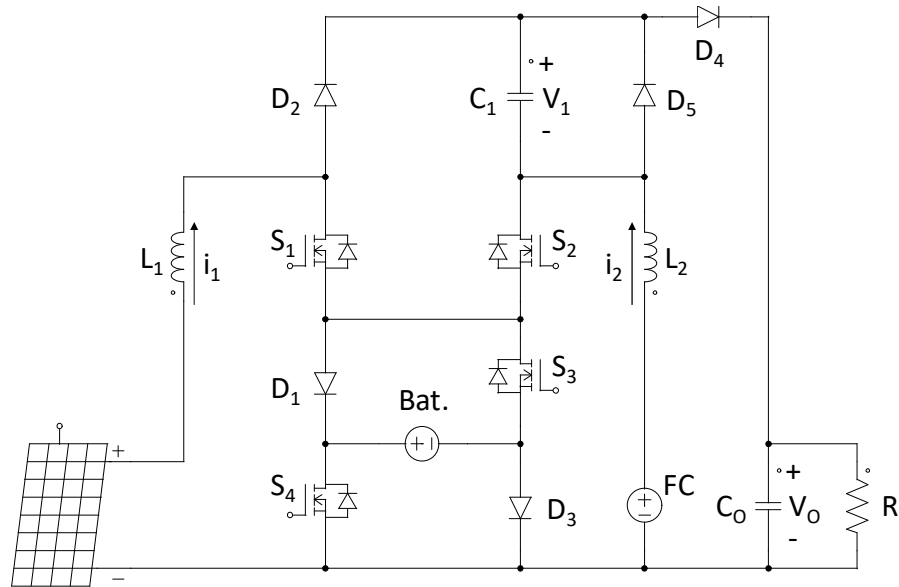


Figura 1.7. Convertidor de múltiples entradas propuesto en [18].

Este convertidor posee tres estados de operación, con diferentes modos que permiten completar una transferencia. La tabla 1.6 muestra dichos estados.

Tabla 1.6. Modos de operación del convertidor propuesto en [18].

Transferencia	t_1	t_2	t_3	t_4
<i>PV, FC -> Bus</i> (Bat. no se usa)	S ₁ , S ₂ , S ₃ y D ₃	S ₂ , S ₃ , D ₂ y D ₃	S ₁ , S ₃ , D ₃ y D ₄	-
<i>PV, FC, Bat. -> Bus</i>	S ₁ , S ₂ , S ₃ y S ₄	S ₁ , S ₂ , S ₄ y D ₁	S ₂ , S ₄ , D ₁ y D ₂	S ₁ , S ₄ , D ₁ y D ₄
<i>PV, FC -> Bus</i> (Bat. se carga)	S ₁ , S ₂ , S ₄ y D ₁	S ₂ , S ₄ , D ₁ y D ₂	S ₁ , S ₂ , D ₁ y D ₃	S ₁ , S ₄ , D ₁ y D ₄

El control de las variables de estado del convertidor se logra analizando cada transferencia por separado. Para cada una se obtiene el modelo promediado del convertidor y a través de un diagrama de bode se obtiene la función transferencial

del controlador requerido. Además, se desacoplan las variables de estado para lograr su control independiente.

La administración de la energía en el sistema se logra con un controlador basado en reglas. Las prioridades de este controlador son, que se le suministre la energía necesaria al motor, que el panel y la celda de combustible trabajen en su región óptima y que el nivel de tensión de la batería siempre se encuentre en una región definida.

Como se ha mencionado anteriormente el control de las variables de estado es clave en los convertidores de potencia conmutados. Para obtener un modelo de estos convertidores es preciso realizar un modelado promediado atendiendo al estado del interruptor. Con este modelo se pueden aplicar las técnicas de control clásico. Los controladores PID tienen como desventaja que están sintonizados para un punto de operación. Si se tienen variaciones en los parámetros del convertidor como en la tensión de entrada o la corriente entregada en la salida no tiene un buen rendimiento. Por otra parte, en el control por modos deslizantes no se diseña para un punto de operación, sino que se diseña partiendo del modelo del sistema. De esta manera, se obtiene un controlador más robusto ante los cambios en los parámetros del sistema. No obstante, este controlador también tiene sus limitaciones como: la limitación de la frecuencia necesaria para la implementación física del controlador, puede existir un error en la variable controlada en estado estacionario y es más difícil sintonizar los parámetros del controlador ya que estos influyen simultáneamente en la dinámica del sistema y en el error de estado estacionario [19].

La tabla 1.7 muestra un resumen de las características de los convertidores revisados anteriormente. De esta manera se pueden apreciar mejor las ventajas y desventajas de cada topología.

Tabla 1.7. Comparación de los convertidores existentes.

<i>Convertidor</i>	<i>Bidireccional</i>	<i>Transferencia de energía directa entre entradas</i>	<i>Fuentes consideradas</i>	<i>Dispositivos necesarios para tres entradas</i>
[13]	Sí	No	V ₁ , V ₂ y V ₃ (Modular)	3 inductores 6 interruptores
[14]	Sí	No	Bat. y UC (Modular)	1 inductor 8 interruptores
[15]	Sí	Sí	Bat. y UC (Modular)	3 inductores 8 interruptores
[16]	Sí	No	V ₁ y V ₂ (Modular)	3 inductores 5 interruptores 3 diodos
[18]	No	Sí	FC, PV y Bat. (No modular)	2 inductores 4 interruptores 5 diodos

Capítulo 2

Análisis y diseño del convertidor propuesto

En el presente capítulo se presenta el convertidor propuesto. Se resaltan sus características y se compara con los convertidores presentes en la literatura. Se analizan sus modos de operación y el dimensionamiento de sus elementos almacenadores. Se diseña la estrategia de control del sistema para regular las variables de estado, alcanzar los MPPT's requeridos y establecer la transferencia adecuada en cada momento. Finalmente, se presentó un modelo de batería ión-litio desarrollado.

2.1. Propuesta de convertidor

Luego de realizar un análisis de los convertidores CD-CD de múltiples entradas presentes en la literatura se propuso el convertidor mostrado en la figura 2.1. La figura 2.2 muestra el diagrama de transferencias de energía entre los elementos del sistema. En este diagrama se puede apreciar cómo es la interacción entre las fuentes a través de los inductores presentes en el sistema. Donde PV es el panel solar, UC el ultracapacitor, Bat la batería, M/G la máquina eléctrica y L_1 , L_2 los inductores del convertidor.

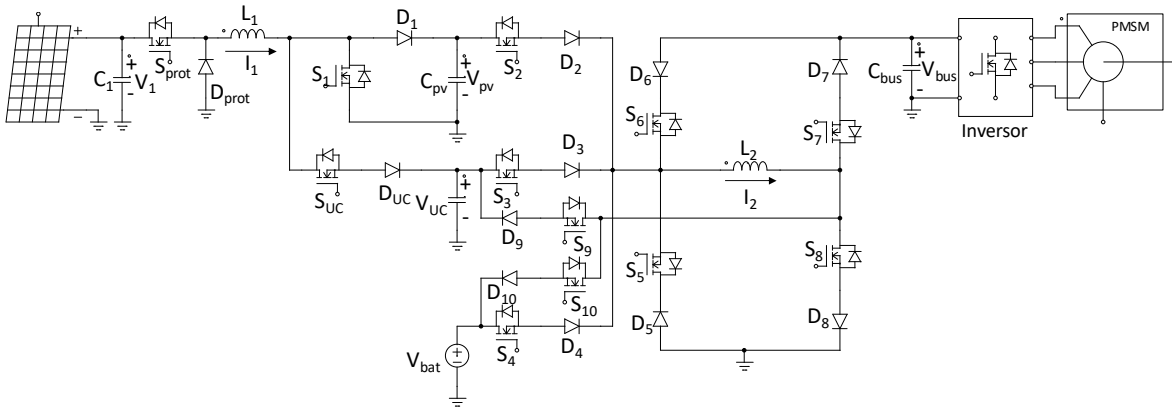


Figura 2.1. Convertidor de múltiples entradas propuesto.

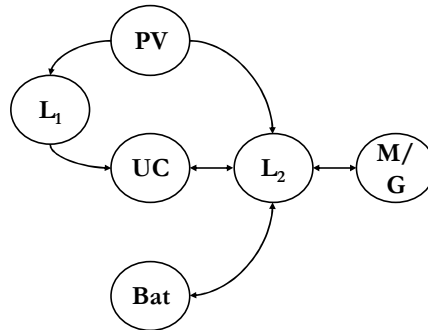


Figura 2.2. Diagrama de transferencias de energía en el convertidor.

El convertidor propuesto puede ser dividido en dos etapas para un mejor análisis. La figura 2.3 muestra el convertidor asociado al panel. Este convertidor se basa en un elevador. Como posee una corriente no pulsante en su entrada permite el seguimiento del punto de máxima transferencia de potencia (MPPT) de manera eficiente. Al dedicar un convertidor para el MPPT se facilita el control del sistema y aumenta el aprovechamiento de la energía en el mismo. El interruptor S_{UC} le da

mayor flexibilidad al sistema, permitiendo el seguimiento del MPPT cuando el convertidor de múltiples entradas está dedicado a otra función.

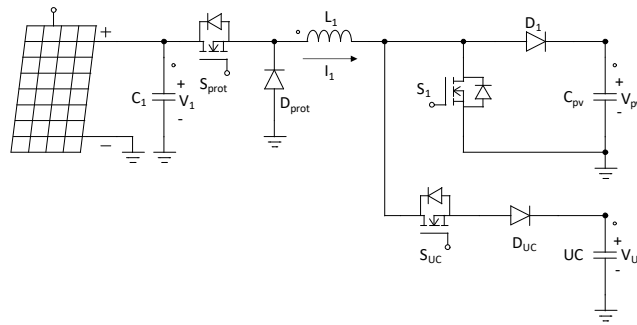


Figura 2.3. Convertidor asociado al panel solar.

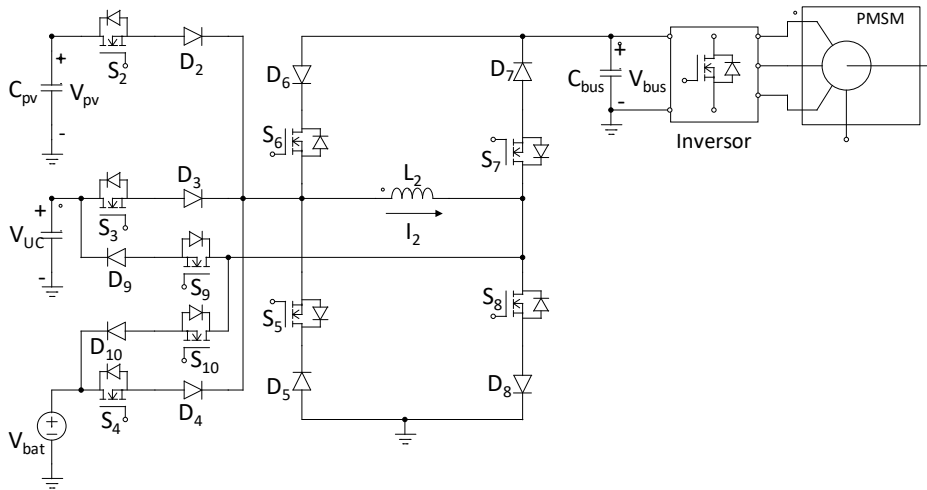


Figura 2.4. Convertidor de múltiples entradas.

La figura 2.4 muestra el convertidor de múltiples entradas. Este convertidor es muy flexible para interactuar con entradas/salidas de diferentes niveles de tensión. Es modular, por lo que puede extenderse a la cantidad de fuentes necesarias según la aplicación. Es bidireccional, por tanto, tiene la capacidad de realizar transferencias de potencia en cualquier sentido. Cualquiera de los elementos del sistema puede ser fuente o destino para una transferencia. Cualquier transferencia puede lograrse reduciendo o elevando el nivel de tensión de la fuente. Es posible el control del flujo de potencia en las entradas de manera independiente. Es simple de diseñar, implementar y controlar. Necesita de dos interruptores por entrada, más cuatro interruptores y un inductor. Es necesario especificar que para esta aplicación se

pueda prescindir de los elementos S_5 y D_8 . No obstante, este convertidor está pensado para interactuar con la red eléctrica y en esta aplicación sí serán necesarios, por lo que se decidió incluirlos.

2.2. Modos de operación

Los modos de operación definen la combinación de interruptores necesaria para lograr una transferencia. Permite identificar fácilmente el comportamiento del convertidor, así como el comportamiento de las variables de estado del mismo. A continuación, se presentarán los modos de operación del convertidor asociado al panel solar y del convertidor de múltiples entradas.

El convertidor asociado al panel solar se basa en un convertidor elevador. Los modos de operación utilizados en esta aplicación están condicionados por los niveles de tensión existentes en el panel solar y el ultracapacitor. La figura 2.5 muestra los modos de operación cuando $V_{UC} > V_1$. Este y el otro caso se resumen en la tabla 2.1. Es necesario aclarar que en la primera conversión los elementos V_{pv} y V_{UC} van a mantenerse con el mismo nivel de tensión, ya que el diodo va a conducir la corriente mientras $V_{pv} < V_{UC}$.

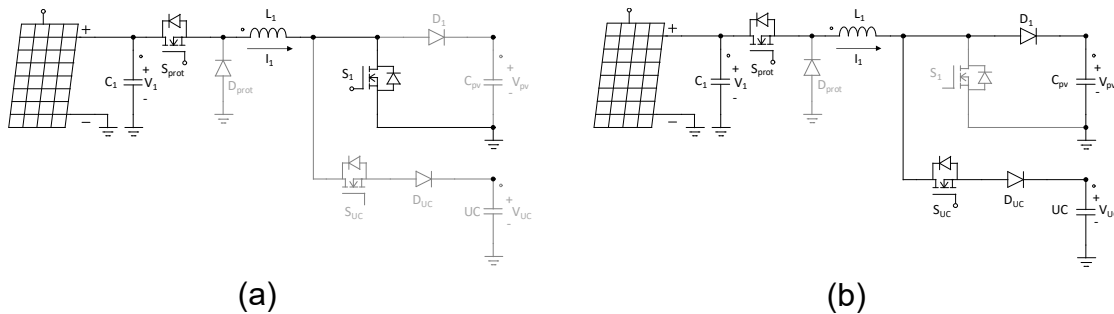


Figura 2.5. Modos de operación del convertidor asociado al panel solar cuando $V_{UC} > V_1$, (a) modo 1A, (b) modo 1B.

Tabla 2.1. Modos de operación utilizados en el convertidor asociado al panel solar.

Conversión	Modo	Interruptores encendidos	L_1	C_{pv}	UC
1. PV -> C_{pv}, UC	1A	S_1	+	=	=
	1B	S_{UC}, D_1	-	+	+
2. PV -> C_{pv}, UC	2A	S_{UC}	+	=	+
	2B	D_1	-	+	=

Los modos de operación utilizados en el convertidor de múltiples entradas emulan el comportamiento de un convertidor reductor o un elevador. La figura 2.6 muestra los modos de operación para una conversión desde la batería hacia el capacitor C_{bus} . En esta aplicación se desea que para esta transferencia se eleve el nivel de tensión de la fuente, pero es posible reducirlo con la combinación adecuada de interruptores. Este y los otros casos se resumen en la tabla 2.2.

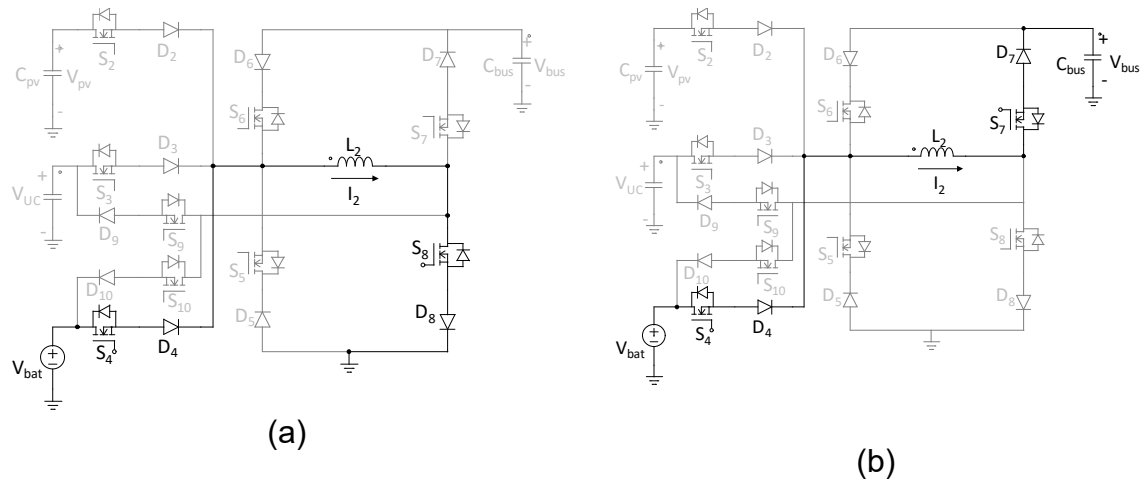


Figura 2.6. Modos de operación para la transferencia desde la batería hacia el capacitor C_{bus} , (a) modo 3A, (b) modo 3B.

Tabla 2.2. Modos de operación del convertidor de múltiples entradas.

Conversión	Modo	Interruptores encendidos	L_2	C_{pv}	UC	Bat	Bus
3. Bat. -> Bus	3A	S ₄ , S ₈	+	=	=	-	=
	3B	S ₄ , S ₇	-	=	=	-	+
4. UC -> Bus	4A	S ₃ , S ₈	+	=	-	=	=
	4B	S ₃ , S ₇	-	=	-	=	+
5. PV -> Bus	5A	S ₂ , S ₈	+	-	=	=	=
	5B	S ₂ , S ₇	-	-	=	=	+
6. PV -> UC	6A	S ₂ , S ₈	+	-	=	=	=
	6B	S ₂ , S ₉	-	-	+	=	=
7. PV -> Bat.	7A	S ₂ , S ₈	+	-	=	=	=
	7B	S ₂ , S ₁₀	-	-	=	+	=
8. Bat. -> UC	8A	S ₄ , S ₉	+	=	+	-	=
	8B	S ₅ , S ₉	-	=	+	=	=
9. Bus -> Bat.	9A	S ₆ , S ₁₀	+	=	=	+	-
	9B	S ₅ , S ₁₀	-	=	=	+	=
10. Bus -> UC	10A	S ₆ , S ₉	+	=	+	=	-
	10B	S ₅ , S ₉	-	=	+	=	=

2.3. Dimensionamiento de los elementos almacenadores

Luego de tener definida la topología a utilizar, es preciso calcular el tamaño de los elementos almacenadores. En el convertidor asociado al panel solar los elementos en cuestión son el inductor L_1 y el capacitor C_{pv} . Para el cálculo de estos elementos se siguió el procedimiento descrito en [20]. Las ecuaciones (1) y (2) rigen el dimensionamiento de los elementos de este convertidor.

$$L_1 = \frac{D \cdot (1-D)^2 \cdot V_0^2}{2 \cdot f \cdot P} \quad (1)$$

$$C_{pv} = \frac{D \cdot P}{V_0^2 \cdot \left(\frac{\Delta V_0}{V_0} \right) \cdot f} \quad (2)$$

Donde D es el ciclo útil, P la potencia de salida, f la frecuencia de conmutación, V_0 la tensión de salida y ΔV_0 el rizo permitido en la tensión de salida. Para esta aplicación se diseña con una tensión de salida del panel solar (V_1) de 25 V, una tensión de salida (V_{pv}) de 50 V, un rizo permitido de 10 V, un ciclo útil de 0.5, la potencia de salida de 150 W y la frecuencia de conmutación de 50 kHz. Sustituyendo estos valores en las ecuaciones (1) y (2), se obtiene que el inductor L_1 debe ser mayor de 20.83 μH y el capacitor C_{pv} debe ser mayor de 3 μF .

Por otra parte, los dispositivos que se necesitan dimensionar en el convertidor de múltiples entradas son el inductor L_2 y el capacitor C_{bus} . Para calcular el tamaño de estos elementos primero se identifica qué convertidor se desea emular con cada transferencia. Para los casos donde se requiera un convertidor reductor se sigue el procedimiento descrito en [21], mientras que los casos donde se requiera un convertidor elevador se sigue el procedimiento descrito en [22]. Finalmente se comparan todos los valores obtenidos y se selecciona el caso más crítico. Las ecuaciones (3) y (4), se utilizan para calcular los elementos de la etapa de potencia de un convertidor reductor, mientras que las ecuaciones (5) y (6) se utilizan en el caso de un convertidor elevador.

$$L_2 = \frac{V_0 \cdot (V_{in} - V_0)}{\Delta I_L \cdot f \cdot V_{in}} \quad (3)$$

$$C_{bus} = \frac{\Delta I_L}{8 \cdot f \cdot \Delta V_0} \quad (4)$$

$$L_2 = \frac{V_{in} * (V_O - V_{in})}{\Delta I_L * f * V_O} \quad (5)$$

$$C_{bus} = \frac{I_O * D}{f * \Delta V_O} \quad (6)$$

Donde V_O es la tensión de salida, V_{in} es la tensión de entrada, ΔI_L es el rizo de corriente permitido en el inductor, f es la frecuencia de conmutación, ΔV_O es el rizo de tensión permitido en el capacitor, I_O es la corriente de salida y D es el ciclo útil. La tabla 2.3 muestra los datos considerados para la obtención del tamaño de los elementos almacenadores.

Tabla 2.3. Obtención del tamaño de los elementos almacenadores del convertidor.

<i>Transferencia</i>	<i>Comportamiento</i>	V_O [V]	V_{in} [V]	ΔI_L [A]	ΔV_O [V]	I_O [A]	D	f [kHz]	L_2 [mH]	C_{bus} [μF]
3. <i>Bat. -> Bus</i>	Elevador	450	140	0.5	1	10	0.69	50	3.86	138
4. <i>UC -> Bus</i>	Elevador	450	125	0.5	1	10	0.72	50	3.61	144
5. <i>PV -> Bus</i>	Elevador	450	50	1	1	10	0.89	50	0.89	178
6. <i>PV -> UC</i>	Elevador	125	50	1	-	-	-	50	0.6	-
7. <i>PV -> Bat.</i>	Elevador	140	50	1	-	-	-	50	0.64	-
8. <i>Bat. -> UC</i>	Reductor	125	140	1	-	-	-	50	0.27	-
9. <i>Bus -> Bat.</i>	Reductor	140	450	1	-	-	-	50	1.93	-
10. <i>Bus -> UC</i>	Reductor	125	450	1	-	-	-	50	1.81	-

Del análisis de la tabla 2.3 se puede concluir que el inductor L_2 debe tener una inductancia mayor de 3.86 mH, mientras que el capacitor C_{bus} debe tener un valor superior a 178 μF.

2.4. Estrategia de control

El diagrama de bloques del controlador diseñado para esta aplicación se puede apreciar en la figura 2.7. Para el control de la corriente I_2 se utiliza el control por modos deslizantes (SMC, por sus siglas en inglés). Se aprovecha la robustez de este método de regulación ante las variaciones de los parámetros del convertidor, obligatorias en esta aplicación debido a los cambios de transferencia. Un controlador on-off es diseñado para la regulación de la tensión del capacitor C_{bus} . Esto es posible, ya que el inversor trifásico que gobierna al motor no requiere de un valor exacto en la tensión de entrada. Además, son necesarios dos algoritmos de MPPT, uno para el panel solar y otro para cuando la máquina eléctrica funciona como generador debido al pedaleo del usuario. La salida de estos bloques, en

conjunto con otros sensores del convertidor y el vehículo, son las entradas del gestor de energía. Este bloque se basa en reglas (*if-else*) para imponer la transferencia adecuada en cada caso. Finalmente, con el código de la transferencia y la señal de control del SMC un decodificador se encarga de establecer el estado de cada interruptor.

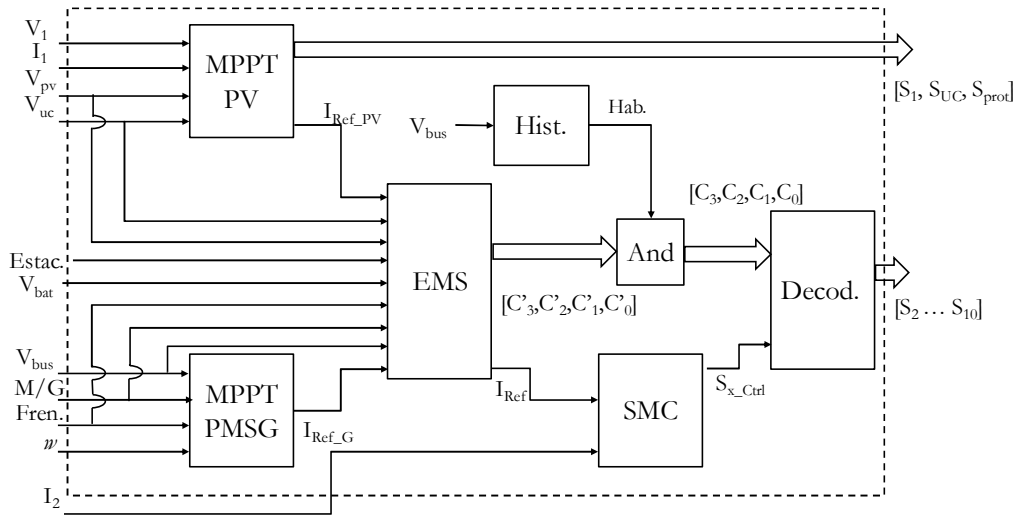


Figura 2.7. Diagrama en bloques del controlador.

2.4.1. Control por modos deslizantes para la corriente I_2

El control por modos deslizantes se diseña partiendo del modelo del sistema. De esta manera, se obtiene un controlador más robusto ante los cambios en los parámetros del mismo. Eso significa, para esta aplicación, que al modificar la tensión de entrada por cambiar de fuente de energía no se afecta la calidad de la respuesta en la variable controlada. Otra ventaja de utilizar esta estrategia de control es que el parámetro del controlador, cuando se tiene solamente el lazo de corriente, puede ser el mismo tanto para el convertidor reductor como para el elevador. En la tabla 2.4 se demuestra dicha afirmación.

De esta manera queda demostrado que con el mismo parámetro se puede controlar la corriente en ambos convertidores. Sería tarea del gestor de energía establecer la corriente de referencia adecuada en cada momento y tarea del decodificador enviar la señal de control al interruptor deseado. El circuito diseñado se muestra en la figura 2.8. A la salida del controlador se utiliza un limitador de frecuencia para evitar conmutaciones muy seguidas en los interruptores.

Tabla 2.4. Demostración de la homogeneidad del parámetro del controlador teniendo en cuenta solo un lazo de corriente.

Acción	Convertidor reductor	Convertidor elevador
Obtener modelo	$\begin{bmatrix} \dot{i}_L \\ \dot{v}_C \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & -1/L \\ 1/C & -1/RC \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_L \\ v_C \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} u/L \\ 0 \end{bmatrix} V_{in}$	$\begin{bmatrix} \dot{i}_L \\ \dot{v}_C \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & u-1/L \\ 1-u/C & -1/RC \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_L \\ v_C \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 1/L \\ 0 \end{bmatrix} V_{in}$
Proponer la superficie deslizante	$\sigma = S(i_L - i_{REF})$ $u = \begin{cases} 1 & \text{si } \sigma < 0 \\ 0 & \text{si } \sigma > 0 \end{cases}$	$\sigma = S(i_L - i_{REF})$ $u = \begin{cases} 1 & \text{si } \sigma < 0 \\ 0 & \text{si } \sigma > 0 \end{cases}$
Obtener la derivada de la superficie deslizante	$\dot{\sigma} = S * \left(-\frac{v_C}{L} + \frac{u * V_{in}}{L} \right)$	$\dot{\sigma} = S * \left(\frac{(u-1)v_C}{L} + \frac{V_{in}}{L} \right)$
Verificar condición de existencia ($\sigma > 0$)	$\dot{\sigma} = S * \left(-\frac{v_C}{L} \right) = S * \text{Número negativo}$	$\dot{\sigma} = S * \left(\frac{V_{in} - v_C}{L} \right) = S * \text{Número negativo}$
Verificar condición de existencia ($\sigma < 0$)	$\dot{\sigma} = S * \left(\frac{V_{in} - v_C}{L} \right) = S * \text{Número positivo}$	$\dot{\sigma} = S * \left(\frac{V_{in}}{L} \right) = S * \text{Número positivo}$
Proponer signo de parámetro S para que $\sigma * \dot{\sigma} < 0$	S debe ser positivo	S debe ser positivo

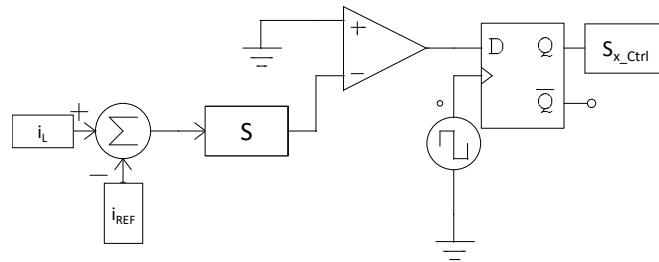


Figura 2.8. Circuito del SMC.

Control on-off para la tensión V_{bus}

Además de la corriente I_2 , es necesario regular la tensión en el capacitor C_{bus} . Esta variable no necesita de un control exacto, ya que el inversor trifásico puede trabajar con un rango amplio de tensión de entrada. Por esta razón y por su simplicidad, se implementó un controlador basado en histéresis. Si la tensión cae de los 400 V se habilita la entrada de corriente, hasta que supere los 500 V, momento en el que se deshabilita. En la figura 2.9 se muestra el diagrama de bloques de este controlador y en la figura 2.10 se muestra el diagrama de flujo del programa que permite la histéresis deseada.

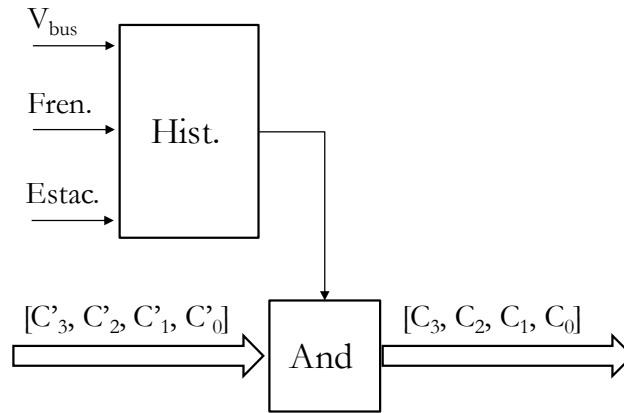


Figura 2.9. Diagrama de bloques del controlador on-off.

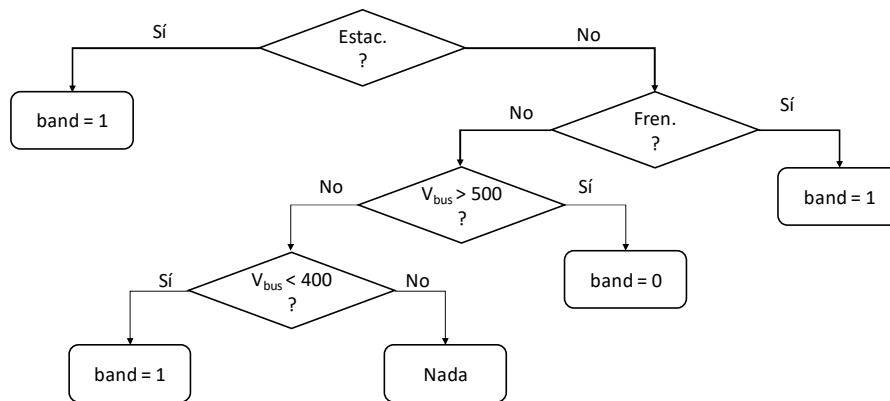


Figura 2.10. Diagrama de flujo del controlador on-off.

2.4.2. Algoritmo del MPPT en el panel solar

Las celdas fotovoltaicas tienen curvas características V-I que definen el comportamiento de las mismas ante diferentes condiciones de operación. La potencia de una celda solar está dada por el producto de la corriente y el voltaje de la misma. El punto de máxima potencia es el producto del voltaje en el punto máximo y corriente en el punto máximo para los cuales la potencia extraída del arreglo fotovoltaico es máxima. El punto de máxima potencia varía continuamente, pues depende de factores como la temperatura de la celda solar y de las condiciones de irradiancia [23]. La figura 2.11 muestra un ejemplo de curva característica, así como la dependencia de esta con la irradiancia.

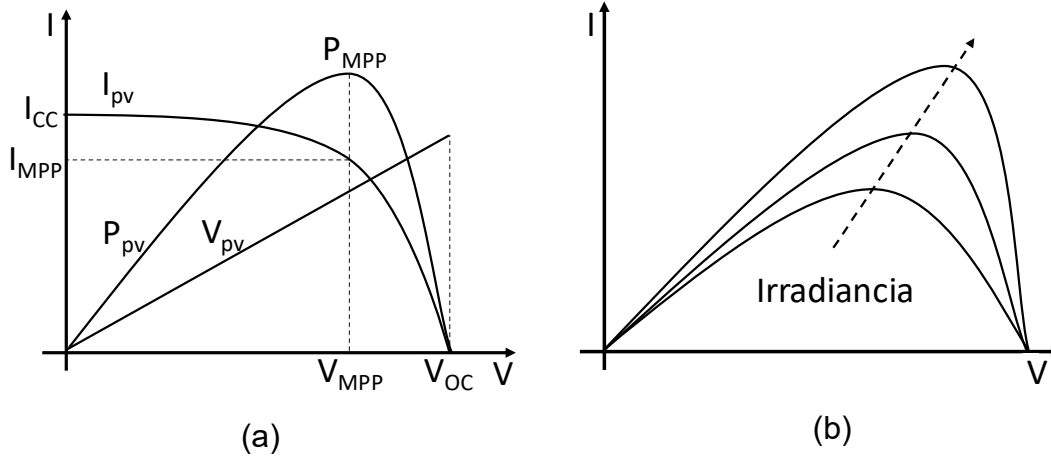


Figura 2.11. (a) Característica V-I de una celda fotovoltaica, (b) Dependencia de la característica V-I con la irradiancia.

Los algoritmos de MPPT se utilizan en sistemas fotovoltaicos para maximizar la energía entregada por los mismos, dicho seguimiento se realiza básicamente variando el valor de ciclo útil de un convertidor de potencia. Esto es con el objetivo de modificar la corriente demandada al panel solar y así variar el punto de operación de la curva característica V-I. Entre los algoritmos más utilizados se encuentra el perturbar y observar (P&O) debido a su simplicidad [23].

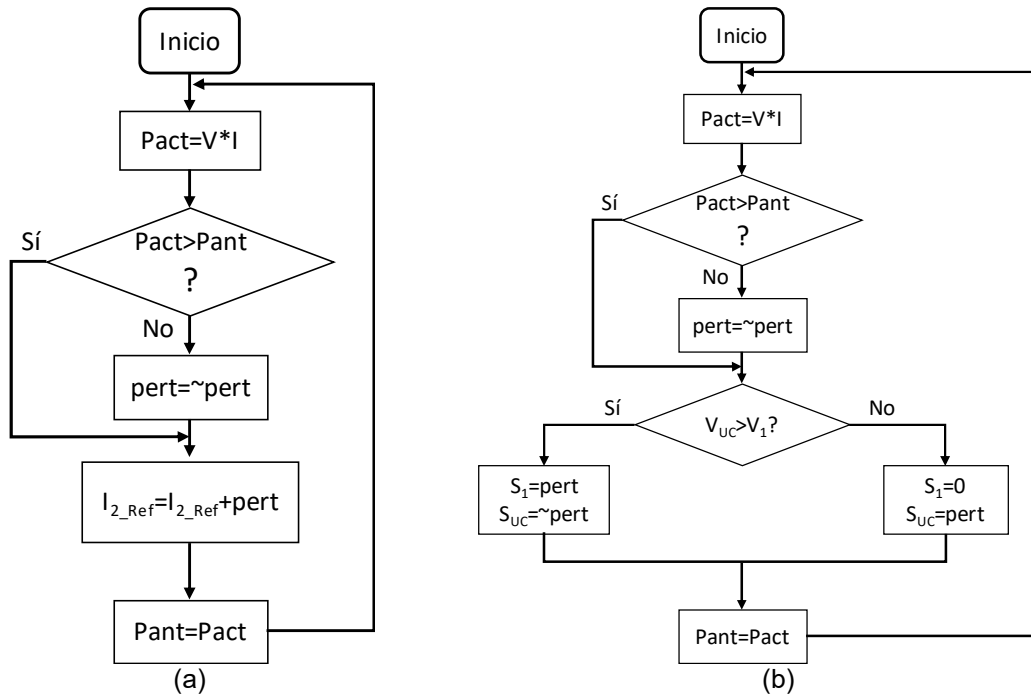


Figura 2.12. Algoritmo para el MPPT, (a) utilizando el convertidor de múltiples entradas, (b) utilizando el convertidor asociado al panel solar.

En el convertidor propuesto el MPPT se puede conseguir de dos formas principalmente. La primera es dedicando el convertidor de múltiples entradas para este objetivo y la segunda es a través del convertidor asociado al panel solar. Utilizando el convertidor de múltiples entradas se logra un seguimiento más eficiente. No obstante, existen momentos donde no se puede dedicar a esta función, como los momentos en los que el vehículo se encuentre en marcha. Es por esto que se dedica un convertidor para el panel solar. De esta manera es menos eficiente, pero tiene la ventaja de poder dedicar el convertidor de múltiples entradas a cumplir con los requisitos de demanda del motor. La figura 2.12 muestra los diagramas de flujo para los dos métodos utilizados de alcanzar el MPPT.

2.4.3. *Generación de energía en la máquina eléctrica*

Los generadores síncronos de imanes permanentes (PMSG, por sus siglas en inglés), deben trabajar en un punto exacto para que entreguen la máxima energía posible para una velocidad en el eje dada [24]. Existen dos posibilidades en el funcionamiento del vehículo considerado donde la máquina eléctrica funciona como un generador. Una es en el frenado regenerativo, la otra es cuando el usuario pedalea con el vehículo estacionado.

En el caso del frenado regenerativo no es necesario trabajar en el punto de máxima transferencia de potencia. En este caso, es necesario seguir un control de velocidad en la máquina eléctrica, que para el presente trabajo se realiza a través de un controlador vectorial (FOC, por sus siglas en inglés). El controlador va a generar el torque necesario para el frenado, de manera que se genera una corriente inversa y se carga el capacitor C_{bus} . En este caso no se cargan las fuentes y la energía que se genera se acumula en dicho capacitor para ser utilizada en el próximo arranque [25].

Por otra parte, cuando el usuario genera energía mientras el vehículo se encuentra estacionado a través del pedal, sí es necesario desarrollar un algoritmo que permita el MPPT. Para lograr este objetivo se siguió el procedimiento descrito en [24]. En este artículo se demuestra que estabilizando la tensión en el capacitor C_{bus} , se logra trabajar en el punto de máxima transferencia de potencia. El diagrama de flujo del algoritmo utilizado se muestra en la figura 2.13.

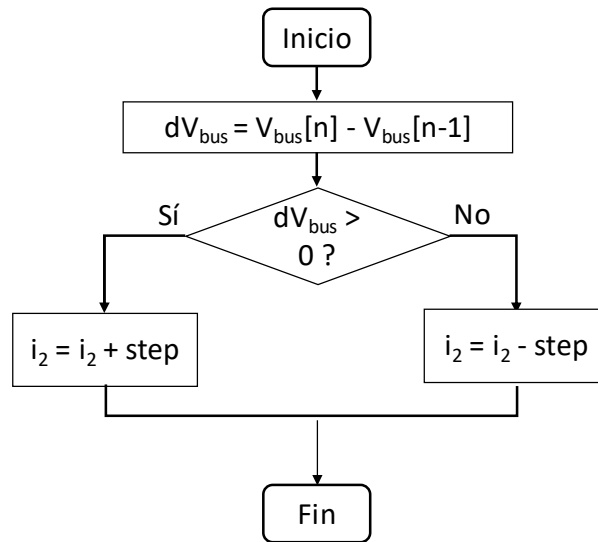


Figura 2.13. Diagrama de flujo del algoritmo utilizado para alcanzar el MPPT en el PMSG.

2.4.4. Gestor de energía

Como se ha mencionado anteriormente, en los vehículos eléctricos con varios puertos de energía, es necesario un sistema de administración de energía para aprovechar las ventajas que ofrece cada fuente. En el presente trabajo se desarrolló un controlador basado en reglas por su simplicidad. La figura 2.14 muestra los principales casos que se tienen en esta aplicación. Este elemento se encarga de asignarle un código a cada conversión y se impone en su salida en dependencia de las condiciones del convertidor y del automóvil.

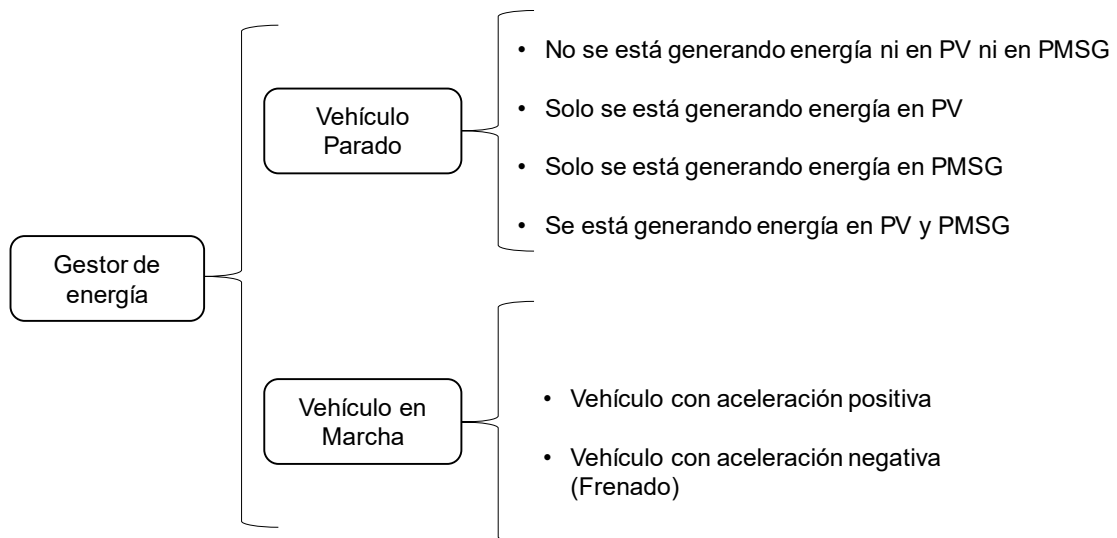


Figura 2.14. Casos generales que se tienen en la aplicación.

A continuación, se mostrarán los diagramas de flujo de cada uno de los casos generales. En caso de que el vehículo se encuentre estacionado y no se esté generando energía ni en el panel solar ni en el PMSG, se cargan los capacitores desde la batería si esta tiene energía para ceder. La figura 2.15 muestra el diagrama de flujo para este caso. Si solo se está generando energía en una de las fuentes (el panel solar o el PMSG), el convertidor de múltiples entradas se dedica al MPPT y se envía la energía a la fuente que lo necesite, priorizando los capacitores. Las figuras 2.16 y 2.17 muestran el diagrama de flujo de cada uno de estos casos respectivamente. En caso de que se esté generando energía en ambas fuentes, el convertidor de múltiples entradas se dedica al MPPT del PMSG, mientras que el convertidor asociado al panel solar se dedica al MPPT de este elemento. El diagrama de flujo coincidiría con el de la figura 2.17 y se habilitaría la segunda opción del MPPT del panel solar.

En caso de que el vehículo se encuentre en marcha y con aceleración positiva se sigue el diagrama de flujo mostrado en la figura 2.18. Si solo existe un elemento almacenador cargado se utiliza este para todo el ciclo de manejo. Si ambos están cargados, se utiliza el ultracapacitor para la aceleración por ser el elemento de mayor densidad de potencia y la batería para cuando la velocidad es relativamente constante. Finalmente, cuando el vehículo se encuentre en marcha y con aceleración negativa se establece la libre circulación de la corriente I_2 y se acumula la energía generada en el capacitor C_{bus} .

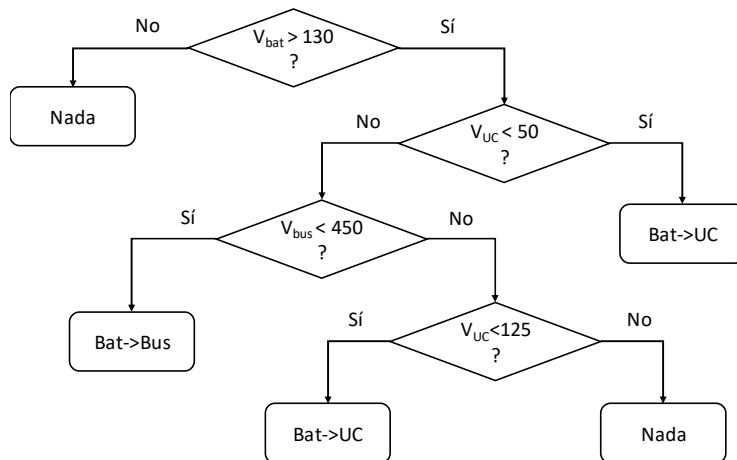


Figura 2.15. Diagrama de flujo cuando no se genera energía en el panel solar ni en el PMSG.

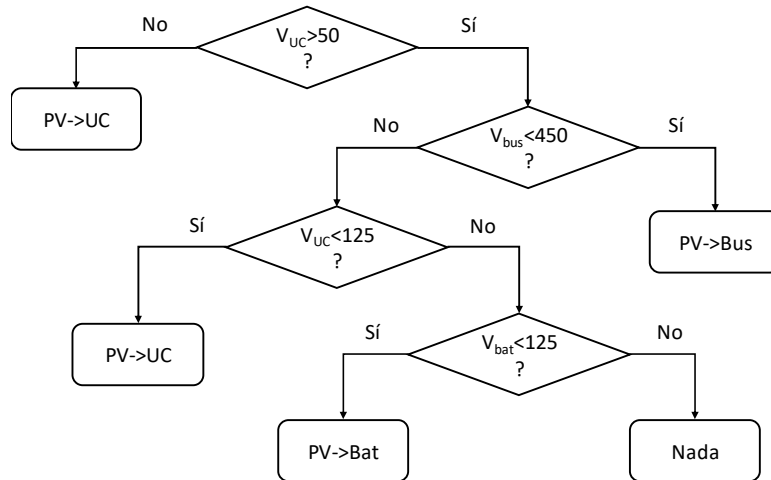


Figura 2.16. Diagrama de flujo cuando solo se genera energía en el panel solar.

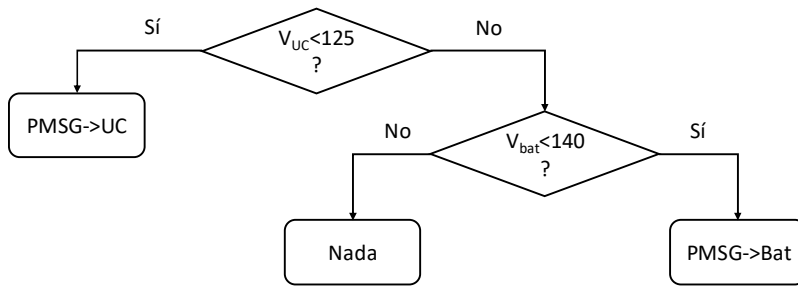


Figura 2.17. Diagrama de flujo cuando solo se genera energía en el PMSG.

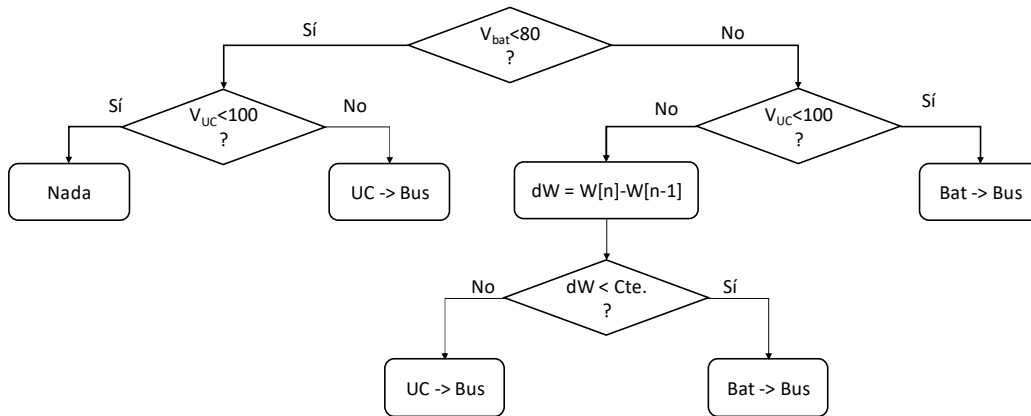


Figura 2.18. Diagrama de flujo cuando el vehículo se encuentra en marcha con aceleración positiva.

2.4.5. Decodificador

El decodificador es el encargado de establecer el estado de cada interruptor. Para esto requiere como entradas el código de la conversión correspondiente (salida del

gestor de energía) y la señal del SMC. La tabla 2.5 muestra el funcionamiento de este bloque. Las ecuaciones de (7) a (15) representan las funciones lógicas de cada interruptor, las cuales se obtuvieron a partir de esta tabla de verdad.

Tabla 2.5. Comportamiento del decodificador de salida.

Transferencia	Código (C ₃ C ₂ C ₁ C ₀)	S ₂	S ₃	S ₄	S ₅	S ₆	S ₇	S ₈	S ₉	S ₁₀
Nada	0000	0	0	0	0	1	1	0	0	0
3. Bat. -> Bus	0001	0	0	1	0	0	\bar{C}	C	0	0
4. UC -> Bus	0010	0	1	0	0	0	\bar{C}	C	0	0
5. PV -> Bus	0011	1	0	0	0	0	\bar{C}	C	0	0
6. PV -> UC	0100	1	0	0	0	0	0	C	\bar{C}	0
7. PV -> Bat.	0101	1	0	0	0	0	0	C	0	\bar{C}
8. Bat. -> UC	0110	0	0	C	\bar{C}	0	0	0	1	0
9. Bus -> Bat.	0111	0	0	0	\bar{C}	C	0	0	0	1
10. Bus -> UC	1000	0	0	0	\bar{C}	C	0	0	1	0

$$S_2 = \bar{C}_3 * C_2 * \bar{C}_1 + \bar{C}_3 * \bar{C}_2 * C_1 * C_0 \quad (7)$$

$$S_3 = \bar{C}_3 * \bar{C}_2 * C_1 * \bar{C}_0 \quad (8)$$

$$S_4 = \bar{C}_3 * \bar{C}_2 * \bar{C}_1 * C_0 + \bar{C}_3 * C_2 * C_1 * \bar{C}_0 * C \quad (9)$$

$$S_5 = \bar{C}_3 * C_2 * C_1 * \bar{C} + \bar{C}_3 * \bar{C}_2 * \bar{C}_1 * \bar{C}_0 * \bar{C} \quad (10)$$

$$S_6 = \bar{C}_3 * \bar{C}_2 * \bar{C}_1 * \bar{C}_0 + \bar{C}_3 * C_2 * C_1 * C_0 * C + \bar{C}_3 * \bar{C}_2 * \bar{C}_1 * \bar{C}_0 * C \quad (11)$$

$$S_7 = \bar{C}_3 * \bar{C}_2 * \bar{C}_1 * \bar{C}_0 + \bar{C}_3 * \bar{C}_2 * C_0 * \bar{C} + \bar{C}_3 * \bar{C}_2 * C_1 * \bar{C} \quad (12)$$

$$S_8 = \bar{C}_3 * \bar{C}_2 * C_0 * C + \bar{C}_3 * \bar{C}_2 * C_1 * C + \bar{C}_3 * C_2 * \bar{C}_1 * C \quad (13)$$

$$S_9 = \bar{C}_3 * C_2 * \bar{C}_1 * \bar{C}_0 * \bar{C} + \bar{C}_3 * C_2 * C_1 * \bar{C}_0 + \bar{C}_3 * \bar{C}_2 * \bar{C}_1 * \bar{C}_0 \quad (14)$$

$$S_{10} = \bar{C}_3 * C_2 * \bar{C}_1 * C_0 * \bar{C} + \bar{C}_3 * C_2 * C_1 * C_0 \quad (15)$$

2.5. Sistema de propulsión

El sistema de propulsión incluye la máquina eléctrica, el inversor y el controlador de velocidad del motor. El diseño de estos elementos no es objetivo de la presente investigación. Sin embargo, es necesario tenerlo en cuenta para las simulaciones que validarán el convertidor propuesto en las secciones anteriores. Para lograr este objetivo, se utilizó el ejemplo de control de velocidad de un PMSM que viene en el paquete de instalación del software PSIM. Este ejemplo, además del motor tiene un inversor trifásico y un controlador de velocidad FOC sintonizado. El circuito de este sistema se muestra en la figura 2.19.

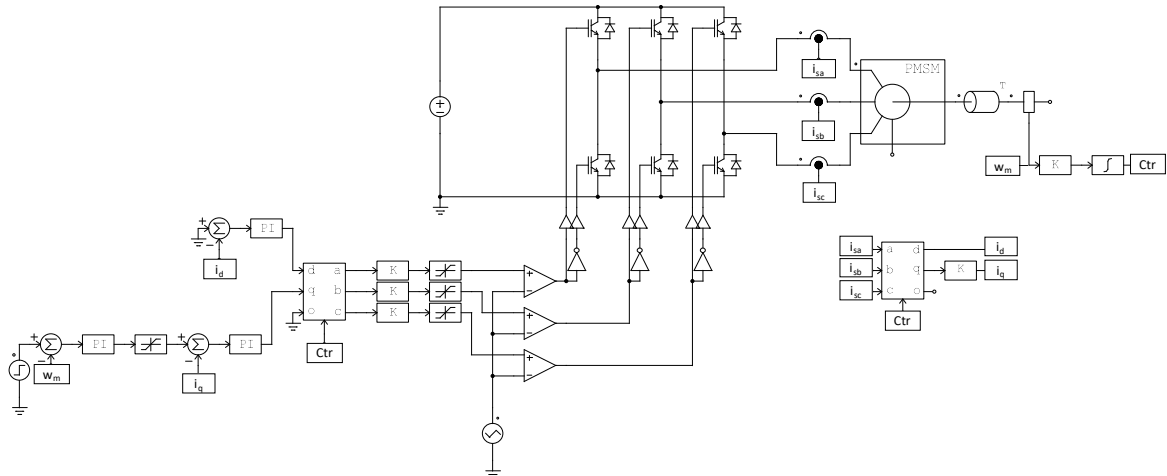


Figura 2.19. Circuito del sistema de propulsión del vehículo eléctrico.

2.6. Modelo de batería

Finalmente, fue necesario desarrollar un modelo funcional de la batería, ya que en el PSIM 9.0.3, que fue el software utilizado para la simulación no se tiene este dispositivo. La curva de descarga típica de una batería de ión-litio se presenta en [26] y se muestra en la figura 2.20. Donde E_{full} es la tensión máxima, E_{top} es el punto de tensión exponencial, E_{nom} es la tensión nominal, Q_{max} es la capacidad máxima, Q_{nom} es la capacidad nominal y Q_{top} es el punto de capacidad exponencial. Todos estos puntos deben estar especificados en la hoja de datos de la batería. Un ejemplo puede ser una batería con los siguientes requerimientos: $Q_{top}=2.8$, $Q_{nom}=13.5$, $Q_{max}=15$, $E_{full}=144$, $E_{top}=135$, $E_{nom}=125$, $E_{cut}=100$.

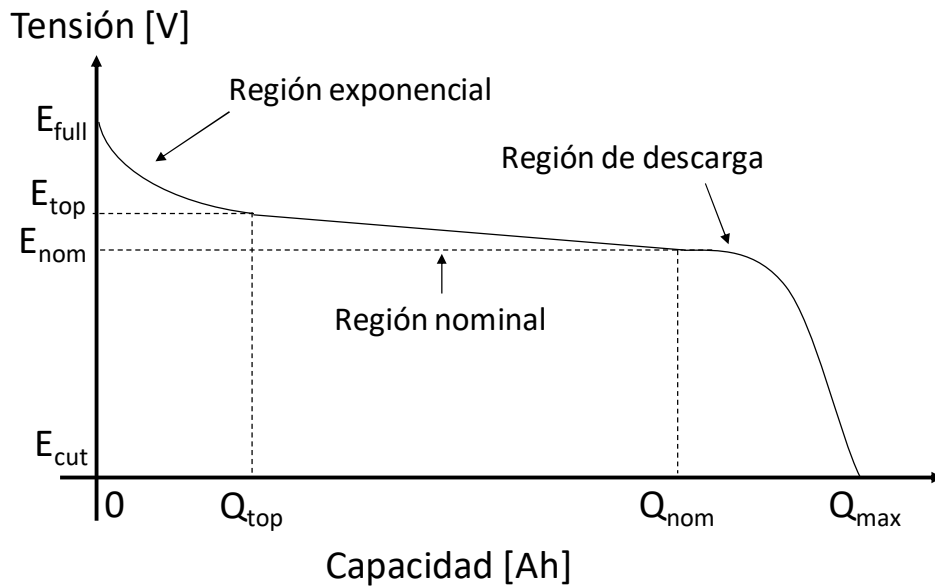


Figura 2.20. Curva característica de descarga de una batería de ión-litio.

Luego de analizar la gráfica se pueden reconocer tres regiones de la curva: la región exponencial, la región nominal y la región de descarga. La región exponencial se pudiera aproximar como una función exponencial decreciente, la región nominal como una recta y la región de descarga como una parábola negativa. Con estas aproximaciones se construye la curva necesaria para modelar la batería. Es necesario aclarar que la señal V_{bat} de la figura 2.1 va a corresponder con la variable E de esta sección.

La región exponencial se aproxima mediante la ecuación $E=A*10^{-k*x}+Y_0$. Donde E es la tensión de salida y “ x ” es la variable independiente, que en este caso es la capacidad. A es la amplitud y se obtiene de sustraer E_{full} menos E_{top} menos 1. Y_0 es el valor al que tiende la función en el infinito, en este caso se toma como E_{top} menos 1. Finalmente para obtener “ k ” se sustituye el punto (Q_{top},E_{top}) y se despeja de la ecuación. Para el ejemplo propuesto anteriormente quedaría $E=10*10^{-0.357*x}+134$. La implementación de esta región en el PSIM quedó como se muestra en la figura 2.21.

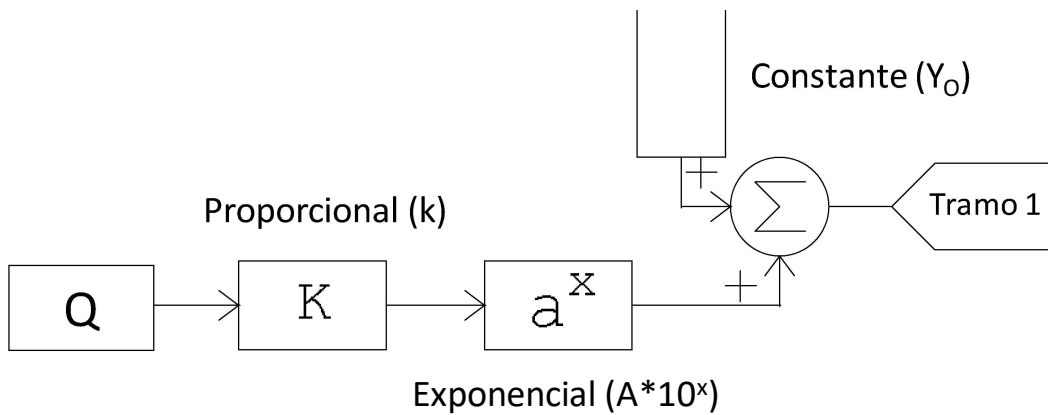


Figura 2.21. Implementación en PSIM de la región exponencial.

La región nominal se aproxima mediante la ecuación $E=m*x+n$. Donde E es la tensión de salida y “ x ” es la capacidad. La pendiente es la constante “ m ” y se obtiene mediante la ecuación (16). Para obtener “ n ” se sustituye el punto (Q_{nom},E_{nom}) . Para el ejemplo quedaría: $E=-0.934*x+137.61$. La implementación de esta región en el PSIM quedó como se muestra en la figura 2.22.

$$m = \frac{E_{nom} - E_{top}}{Q_{nom} - Q_{top}} \tag{16}$$

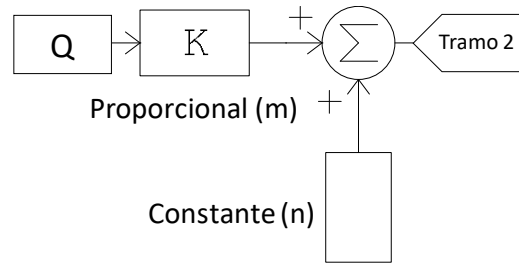


Figura 2.22. Implementación en PSIM de la región nominal.

La región de descarga se aproxima mediante la ecuación $E = -10(x - X_0)^e + Y_1$. Donde E es la tensión de salida y “ x ” es la capacidad. Y_1 es el desplazamiento en el eje y , el cual coincide E_{nom} , mientras que X_0 es el desplazamiento en el eje x , el cual coincide con Q_{nom} . El valor de “ e ” se obtiene sustituyendo el punto (Q_{max}, E_{cut}) . Para el ejemplo quedaría: $E = -10(x - 13.5)^{2.26} + 125$. La implementación de esta región en el PSIM quedó como se muestra en la figura 2.23.

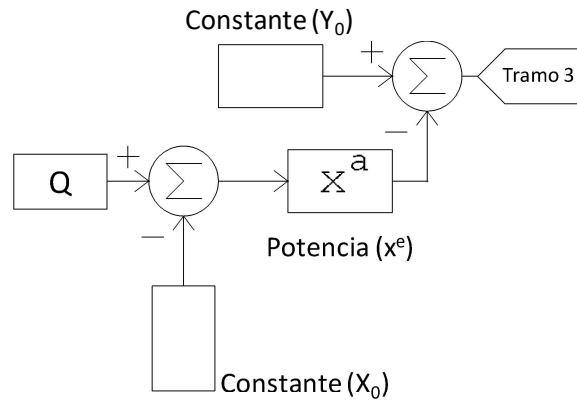


Figura 2.23. Implementación en PSIM de la región de descarga.

Luego de tener las tres regiones, es necesario obtener la capacidad en Ah. Un amperio hora es una unidad de carga eléctrica y se abrevia como Ah. Indica la cantidad de carga eléctrica que pasa por los terminales de un dispositivo de almacenamiento de energía eléctrica, por ejemplo un condensador o una batería, cuando este proporciona una corriente eléctrica de 1 amperio durante 1 hora a través de dichos terminales.

Para obtener esta magnitud es necesario integrar la corriente que fluye a la salida de la batería (I_{O_Bat}), de esta manera se obtiene la carga en amperes por segundo. Para realizar la conversión a Ah, basta con dividir ese valor entre 3600. La formación

del valor de x que debe ser evaluado se completa con la suma del valor de esta medición con un valor de carga inicial que puede ser configurado por el usuario desde la entrada del subcircuito diseñado (Q_0). La figura 2.24 muestra la obtención de la carga en el PSIM.

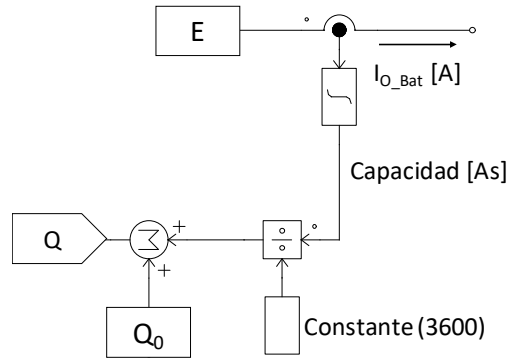


Figura 2.24. Obtención de la carga de la batería en PSIM.

Este valor de carga se compara con los valores de Q_{top} y Q_{nom} para cambiar la función que representa el comportamiento de la tensión de la batería. La figura 2.25 muestra el circuito completo.

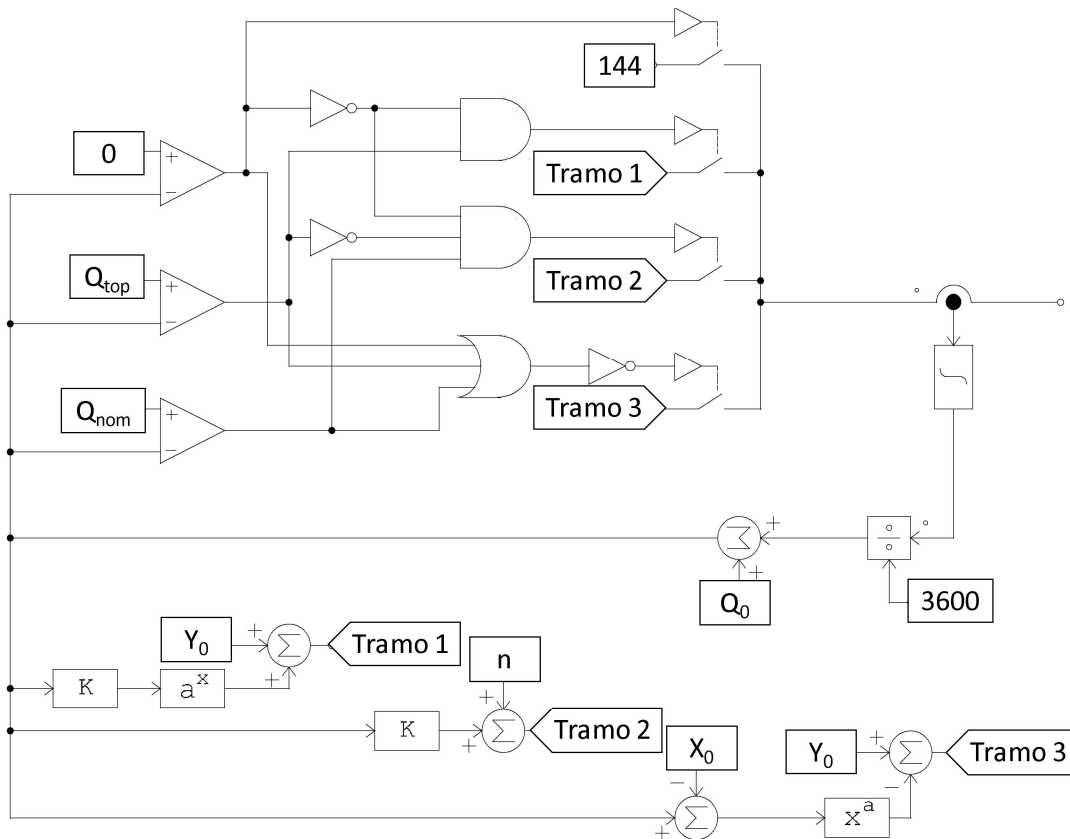


Figura 2.25. Circuito del modelo de batería.

De esta manera se completó el modelo de batería realizado en este trabajo. Este modelo tiene como ventaja que es sencillo de implementar y permite utilizar una batería en PSIM 9.0.3. No obstante, tiene limitaciones ya que se considera que la batería se carga a través de la misma curva por la que se descarga, en realidad esto no es así. Además, no se tuvieron en cuenta otros fenómenos que afectan a la capacidad como la temperatura y la corriente de descarga.

Capítulo 3

Resultados de simulación

En el presente capítulo se presentan las simulaciones realizadas en el software PSIM para la validación de la topología propuesta y el modelo de batería utilizado. Se realizaron pruebas que comprobaron el funcionamiento del control por modos deslizantes, el MPPT del PMSG cuando el usuario pedalea, los MPPT's utilizados para el panel solar y el gestor de energía.

La simulación para validar el funcionamiento del convertidor propuesto se realizó en el paquete de software PSIM debido a la simplicidad de este y su disponibilidad. Este software proporciona una solución de simulación para todas las aplicaciones de electrónica de potencia. Además, posee una interfaz amigable con el usuario y permite la fácil simulación de las máquinas eléctricas.

Para la simulación, primero es necesario tener en cuenta el tamaño de los elementos almacenadores y el valor de los parámetros que se obtuvieron en el capítulo anterior. La tabla 3.1 resume los datos de las fuentes y del motor del vehículo eléctrico, estos fueron tomados de [15] debido a la similitud con el rango de potencia que fue objetivo en la presente investigación. La tabla 3.2 resume los datos del convertidor de múltiples entradas y el convertidor asociado al panel solar, atendiendo a los valores obtenidos en el capítulo anterior. Finalmente, la tabla 3.3 resume los datos del sistema de propulsión, los cuales fueron tomados del ejemplo de accionamiento del PMSM que ofrece el PSIM en su instalación. De esta manera se emula el comportamiento del vehículo, aunque para la presente investigación no se tuvo en cuenta su masa, ni la inercia ni otros parámetros dependientes de una aplicación específica.

Tabla 3.1. Datos de las fuentes y del motor del vehículo eléctrico.

<i>Fuente</i>	<i>Valor</i>
<i>Batería</i>	100-144 V 15 Ah
<i>Ultracapacitor</i>	125 V 5 F
<i>Panel solar</i>	100-125 W
<i>PMSM</i>	1.8 kW

Tabla 3.2. Datos del convertidor de múltiples entradas y el convertidor asociado al panel solar.

<i>Elemento</i>	<i>Valor</i>
L_1	12.5 μ H
C_{pv}	5 μ F
L_2	3.86 mH
C_{bus}	178 μ F
f	50 kHz
<i>Interruptores</i>	$V_{min}=500$ V $I_{min}=10$ A $f_{min}=50$ kHz

V_{min} : Tensión mínima, I_{min} : Corriente mínima, f_{min} : frecuencia de conmutación mínima.

Tabla 3.3. Datos del sistema de propulsión.

<i>Parámetro</i>	<i>Valor</i>
<i>Resistencia de estator</i>	4.3 Ω
<i>Inductancia de eje d</i>	27 mH
<i>Inductancia de eje q</i>	67 mH
<i>Número de polos</i>	4
<i>Momento de inercia</i>	0.01 mkg*m2
<i>Constante de tiempo mecánica</i>	1 s
K_{ext}	2
T_{ext}	0.005
K_{int}	10
T_{int}	0.00005

K_{ext} : Ganancia del lazo de control externo, T_{ext} : Constante de tiempo del lazo de control externo,

K_{int} : Ganancia del lazo de control interno, T_{int} : Constante de tiempo del lazo de control interno.

3.1. Simulación del modelo de batería

La tabla 3.4 resume los datos de la batería y los valores obtenidos para su modelo. Para la validación de este modelo se demandó una corriente directa a través de su terminal de salida y se obtuvo la gráfica mostrada en la figura 3.1. De esta manera se evidencia el funcionamiento deseado de este modelo.

Tabla 3.4. Valores del modelo de la batería.

<i>Parámetro</i>	<i>Valor</i>
Q_{top}	2.8 Ah
Q_{nom}	13.5 Ah
Q_{max}	15 Ah
E_{full}	144 V
E_{top}	135 V
E_{cut}	100 V
A	10
k	0.357
Y_0	134
m	-0.934
n	137.61
X_0	13.5
Y_1	125
e	2.26

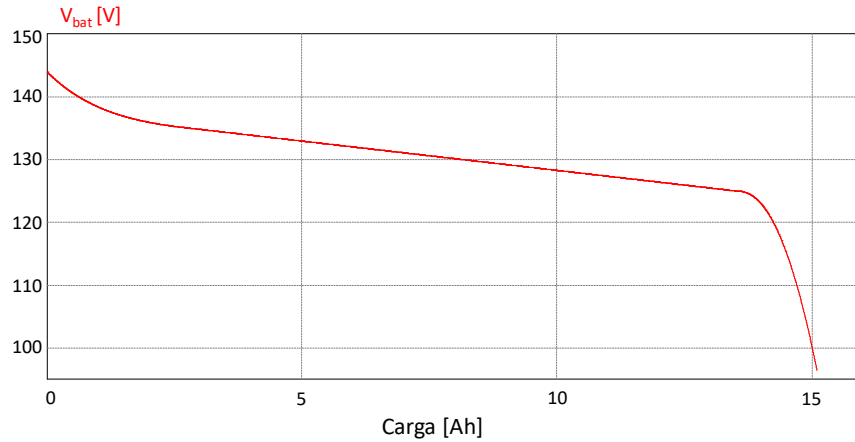


Figura 3.1. Gráfica de la tensión de salida de la batería ante la corriente demandada.

3.2. Simulación de los convertidores

En esta sección se comprueba el comportamiento de los convertidores propuestos. Se realiza la validación de los controladores utilizados, empezando por el SMC hasta llegar al gestor de energía. La figura 3.2 muestra una transferencia de energía desde la batería hacia el ultracapacitor para evidenciar la efectividad del SMC. Se muestra de arriba hacia abajo la corriente en el inductor L_2 , la tensión en el ultracapacitor y la tensión en la batería. Como se puede apreciar, la corriente I_2 sigue su referencia de 10 A, con un rizo en estado estacionario de 0.4 A. El tiempo de establecimiento es de 0.01 segundos.

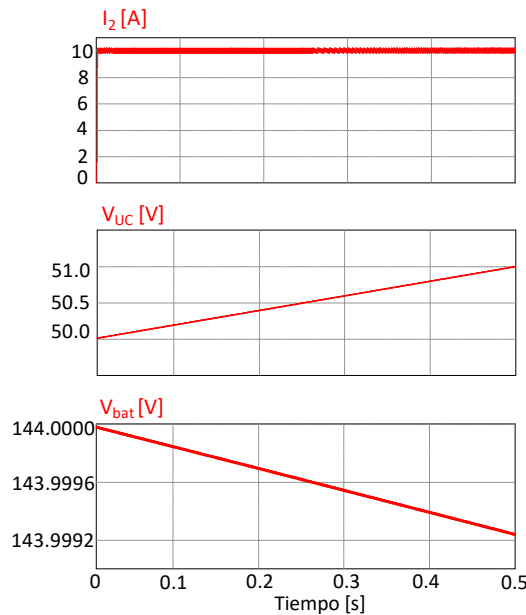


Figura 3.2. Transferencia desde la batería hacia el ultracapacitor.

La figura 3.3(a) muestra el MPPT implementado para el panel solar dedicando el convertidor de múltiples entradas para este objetivo. Se muestra de arriba hacia abajo la potencia en la salida del panel solar, la corriente en el inductor L_2 y la tensión en el ultracapacitor. Se puede observar un tiempo de establecimiento menor a 0.1 segundos para variaciones de 100 W. Además, se tiene un rizo de corriente de 0.1 A. Finalmente, las variaciones en el punto de máxima potencia son menores de 5 W en estado estacionario. A pesar de la calidad de la respuesta evidenciada en los parámetros anteriores, tiene como limitante que es necesario dedicar el convertidor de múltiples entradas a esta función. La figura 3.3(b) muestra el MPPT implementado para el panel solar utilizando el convertidor asociado al mismo. Se muestra de arriba hacia abajo la potencia en la salida del panel solar, la corriente en el inductor L_1 y la tensión en el ultracapacitor. Como se puede apreciar presenta un tiempo de establecimiento de 0.02 segundos, un rizo de corriente en el inductor L_1 de 15 A y una variación de 8 W en la potencia de salida del panel solar. A pesar de tener peores valores de los parámetros, con respecto a la otra opción, esta tiene como ventaja que no es necesario la utilización del convertidor de múltiples entradas.

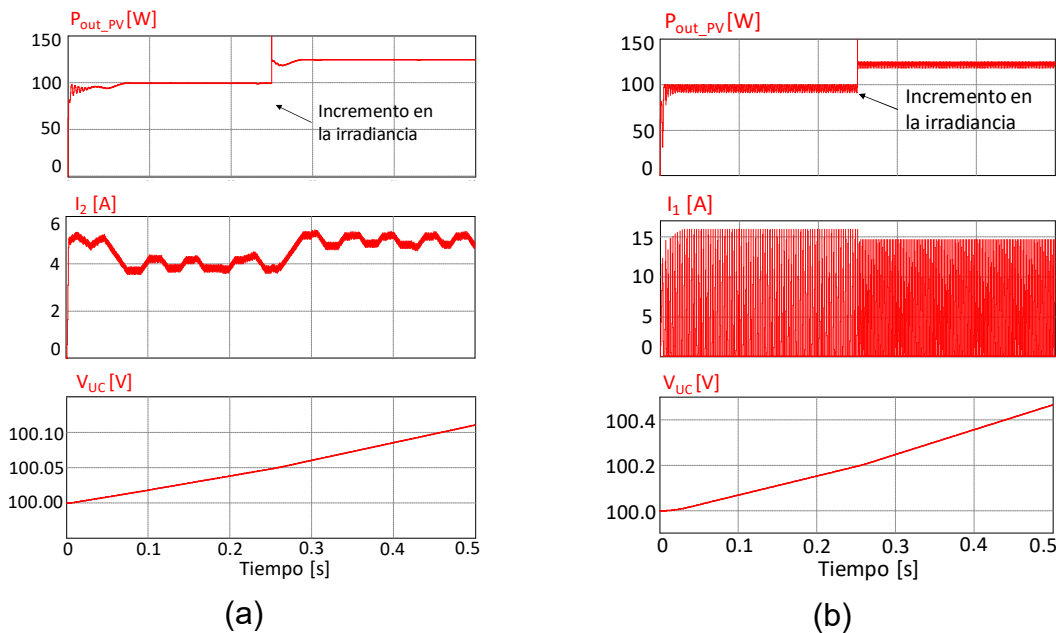


Figura 3.3. (a) MPPT del panel solar dedicando el convertidor de múltiples entradas, (b) MPPT del panel solar utilizando el convertidor asociado al mismo.

La figura 3.4 muestra la caracterización de la máquina eléctrica utilizada, en modo generador. Esto es necesario para saber cuál es la máxima potencia que puede entregar para una velocidad dada en el eje. La figura 3.5 muestra el MPPT implementado para el PMSG. Se muestra de arriba hacia abajo la potencia en la salida del PMSG, la corriente en el inductor L_2 y la tensión en el capacitor C_{bus} . Se logra extraer el 92% y el 97% de la potencia para cada velocidad del eje respectivamente. Este objetivo se logra utilizando la teoría presentada en [24], la cual establece que es necesario mantener constante el nivel de tensión en el capacitor C_{bus} .

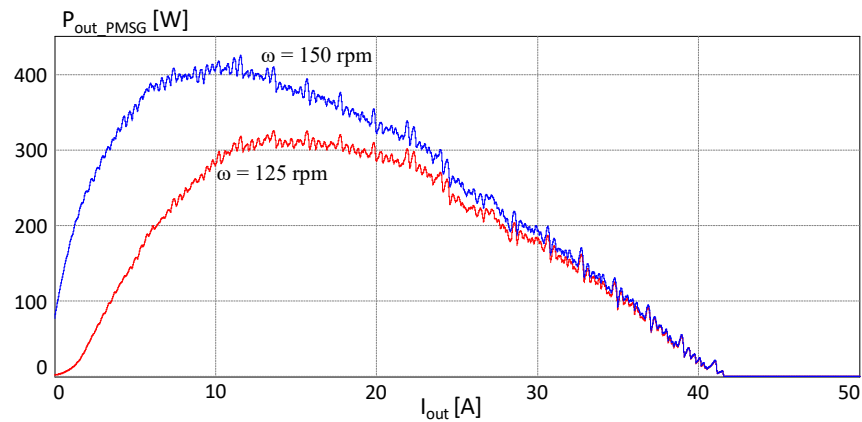


Figura 3.4. Caracterización del PMSG utilizado.

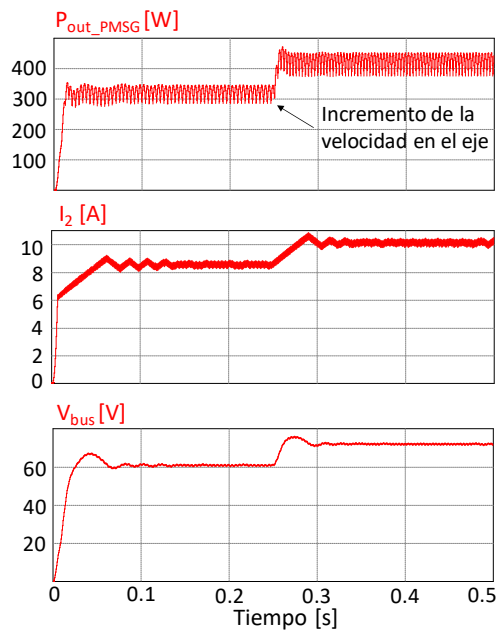


Figura 3.5. MPPT implementado para el PMSG.

Finalmente, se procede a la validación del gestor de energía. Para saber si se realizan los cambios de transferencia deseados se evalúa el rendimiento del convertidor ante un ciclo de manejo. Un ciclo de manejo representa un comportamiento fijo de la operación del vehículo, el cual permite comprobar parámetros de interés en el auto, tales como el sistema electrónico diseñado o las emisiones de dióxido de carbono. Los ciclos de manejo usualmente son definidos en términos de la velocidad del vehículo y los cambios en la caja de transmisión en función del tiempo [27].

Existen muchos ciclos de manejo, entre los que se puede mencionar el Ciclo de Manejo Urbano Extendido de la Unión Europea o el Procedimiento de Prueba Federal (FTP, por sus siglas en inglés) de Estados Unidos [27]. En México, el Laboratorio de Control de Emisiones ha desarrollado cinco ciclos de manejo, los cuales corresponden a las zonas Noroeste, Noreste, Centro, Suroeste y Sureste de la Zona Metropolitana del Valle de México y se pueden encontrar en [28]. Para el presente trabajo se seleccionó el ECE-15 o patrón de manejo urbano (UDC, por sus siglas en inglés), debido a la simplicidad en la generación de la referencia de velocidad necesaria y debido a que es uno de los patrones de manejo de menor tiempo. Fue legislado en la Unión Europea en el año 1970 y tiene una duración total de 195 segundos. Para el presente trabajo se escaló el tiempo a razón de 1:10, o sea, el tiempo total quedaría en 19.5 segundos. Esto fue necesario debido a los grandes tiempos de simulación requerido por el software PSIM.

Este ciclo de manejo presenta la velocidad en km/h y en el algoritmo del control vectorial está representada en revoluciones por minuto (rpm), por lo que fue necesario obtener la relación entre estas unidades de medida. Para ello se considera un neumático de 15 pulgadas, el cual tendría un diámetro de 38.1 cm. Además, se considera un acoplamiento con relación 1:1 entre el motor y la rueda. De esta manera la velocidad lineal está regida por la ecuación (17). El resultado quedaría en m/min, para llevarlo a km/h basta con multiplicarlo por 60 y dividirlo entre 1000.

$$V=L*rpm*relación=0.381*\pi*rpm*1 \quad (17)$$

La figura 3.6 muestra el patrón de manejo en cuestión. Este gráfico relaciona la velocidad en rpm y km/h con respecto al tiempo en segundos (s). Fue dividido en tres secciones, identificándose cada una según la figura 2.13 de la siguiente manera: A, vehículo parado; B, vehículo en marcha con aceleración positiva; C, vehículo en marcha con aceleración negativa.

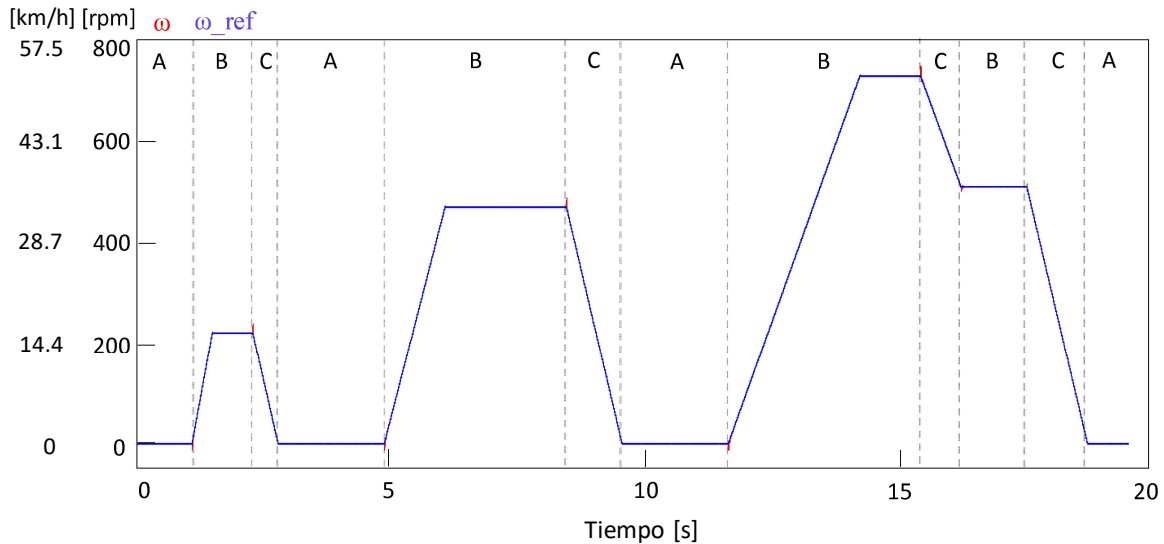


Figura 3.6. Ciclo de manejo UDC.

Para la realización de este ciclo de manejo se consideró que el panel solar está generando energía y que el ultracapacitor y la batería tienen energía disponible. La figura 3.7 muestra las transferencias realizadas en la primera parada del vehículo. Se muestra de arriba hacia abajo y de izquierda a derecha la potencia en la salida del panel solar, la corriente en el inductor L_1 , la corriente en el inductor L_1 , la potencia en la salida del PMSG, la tensión en el capacitor C_{bus} y la tensión en el ultracapacitor. Se puede apreciar como hay un primer momento donde el usuario a través del pedal y el PMSG genera energía, la cual se utiliza para cargar el ultracapacitor. En este tiempo el convertidor de múltiples entradas se dedica al MPPT del PMSG actuando sobre la tensión del capacitor C_{bus} . Mientras, el convertidor asociado al panel solar se dedica al MPPT de este elemento. Cuando el usuario deja de pedalear, el convertidor de múltiples entradas se dedica al MPPT del panel solar y se carga primero el capacitor C_{bus} y posteriormente el ultracapacitor.

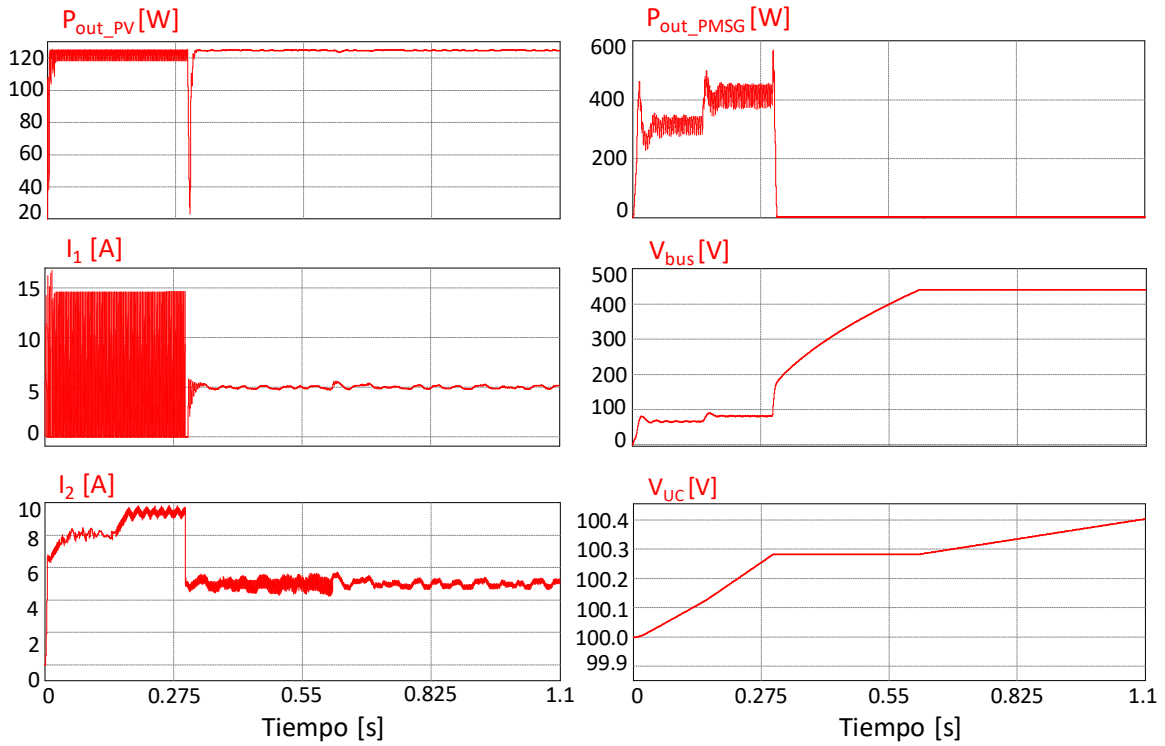


Figura 3.7. Funcionamiento del vehículo mientras se encuentra parado.

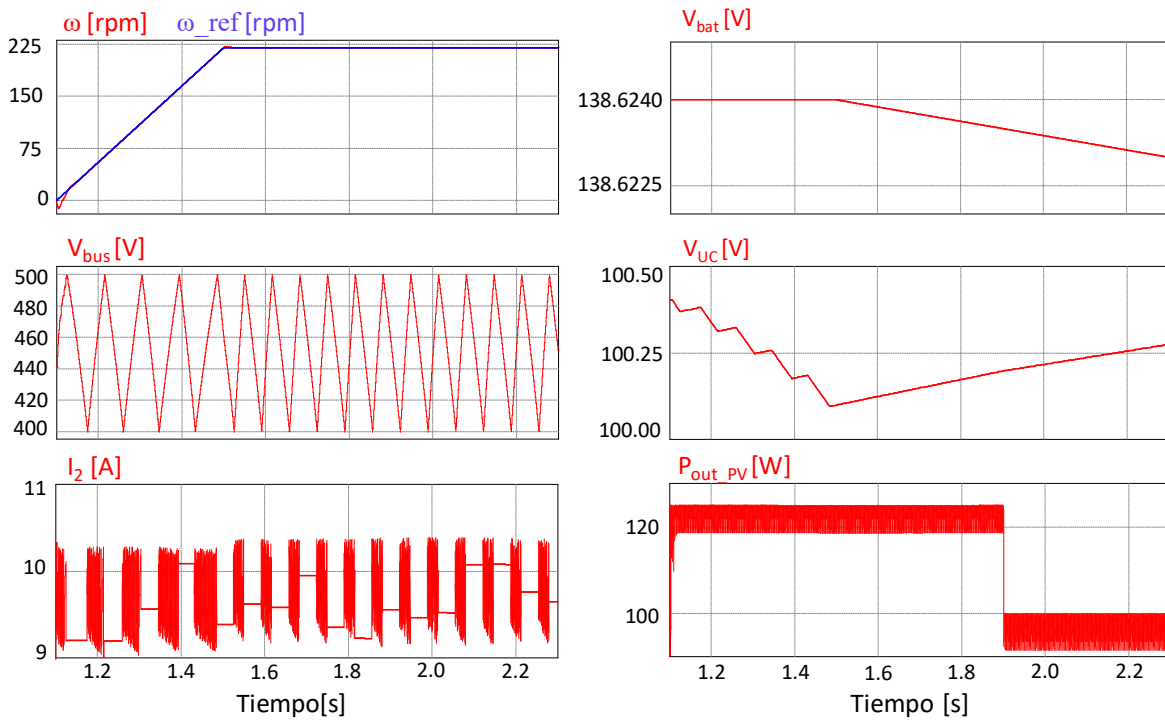


Figura 3.8. Funcionamiento del vehículo en marcha con aceleración positiva.

La figura 3.8 muestra el vehículo en marcha con aceleración positiva. Se muestra de arriba hacia abajo y de izquierda a derecha la velocidad de referencia y la velocidad real del vehículo, la tensión en el capacitor C_{bus} , la corriente en el inductor L_2 , la tensión en la batería, la tensión en el ultracapacitor y la potencia en la salida del panel solar. Aquí se puede apreciar la histéresis en la tensión del capacitor C_{bus} . Cuando cae de 400 V, se le envía la corriente del inductor L_2 y si sube a más de 500 V el inductor L_2 se queda en libre circulación, en ese momento el capacitor entrega la energía requerida por el motor. Además, se aprecia cómo se toma la energía desde el ultracapacitor en la aceleración, mientras que cuando se tiene una velocidad constante se toma la energía desde la batería. La energía que se genera en el panel solar es enviada al ultracapacitor a través del convertidor asociado a este elemento.

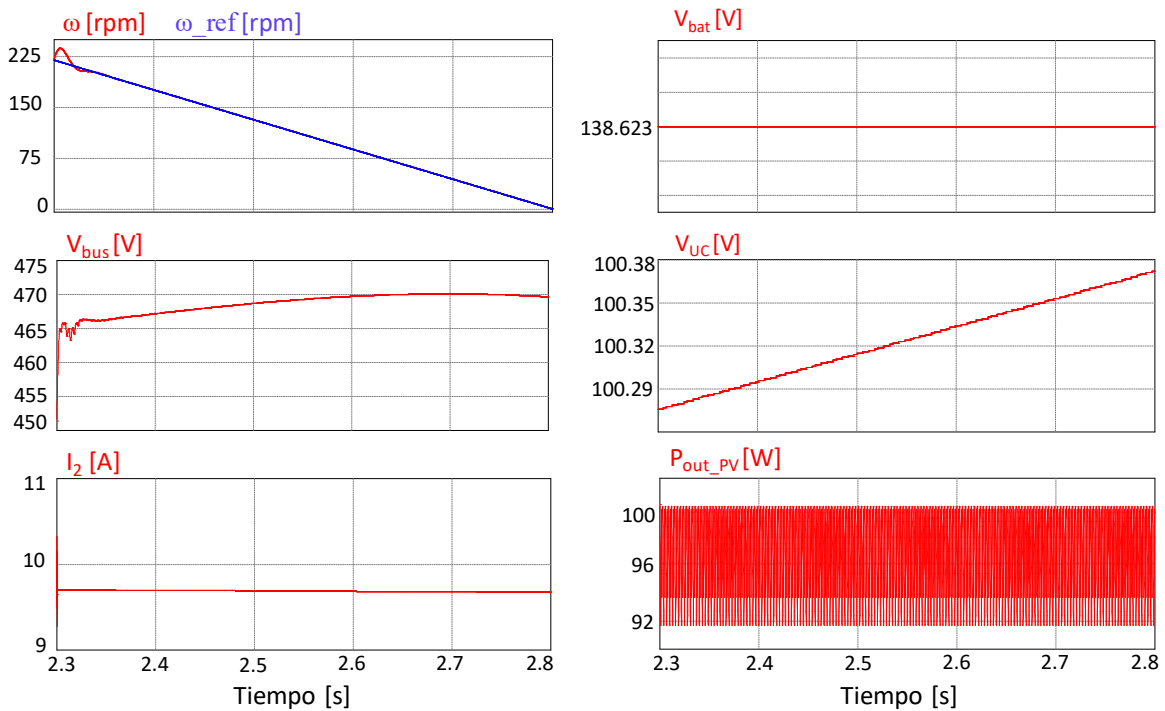


Figura 3.9. Funcionamiento del vehículo frenando.

La figura 3.9 muestra el vehículo frenando. Se muestra de arriba hacia abajo y de izquierda a derecha la velocidad de referencia y la velocidad real del vehículo, la tensión en el capacitor C_{bus} , la corriente en el inductor L_2 , la tensión en la batería, la tensión en el ultracapacitor y la potencia en la salida del panel solar. Se puede

apreciar como la energía que se genera en este momento es acumulada en el capacitor C_{bus} . El inductor L_2 se queda en libre circulación y la batería se queda en el mismo nivel de tensión. El ultracapacitor se carga a través del convertidor asociado al panel solar, debido a la energía que se genera en este elemento.

La figura 3.10 muestra el comportamiento de las variables de estado del convertidor a través del ciclo de manejo. Se muestra de arriba hacia abajo la velocidad de referencia y la velocidad real del vehículo, la corriente en el inductor L_2 y la tensión en el capacitor C_{bus} . La figura 3.11 muestra el comportamiento de la batería y el ultracapacitor durante el ciclo de manejo; exhibiéndose de arriba hacia abajo la velocidad de referencia y la velocidad real del vehículo, la tensión en el ultracapacitor y la tensión en la batería. Finalmente, la figura 3.12 muestra el comportamiento de las potencias durante el patrón. Se muestra de arriba hacia abajo la velocidad de referencia y la velocidad real del vehículo, la potencia en la salida del panel solar y la potencia en la salida del PMSG.

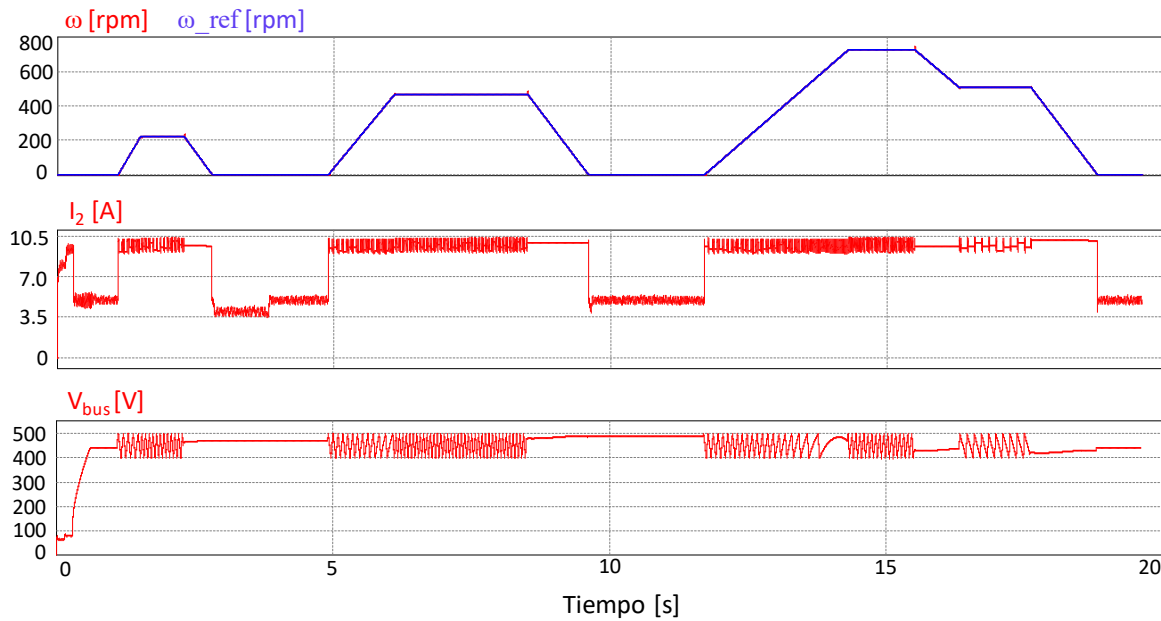


Figura 3.10. Comportamiento de las variables de estado del convertidor de múltiples entradas durante el ciclo de manejo.

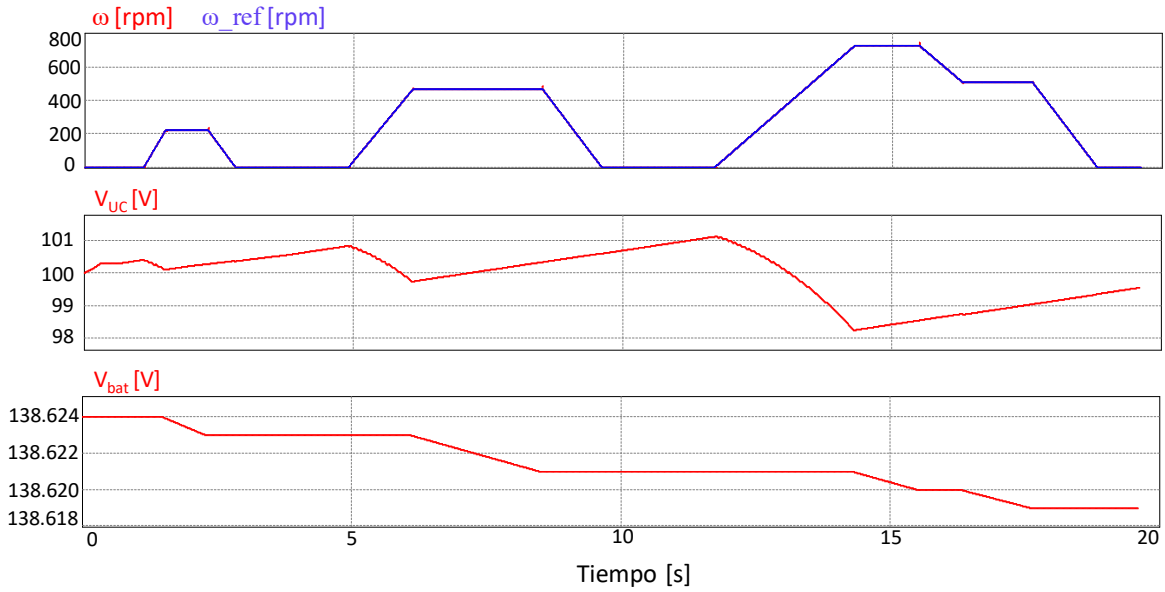


Figura 3.11. Comportamiento de la batería y el ultracapacitor durante el ciclo de manejo.

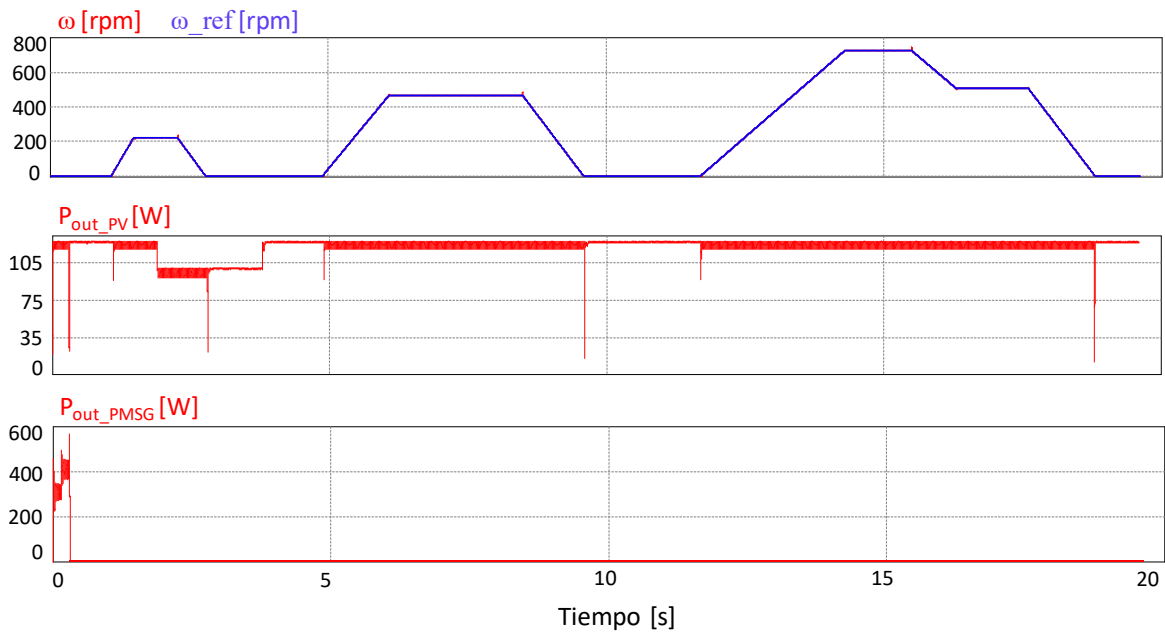


Figura 3.12. Comportamiento del panel solar y el PMSG durante el ciclo de manejo.

El ciclo de manejo anterior se realizó considerando que existía energía disponible en los elementos almacenadores y que además se generaba energía en el panel solar. Para una validación completa del gestor de energía es necesario comprobar las otras posibilidades que se pueden tener en el funcionamiento normal del auto. Las figuras 3.13 - 3.19, muestran los otros casos que se pueden dar en el sistema.

Se muestra de arriba hacia abajo y de izquierda a derecha la velocidad de referencia y la velocidad real del vehículo, la tensión en el capacitor C_{bus} , la corriente en el inductor L_2 , la tensión en la batería, la tensión en el ultracapacitor y la potencia en la salida del panel solar. En estas simulaciones no se realizó el ciclo de manejo completo, sino que se estableció una aceleración y un frenado en la referencia de velocidad para ver el comportamiento de las fuentes. En caso de que no exista energía en ninguno de los elementos almacenadores no se puede poner en marcha el auto. Cuando ocurre la condición anterior y se genera energía en el panel solar el vehículo se queda parado y se cargan el ultracapacitor y la batería, ya que esta es una fuente alternativa para aumentar la autonomía del vehículo. En caso de que solo un elemento almacenador tenga energía, este se encarga de cubrir la demanda del motor. Cuando ocurre la condición anterior y se genera energía en el panel solar, el convertidor de múltiples entradas se encarga del MPPT en este elemento. Si hay energía en la batería y en el ultracapacitor se utiliza este último para las aceleraciones, mientras que la batería se utiliza cuando el vehículo mantenga una velocidad constante.

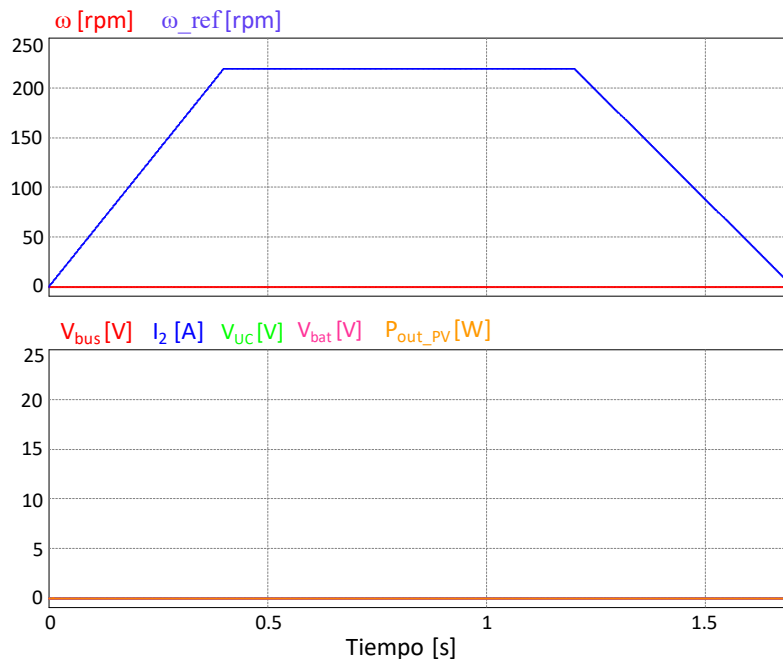


Figura 3.13. Comportamiento del sistema cuando no existe energía en los elementos almacenadores ni se encuentre generando energía el panel solar.

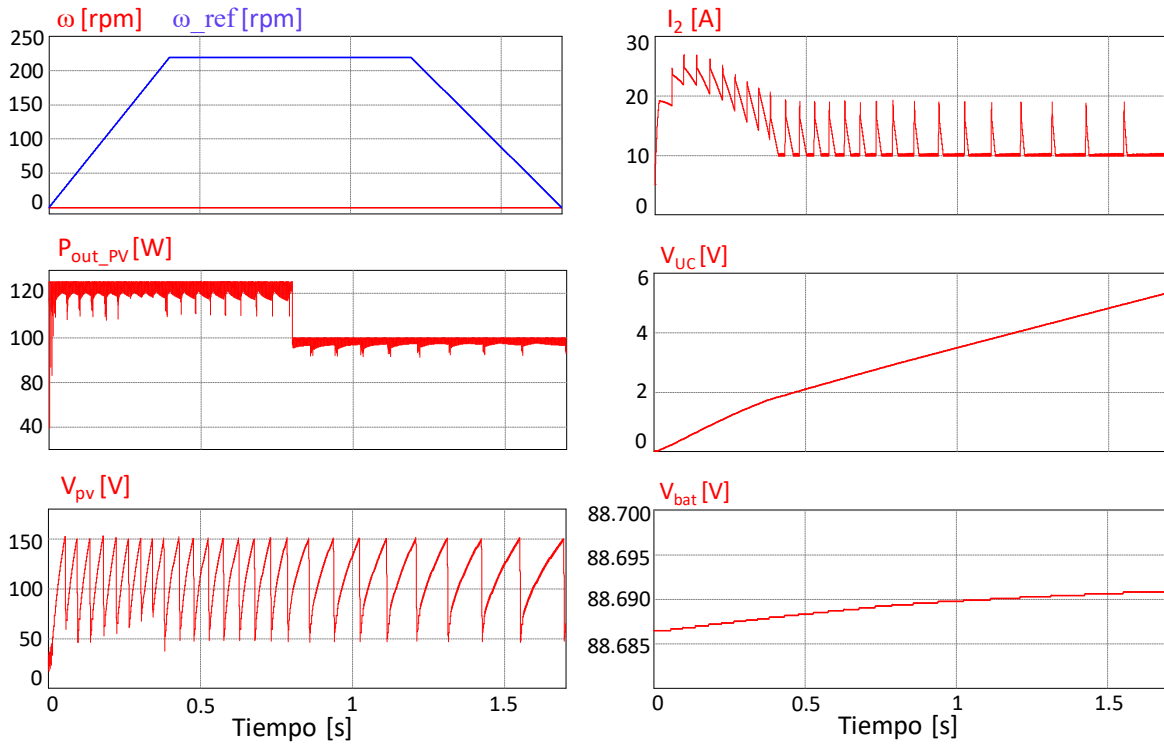


Figura 3.14. Comportamiento del sistema cuando no existe energía en los elementos almacenadores y se está generando energía en el panel solar.

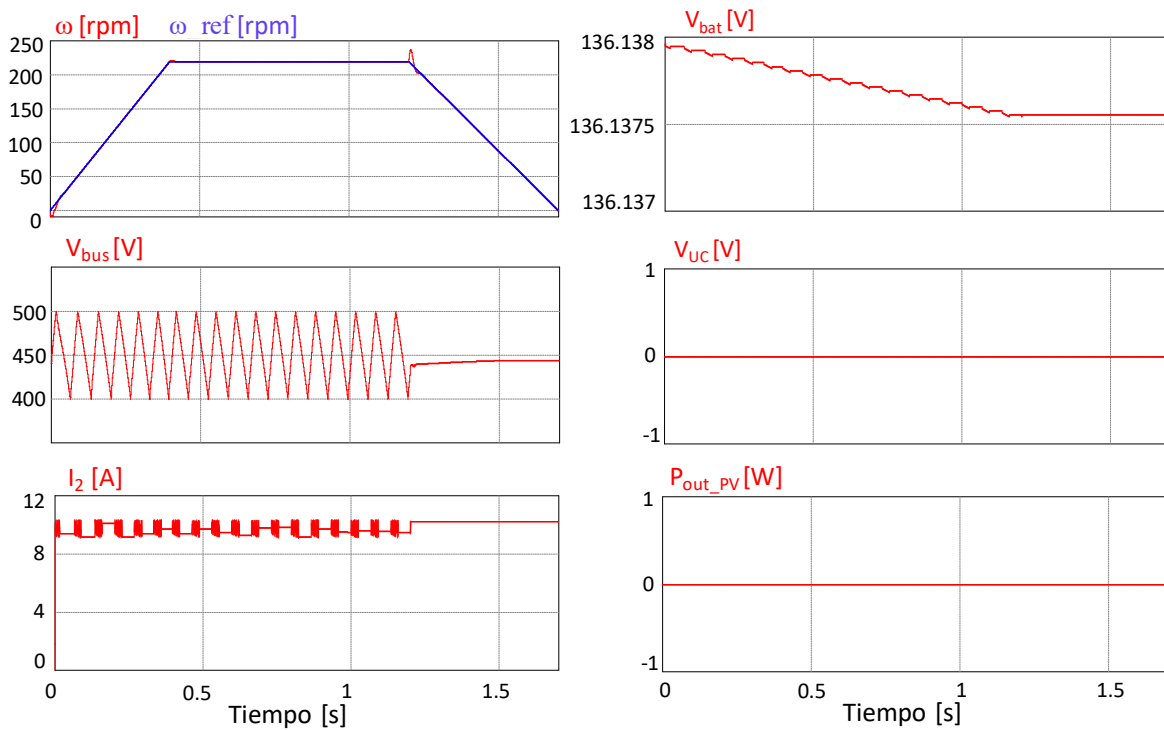


Figura 3.15. Comportamiento del sistema cuando hay energía en la batería y no se está generando energía en el panel solar.

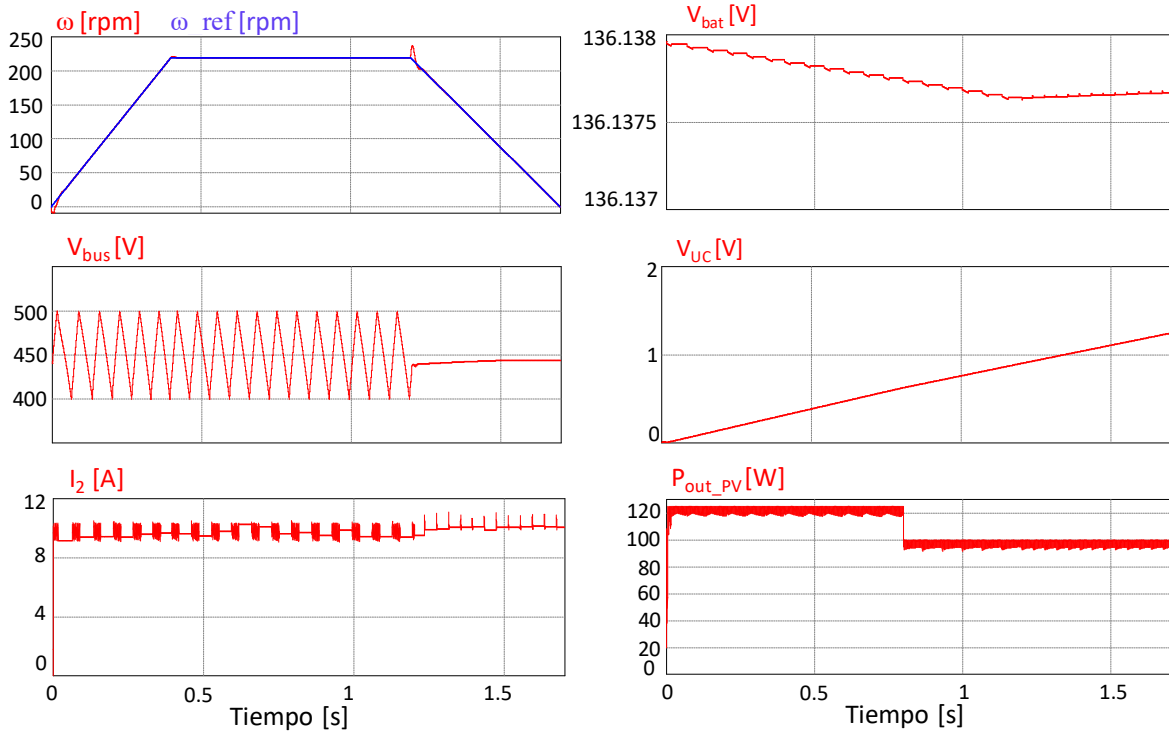


Figura 3.16. Comportamiento del sistema cuando hay energía en la batería y se está generando energía en el panel solar.

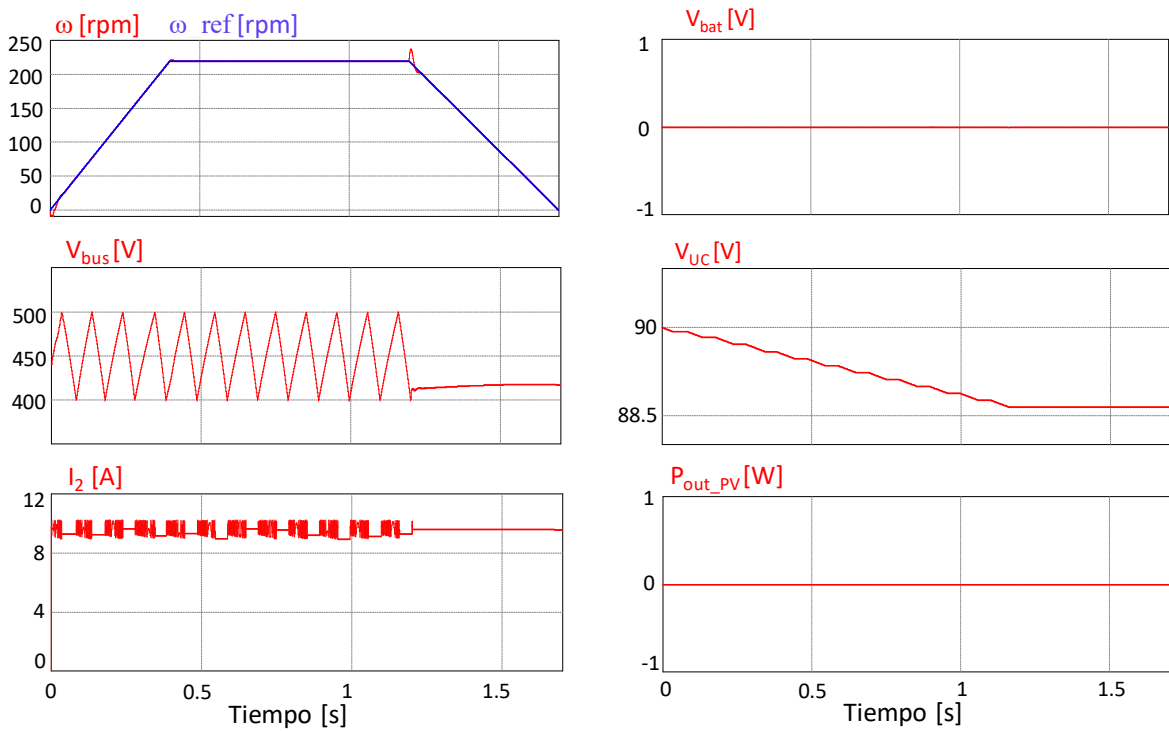


Figura 3.17. Comportamiento del sistema cuando hay energía en el ultracapacitor y no se está generando energía en el panel solar.

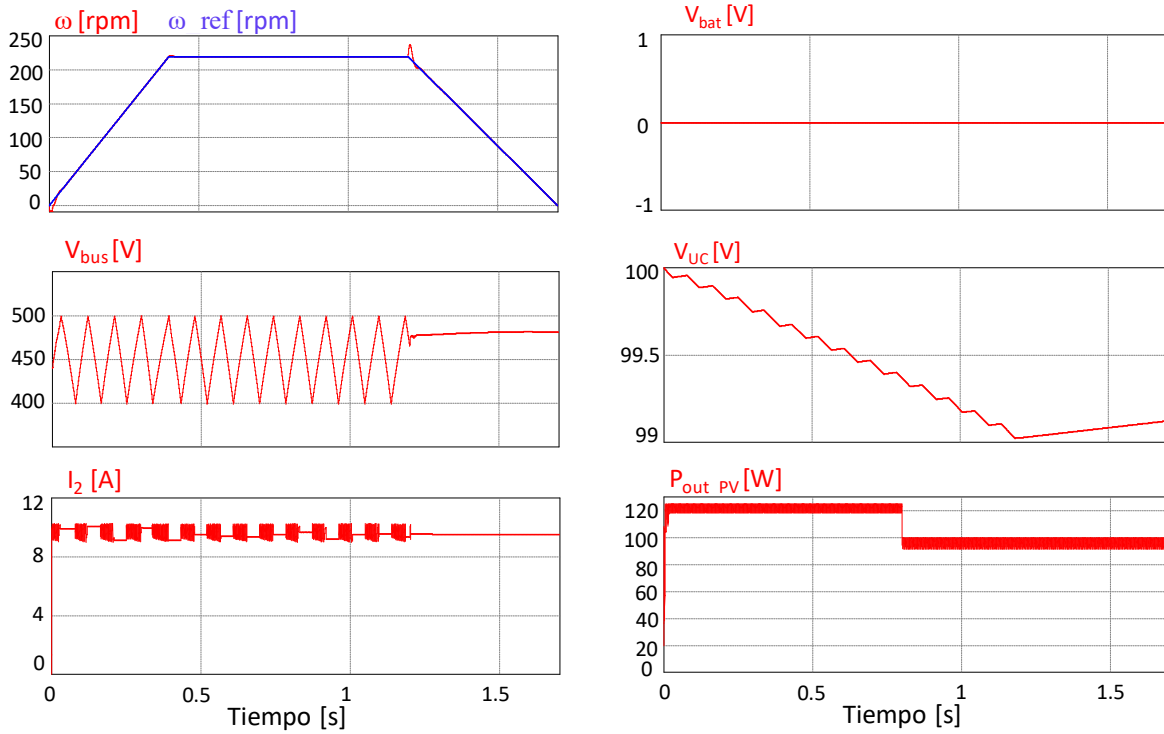


Figura 3.18. Comportamiento del sistema cuando hay energía en el ultracapacitor y se está generando energía en el panel solar.

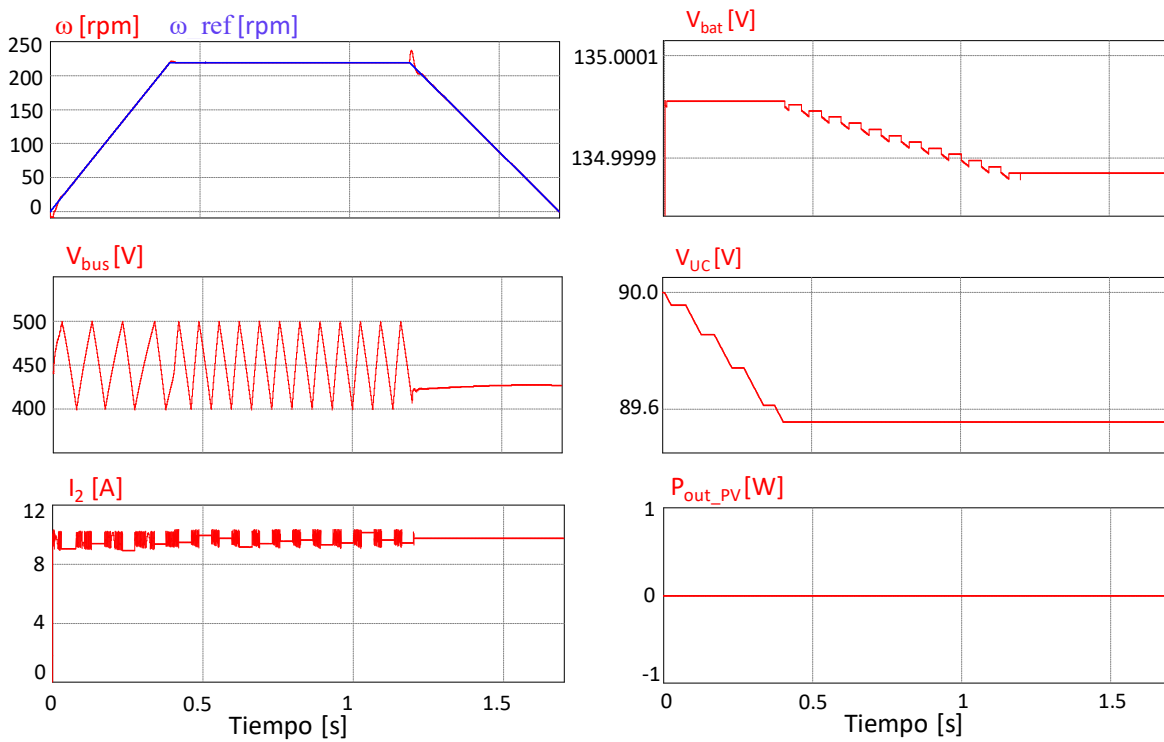


Figura 3.19. Comportamiento del sistema cuando hay energía en los elementos almacenadores y no se está generando energía en el panel solar.

Tabla 3.5. Comparación de los convertidores existentes con el propuesto.

<i>Convertidor</i>	<i>Bidireccional</i>	<i>Transferencia de energía directa entre entradas</i>	<i>Fuentes consideradas</i>	<i>Dispositivos necesarios para tres entradas</i>
[13]	Sí	No	V ₁ , V ₂ y V ₃ (Modular)	3 inductores 6 interruptores
[14]	Sí	No	Bat. y UC (Modular)	1 inductor 8 interruptores
[15]	Sí	Sí	Bat. y UC (Modular)	3 inductores 8 interruptores
[16]	Sí	No	V ₁ y V ₂ (Modular)	3 inductores 5 interruptores 3 diodos
[18]	No	Sí	FC, PV y Bat. (No modular)	2 inductores 4 interruptores 5 diodos
<i>Convertidor propuesto</i>	Sí	Sí	V ₁ , V ₂ y V ₃ (Modular)	1 inductor 10 interruptores

PV: Panel solar, FC: Celda de combustible, Bat.: Batería, UC: Ultracapacitor.

La tabla 3.5 presenta una comparación del convertidor propuesto con los existentes en la literatura. Para el convertidor propuesto se consideraron tres fuentes de tensión sin el panel solar, ya que en la mayoría de los convertidores existentes tampoco se considera esta fuente de energía. De esta manera, se eliminaría la necesidad del convertidor asociado al panel solar. A pesar de tener un mayor número de interruptores, no afecta tanto la eficiencia del sistema debido a que para cada transferencia se utilizan solo tres dispositivos: uno siempre encendido y dos que trabajan de manera complementaria.

Conclusiones

El calentamiento global es uno de los mayores desafíos en la actualidad para la especie humana. La principal causa de este cambio es la emisión de gases de efecto invernadero a la atmósfera. El sector del transporte es uno de los mayores contribuidores a las emisiones de CO₂, representando un 24 % del total de emisiones a nivel mundial. Una alternativa viable para disminuir las emisiones en este sector es la utilización de vehículos eléctricos y que estos sistemas se beneficien de las fuentes de energía renovable. La investigación sobre los convertidores CD-CD se han enfocado en aumentar sus funcionalidades y por tanto posibilitar un mejor aprovechamiento de la energía.

En este trabajo se presentó una topología de convertidor CD-CD de múltiples entradas y bidireccional para su aplicación en vehículos eléctricos o híbridos. Este convertidor permite la interacción de dos o más fuentes de energía con diferentes niveles de tensión con un bus de corriente directa. Puede ser operado en modo reductor o elevador para cada transferencia posible. Además, cada elemento del sistema puede ser fuente o destino en una transferencia.

Asimismo, se presentó un análisis detallado del funcionamiento del convertidor en los modos de operación de interés para la aplicación. Se generalizó una estrategia basada en el SMC para el control de las variables de estado del convertidor propuesto. Se logró el MPPT en el panel solar utilizando dos convertidores diferentes, basándose el algoritmo P&O. Al utilizar dos convertidores, permite mejorar la eficiencia del sistema y simplificar el control del mismo. Se logró el MPPT en el PMSG controlando la tensión en el capacitor del bus de corriente directa. Además, se desarrolló un gestor de la energía del sistema basado en reglas para decidir la transferencia correspondiente en cada momento. Este gestor permite decidir de dónde tomar la energía, por lo que hay un mejor aprovechamiento de la misma. Finalmente, se desarrolló un modelo de batería ión-litio, para poder simular este elemento el software PSIM versión 9.0.3.

Los resultados obtenidos en las simulaciones concuerdan con las formas de onda esperadas. Por tanto, se validó la operación y rendimiento del convertidor propuesto. Además, debido a la disposición de los interruptores, este convertidor

podiera interactuar con la red eléctrica para cargar algún elemento, o entregar energía a la misma. Por su versatilidad, este convertidor no solo queda limitado a su aplicación en vehículos eléctricos o híbridos; también puede ser utilizado en redes inteligentes, microrredes, como un recurso en sistemas distribuidos de energía, sistemas de administración de carga de baterías, etc., en cualquier aplicación donde se necesite la interacción de dos o más fuentes con la posibilidad de que la potencia pueda fluir en cualquier sentido.

Referencias bibliográficas

- [1] T. R. Anderson, E. Hawkins, and P. D. Jones, "CO₂, the greenhouse effect and global warming: from the pioneering work of Arrhenius and Callendar to today's Earth System Models," *Endeavour*, vol. 40, no. 3, pp. 178–187, 2016.
- [2] S. Solaymani, "CO₂ emissions patterns in 7 top carbon emitter economies: The case of transport sector," *Energy*, vol. 168, pp. 989–1001, 2019.
- [3] C. Sulzberger, "An early road warrior," *IEEE Power Energy Mag.*, vol. 2, no. 3, pp. 66–71, 2004.
- [4] S. Hosseinpour, H. Chen, and H. Tang, "Barriers to the wide adoption of electric vehicles: A literature review based discussion," *Portl. Int. Conf. Manag. Eng. Technol.*, vol. 2015-Septe, no. June 2016, pp. 2329–2336, 2015.
- [5] A. Jenn, K. Springel, and A. R. Gopal, "Effectiveness of electric vehicle incentives in the United States," *Energy Policy*, vol. 119, no. July 2017, pp. 349–356, 2018.
- [6] S. S. Williamson, A. K. Rathore, and F. Musavi, "Industrial Electronics for Electric Transportation: Current State-of-the-Art and Future Challenges," *IEEE Trans. Ind. Electron.*, vol. 62, no. 5, pp. 3021–3032, 2015.
- [7] J. De Santiago, H. Bernhoff, B. Ekergård, S. Eriksson, S. Ferhatovic, and R. Waters, "Electrical motor drivelines in commercial all," *IEEE Trans. Veh. Technol.*, vol. 61, no. 2, p. 12, 2012.
- [8] A. Ehsani, Mehrdad; Gao, Yimin; Gay, Sebastien; Emadi, *Modern Electric, Hybrid Electric, and Fuel Cell Vehicles*. CRC PRESS, 2005.
- [9] D. K. Bhatt and M. El Dariaby, "An Assessment of Batteries form Battery Electric Vehicle Perspectives," *2018 6th IEEE Int. Conf. Smart Energy Grid Eng. SEGE 2018*, pp. 255–259, 2018.
- [10] A. . Conti, S.; Di Mauro, S.; Raciti, A.; Rizzo, A.; Susinni, G.; Musumeci, S.;

- Tenconi, "Solar electric vehicles: state-of-art and perspectives.," in *AEIT International Annual Conference*, 2018.
- [11] S. F. Tie and C. W. Tan, "A review of energy sources and energy management system in electric vehicles," *Renew. Sustain. Energy Rev.*, vol. 20, pp. 82–102, 2013.
- [12] B. Sarlioglu, C. T. Morris, D. Han, and S. Li, "Driving Toward Accessibility," *IEEE Ind. Appl. Mag.*, vol. 23, no. 1, pp. 14–25, 2017.
- [13] L. Solero, A. Lidozzi, and J. A. Pomilio, "Design of multiple-input power converter for hybrid vehicles," *IEEE Trans. Power Electron.*, vol. 20, no. 5, pp. 1007–1016, 2005.
- [14] L. Kumar and S. Jain, "A novel multiple input DC-DC converter for electric vehicular applications," in *2012 IEEE Transportation Electrification Conference and Expo, ITEC 2012*, 2012, pp. 0–5.
- [15] A. Hintz, U. R. Prasanna, and K. Rajashekara, "Novel Modular Multiple-Input Bidirectional DC – DC Power Converter (MIPC) for," *IEEE Trans. Ind. Electron.*, vol. 62, no. 5, pp. 3163–3172, 2015.
- [16] F. Akar, Y. Tavlasoglu, E. Ugur, B. Vural, and I. Aksoy, "A Bidirectional Nonisolated Multi-Input DC-DC Converter for Hybrid Energy Storage Systems in Electric Vehicles," *IEEE Trans. Veh. Technol.*, vol. 65, no. 10, pp. 7944–7955, 2016.
- [17] F. Akar, Y. Tavlasoglu, and B. Vural, "An Energy Management Strategy for a Concept Battery/Ultracapacitor Electric Vehicle with Improved Battery Life," *IEEE Trans. Transp. Electrif.*, vol. 3, no. 1, pp. 191–200, 2017.
- [18] R. R. Ahrabi, H. Ardi, M. Elmi, and A. Ajami, "A Novel Step-Up Multiinput DC-DC Converter for Hybrid Electric Vehicles Application," *IEEE Trans. Power Electron.*, vol. 32, no. 5, pp. 3549–3561, 2017.

- [19] A. Mehta and B. Naik, "Introduction" in *Sliding Mode Controllers for Power Electronic Converters*, Springer book, 2019.
- [20] A. Mudhol and D. P. P. A J, "Design and Implementation of Boost Converter for Photovoltaic Systems," in *Ijireeice*, 2017, vol. 4, no. 2, pp. 110–114.
- [21] B. Hauke, "Basic Calculation of a Buck Converter's Power Stage," 2011.
- [22] B. Hauke, "Basic calculation of a boost converter's power stage," 2010.
- [23] L. J. Ruiz C, J. A. Beristáin J, I. M. Sosa T., and H. Hernández, "Estudio del Algoritmo de Seguimiento de Punto de Máxima Potencia Perturbar y Observar," *Rev. Ing. Eléctrica, Electrónica Y Comput.*, vol. 8, no. 1, pp. 17–23, 2010.
- [24] D. Zammit, C. S. Staines, A. Micallef, M. Apap, and J. Licari, "Incremental Current Based MPPT for a PMSG Micro Wind Turbine in a Grid-Connected DC Microgrid," *Energy Procedia*, vol. 142, pp. 2284–2294, 2017.
- [25] A. Adib and R. Dhaouadi, "Performance Analysis of Regenerative Braking in Permanent Magnet Synchronous Motor Drives," *Adv. Sci. Technol. Eng. Syst. J.*, vol. 3, no. 1, pp. 460–466, 2018.
- [26] PSIM, "Lithium-Ion Battery Model."
- [27] I. S. M. and P. G. B. T. J. Barlow, S Latham, *A reference book of driving cycles for use in the measurement of road vehicle emissions*, vol. 3. TRL Limited, 2009.
- [28] R. González-Oropeza, "Los ciclos de manejo, una herramienta útil si es dinámica para evaluar el consumo de combustible y las emisiones contaminantes del auto transporte," *Ing. Investig. y Tecnol.*, vol. 6, no. 3, pp. 147–162, 2005.