

# **Centro Nacional de Investigación y Desarrollo Tecnológico**

**Subdirección Académica**

**Departamento de Ingeniería Electrónica**

**TESIS DE MAESTRÍA EN CIENCIAS**

**Estrategia de Manejo de Energía para un Sistema de Potencia  
Híbrido en Vehículos Eléctricos**

presentada por  
**Ing. Luis Antonio Rosales Tejada**

como requisito para la obtención del grado de  
**Maestro en Ciencias en Ingeniería Electrónica**

Director de tesis  
**Dr. Abraham Claudio Sánchez**

Codirector de tesis  
**Dr. Jesús Darío Mina Antonio**

Cuernavaca, Mor., 9 de enero de 2017.

OFICIO No. DIE/005/2017  
Asunto: Aceptación de documento de tesis

**DR. GERARDO VICENTE GUERRERO RAMÍREZ**  
SUBDIRECTOR ACADÉMICO  
PRESENTE

Por este conducto, los integrantes de Comité Tutorial del **C. Luis Antonio Rosales Tejada** con número de control **M14CE080** de la Maestría en Ciencias en Ingeniería Electrónica, le informamos que hemos revisado el trabajo de tesis profesional titulado **"Estrategia de Manejo de Energía para un Sistema de Potencia Híbrido en Vehículos Eléctricos"** y hemos encontrado que se han realizado todas las correcciones y observaciones que se le indicaron, por lo que hemos acordado aceptar el documento de tesis y le solicitamos la autorización de impresión definitiva.

DIRECTOR DE TESIS

CODIRECTOR DE TESIS

Dr. Abraham Claudio Sánchez  
Doctor en Ciencias en Ingeniería Electrónica  
Cédula profesional 7675050

Dr. Jesús Darío Miranda Antonio  
Doctor en Ingeniería  
Cédula profesional 6094069

REVISOR 1

Dr. Jaime Eugenio Arau Roffiel  
Doctor en Ciencias en Ingeniería Electrónica  
Cédula profesional 9884229

REVISOR 2

Dr. Jesús Aguayo Alquicira  
Doctor en Ciencias en Ingeniería Electrónica  
Cédula profesional 4706315

C.p. M.T.I. María Elena Gómez Torres- Jefa del Departamento de Servicios Escolares.  
Estudiante  
Expediente

CMAZ/lrr



TECNOLÓGICO NACIONAL DE MÉXICO  
Centro Nacional de Investigación y Desarrollo Tecnológico

"30 Aniversario del Centro Nacional de Investigación y Desarrollo Tecnológico"

Cuernavaca, Mor., 16 de enero de 2017

**OFICIO No. SAC/071/2017**

**Asunto:** Autorización de impresión de tesis

**ING. LUIS ANTONIO ROSALES TEJADA**  
**CANDIDATO AL GRADO DE MAESTRO EN CIENCIAS**  
**EN INGENIERÍA ELECTRÓNICA**  
**PRESENTE**

Por este conducto, tengo el agrado de comunicarle que el Comité Tutorial asignado a su trabajo de tesis titulado "**Estrategia de Manejo de Energía para un Sistema de Potencia Híbrido en Vehículos Eléctricos**", ha informado a esta Subdirección Académica, que están de acuerdo con el trabajo presentado. Por lo anterior, se le autoriza a que proceda con la impresión definitiva de su trabajo de tesis.

Esperando que el logro del mismo sea acorde con sus aspiraciones profesionales, reciba un cordial saludo.

**ATENTAMENTE**

"CONOCIMIENTO Y TECNOLOGÍA AL SERVICIO DE MÉXICO"

**DR. GERARDO VICENTE GUERRERO RAMÍREZ**  
**SUBDIRECTOR ACADÉMICO**



SEP TecNM  
CENTRO NACIONAL  
DE INVESTIGACIÓN  
Y DESARROLLO  
TECNOLÓGICO  
SUBDIRECCIÓN  
ACADÉMICA

C.p. M.T.I. María Elena Gómez Torres- Jefa del Departamento de Servicios Escolares,  
Expediente

GVGR/mcr



Interior Internado Palmira S/N, Col. Palmira, C.P. 62490, Cuernavaca, Mor.  
Tels. (01) 777 362-77-70 Ext. 4106, e-mail: [direccion@cenidet.edu.mx](mailto:direccion@cenidet.edu.mx)  
[www.cenidet.edu.mx](http://www.cenidet.edu.mx)



*A mi familia  
por su gran apoyo*

# Agradecimientos

A mis padres por apoyarme en todos los momentos de mi vida y así mismo por ser mis más grandes motivadores para cumplir cualquier reto que se me presente.

A mis hermanos y amigos por compartir momentos de diversión y alegría y así mismo por motivarme a siempre dar lo mejor de mí.

A mis asesores, el Dr. Abraham Claudio Sánchez y el Dr. Jesús Darío Mina Antonio por brindarme su apoyo, su paciencia y su conocimiento durante el desarrollo de este tema de tesis.

A mis revisores de tesis, el Dr. Jaime Eugenio Arau Roffiel, el Dr. Jesús Aguayo Alquicira y el Dr. Víctor Hugo Olivares Peregrino por sus acertados comentarios y observaciones durante el desarrollo de esta tesis.

A mis profesores los doctores Jorge Hugo Calleja Gjumlich, Marco Antonio Oliver Salazar, Mario Ponce Silva y Carlos Aguilar Castillo por su gran apoyo y contribución en mi desarrollo académico.

Al Tecnológico Nacional de México (TecNM), por ser parte del compromiso de la educación de calidad en México.

Al Centro Nacional de Investigación y Desarrollo Tecnológico (CENIDET) por permitirme realizar una etapa más en mi desarrollo académico.

Al Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología (CONACyT), por solventar económicamente el desarrollo de esta investigación.

Al personal encargado del laboratorio de electrónica, el MC. Alfredo González y el Ing. Carlos Góngora por su apoyo brindado durante el desarrollo de esta tesis.

A la Lic. Lorena Ruiz y la Lic. Ana María Pérez, por su apoyo en los trámites de titulación.

A todos mis amigos que conocí durante mi estancia en CENIDET por los gratos momentos compartidos.

A mis amigos con los que compartí asesor por brindarme su apoyo y ayuda durante el desarrollo de esta tesis y así mismo por los gratos momentos que compartimos dentro y fuera de la escuela.

A mi amigo y compañero de generación primeramente por brindarme su amistad y así mismo por los gratos momentos que compartimos dentro y fuera de la escuela.

## RESUMEN

En esta tesis se presenta el desarrollo e implementación de un sistema de manejo de energía para un vehículo eléctrico.

El desarrollo comienza con el análisis de fuerzas que actúan sobre el VE con el cual se estima la energía requerida por el VE para realizar un trayecto a través de un ciclo de manejo conocido. Esta estimación permite llevar a cabo el dimensionamiento de los elementos que integran el sistema de potencia híbrido, el cual está compuesto por una celda de combustible, como fuente de energía principal, un banco de baterías y un banco de ultracapacitores, como unidades de almacenamiento de energía.

Posteriormente y como parte central del trabajo, se presenta el diseño de la estrategia de manejo de energía del tipo predictiva, la cual se encarga de distribuir los niveles de energía que cada una de las fuentes suministra, para satisfacer la demanda impuesta por el vehículo. Así mismo, se encarga de regular el voltaje del bus de CD a un nivel conveniente de acuerdo a la velocidad del vehículo. Esta estrategia es implementada y validada a través de pruebas de laboratorio y pruebas de pista, lo cual arroja resultados favorables que concluyen en el conocimiento del desempeño del vehículo eléctrico.

## ABSTRACT

In this work, the development and implementation of an energy management system for an electric vehicle is presented.

Development begins with the analysis of forces acting over the EV; this analysis allows the estimation of required energy to make a trip through a known drive cycle. This estimation allows the sizing of the elements that integrate the power hybrid system that is composed by a fuel cell, as the primary energy source, a battery bank and an ultracapacitor bank, as energy storage systems.

Then and as the main part of this work, the predictive energy management strategy is presented. This strategy has the task of distributing the energy levels that each one of the sources supplies to the system to satisfy the energy demands imposed by the vehicle. Also has the task of regulate the voltage of DC bus according to the speed of the vehicle. This strategy is implemented and validated with lab tests and with track tests that show favorable results that conclude with the knowledge of the performance of the electric vehicle.

# CONTENIDO

NOMENCLATURA.....	vii
ACRÓNIMOS .....	ix
CAPÍTULO 1. ....	1
INTRODUCCIÓN.....	1
<b>1.1. Antecedentes</b> .....	3
1.1.1 Vehículo Eléctrico .....	3
1.1.2 Sistema de potencia híbrido.....	4
1.1.3 Unidades de generación de energía .....	5
1.1.4 Unidades de almacenamiento de energía.....	6
1.1.5 Manejo de energía .....	8
<b>1.2. Planteamiento del problema</b> .....	9
<b>1.3. Objetivos</b> .....	9
1.3.1 General.....	9
1.3.2 Específicos.....	9
<b>1.4. Justificación</b> .....	9
<b>1.5. Estado del arte</b> .....	10
<b>1.6. Propuesta de solución</b> .....	12
CAPÍTULO 2. ....	13
ANÁLISIS Y DISEÑO DEL SISTEMA DE MANEJO DE ENERGÍA .....	13
<b>2.1 Análisis del vehículo eléctrico</b> .....	14
<b>2.2 Implementación del modelo del vehículo eléctrico</b> .....	16
<b>2.3 Estrategia de manejo de energía</b> .....	20
<b>2.4 Sistema de potencia híbrido</b> .....	21
<b>2.5 Elementos del sistema de potencia híbrido</b> .....	22
2.5.1 Celda de combustible.....	22
2.5.2 Baterías .....	23
2.5.3 Ultracapacitor .....	24
2.5.4 Acondicionadores de potencia.....	24

<b>2.6</b>	<b>Diseño de la estrategia de manejo de energía</b> .....	27
<b>2.7</b>	<b>Conclusión del capítulo</b> .....	31
	<b>CAPÍTULO 3.</b> ....	33
	<b>IMPLEMENTACIÓN DEL SISTEMA DE POTENCIA HÍBRIDO Y LA ESTRATEGIA DE MANEJO DE ENERGÍA</b> .....	33
<b>3.1</b>	<b>Implementación de los elementos del sistema de potencia híbrido</b> .....	34
3.1.1	Celda de combustible.....	34
3.1.2	Banco de baterías.....	35
3.1.3	Ultracapacitor .....	36
3.1.4	Acondicionadores de potencia.....	37
<b>3.2</b>	<b>Instrumentación del sistema de potencia híbrido</b> .....	38
3.2.1	Sensor de velocidad.....	38
3.2.2	Sensor de voltaje.....	39
3.2.3	Sensor de corriente .....	40
<b>3.3</b>	<b>Implementación de la estrategia de manejo de energía</b> .....	41
<b>3.4</b>	<b>Instalación del sistema de potencia híbrido</b> .....	44
3.4.1	Banco de pruebas.....	44
3.4.2	Instalación del sistema de potencia híbrido en el vehículo eléctrico.....	45
<b>3.5</b>	<b>Conclusión del capítulo</b> .....	47
	<b>CAPÍTULO 4.</b> ....	48
	<b>PRESENTACIÓN DE RESULTADOS</b> .....	48
<b>4.1</b>	<b>Definición de las pruebas a realizar</b> .....	49
<b>4.2</b>	<b>Resultados obtenidos</b> .....	50
4.2.1	Pruebas de laboratorio .....	50
4.2.2	Pruebas en pista .....	57
	<b>CAPÍTULO 5.</b> ....	59
	<b>CONCLUSIÓN Y TRABAJOS FUTUROS</b> .....	59
<b>5.1</b>	<b>Conclusiones</b> .....	60
<b>5.2</b>	<b>Trabajos futuros</b> .....	60
	<b>REFERENCIAS</b> .....	62

ANEXOS .....	66
<b>Anexo A. Especificaciones de baterías y ultracapacitores.....</b>	<b>67</b>
<b>Anexo B. Especificaciones del sensor de voltaje, sensor de corriente y plataforma de desarrollo NI myRio .....</b>	<b>69</b>

## LISTA DE FIGURAS

Figura 1.1. Diagrama de un sistema de potencia híbrido. ....	4
Figura 2.1. Fuerzas que actúan sobre el vehículo. ....	14
Figura 2.2. Transmisión del vehículo. ....	15
Figura 2.3. Interfaz del modelo del VE. ....	16
Figura 2.4. Emulador del VE. ....	17
Figura 2.5. Ciclo de manejo ECE-15. ....	18
Figura 2.6. Potencia y energía del VE. ....	19
Figura 2.7. Velocidad angular y torque del motor de inducción. ....	19
Figura 2.8. Interacción de los subsistemas que integran el SME. ....	20
Figura 2.9. Esquema de distribución de potencia. ....	21
Figura 2.10. Sistema de potencia híbrido. ....	22
Figura 2.11. Curva de polarización de la celda de combustible. ....	23
Figura 2.12. a) Convertidor reductor intercalado; b) Convertidor bidireccional. ....	24
Figura 2.13. Compensador tipo II. ....	26
Figura 2.14. Diagrama de convertidor con lazo de control de corriente de salida y circuito de protección. ....	27
Figura 2.15. Modos de operación del VE. ....	28
Figura 2.16. Esquema de conexiones del NI myRio. ....	31
Figura 3.1. Diagrama del sistema de potencia híbrido con elementos de seguridad incluidos. ....	34
Figura 3.2. Celda de combustible fabricada por el INEEL [37]. ....	35
Figura 3.3. a) Banco de baterías; b) Sistema de manejo de baterías. ....	35
Figura 3.4. Ultracapacitor. ....	36
Figura 3.5. a) Convertidor de la celda de combustible; b) Convertidor del banco de baterías. ....	38
Figura 3.6. Configuración del circuito convertidor de frecuencia a voltaje. ....	39

Figura 3.7. Circuito auxiliar del sensor de voltaje.....	40
Figura 3.8. Tarjeta del sensor de voltaje.....	40
Figura 3.9. Conexión requerida para el sensor de corriente. ....	40
Figura 3.10. a) Etapa de precarga del banco de capacitores; b) Etapa de definición del nivel de voltaje del bus de CD; c) Etapa de distribución de corrientes.....	42
Figura 3.11. Diagrama de bloques del funcionamiento de la EME.....	43
Figura 3.12. Panel frontal del programa realizado en LabVIEW.....	44
Figura 3.13. Banco de pruebas utilizado para la implementación de la EME.....	45
Figura 3.14. Ubicación de la celda de combustible y su convertidor. ....	45
Figura 3.15. Ubicación del banco de baterías y su convertidor.....	46
Figura 3.16. Ubicación del UC, driver del motor y motor del VE. ....	46
Figura 3.17. Vehículo eléctrico y distribución del sistema de potencia híbrido. ....	47
Figura 4.1. Ciclo de manejo utilizado para la prueba. ....	49
Figura 4.2. Ensamble final del vehículo eléctrico. ....	50
Figura 4.3. Banco de pruebas implementado en laboratorio. ....	51
Figura 4.4. Voltaje del bus de CD. ....	52
Figura 4.5. Velocidad del VE. ....	53
Figura 4.6. Corriente demandada por el sistema de tracción del VE. ....	53
Figura 4.7. Corriente entregada por el convertidor de la celda de combustible. ....	54
Figura 4.8. Corriente entregada por el convertidor del banco de baterías.....	54
Figura 4.9. Corriente del ultracapacitor.....	56
Figura 4.10. Distribución de corriente entre las fuentes de energía. ....	56
Figura 4.11. Preparación para pruebas de pista y tramo recto para prueba de desempeño. ....	57

## LISTA DE TABLAS

Tabla 1.1. Métodos para recuperar energía mediante el frenado regenerativo.....	6
Tabla 2.1. Parámetros para la simulación del modelo del VE.....	18
Tabla 2.2. Características del ciclo de manejo ECE-15. ....	18
Tabla 2.3. Variables utilizadas por la EME.....	31
Tabla 3.1. Especificaciones de la celda de combustible.....	35
Tabla 3.2. Especificaciones del banco de baterías.....	36
Tabla 3.3. Especificaciones del banco de ultracapacitores.....	36
Tabla 3.4. Especificación de los convertidores. ....	37
Tabla 3.5. Rangos de las variables de la EME. ....	41
Tabla 4.1. Caracterización del VE.....	58

## NOMENCLATURA

$\alpha$	Ángulo de inclinación
$\eta_{c1}$	Eficiencia del convertidor de la celda de combustible
$\eta_{c2}$	Eficiencia del convertidor del banco de baterías
$\eta_{motor}$	Eficiencia del motor eléctrico
$\eta_T$	Eficiencia global del VE
$\eta_{tm}$	Eficiencia de la transmisión mecánica
$\rho$	Densidad del viento
$\tau_t$	Torque total
$\omega_L$	Velocidad angular en el eje de las ruedas
$\omega_m$	Velocidad angular en el eje del motor
A	Ampere
$A_c$	Área de contacto del VE
Ah	Ampere hora
C	Coefficiente aerodinámico
$C_{bat}$	Capacidad de baterías
$C_{cap}$	Capacidad del capacitor
D	Ciclo de trabajo
$E_{bat}$	Energía de baterías
$E_{cap}$	Energía del capacitor
$F_a$	Fuerza aerodinámica
$F_g$	Fuerza de ascensión
$F_r$	Fuerza de rodamiento
$F_t$	Fuerza de tracción total
$F_{IN}$	Frecuencia de entrada del convertidor de frecuencia a voltaje
$f_r$	Coefficiente de fricción
$FC_{estado}$	Señal de estado de la celda de combustible
$FC_{on-off}$	Señal para activar y desactivar la celda de combustible
G	Relación de transmisión
g	Gravedad
$i_{bb}$	Corriente de salida del convertidor del banco de baterías
$i_{cc}$	Corriente de salida del convertidor de la celda de combustible
$i_{ccmax}$	Corriente máxima de salida del convertidor de la celda de combustible

$i_{\text{driver}}$	Corriente demandada por el sistema de tracción del VE
$I_P$	Corriente medida por el sensor de corriente
$I_{PN}$	Corriente nominal del sensor de corriente
$i_{uc}$	Corriente del ultracapacitor
$J$	Momento de inercia
kg	Kilogramos
km/h	Kilómetros por hora
kW	Kilowatt
kWh	Kilowatt hora
m	Masa del VE
min	Minutos
R	Resistencia de salida del convertidor
r	Radio de la rueda
rad	Radianes
rad/s	Radianes por segundo
rev	Revolución
rpm	Revoluciones por minuto
s	Segundos
$T_s$	Periodo de la señal de conmutación
V	Volts
$V_{\text{bat}}$	Voltaje nominal de baterías
$V_{\text{bus}}$	Voltaje del bus de CD
$V_c$	Voltaje de alimentación del sensor de corriente
$V_{\text{cap}}$	Voltaje nominal del capacitor
$V_{\text{inf}}$	Nivel de voltaje bajo
$V_{\text{med}}$	Nivel de voltaje intermedio
$V_o$	Voltaje de salida del convertidor de frecuencia a voltaje
$V_{\text{ref}}$	Voltaje de referencia
$V_{\text{sup}}$	Nivel de voltaje alto
W	Watt
Wh	Watt hora

## ACRÓNIMOS

BMS	Sistema de manejo de baterías <sup>1</sup>
CD	Corriente directa
EME	Estrategia de manejo de energía
MOSFET	Transistor de efecto de campo de metal óxido
PEMFC	Celda de combustible de membrana intercambiadora de protones <sup>1</sup>
PWM	Modulador por ancho de pulso <sup>1</sup>
REM	Representación energética macroscópica
SME	Sistema de manejo de energía
SoC	Estado de carga <sup>1</sup>
SPH	Sistema de potencia híbrido
UC	Ultracapacitor
VCI	Vehículo de combustión interna
VE	Vehículo eléctrico
VEH	Vehículo eléctrico híbrido

---

<sup>1</sup> Por sus siglas en inglés

# **CAPÍTULO 1.**

## **INTRODUCCIÓN**

---

En este capítulo se describe de manera breve los antecedentes de los vehículos eléctricos, sistemas de potencia y, almacenamiento, así como una revisión del estado del arte de estrategias de manejo de energía, se explica la problemática que se intenta resolver. También se presentan el objetivo general, objetivos específicos, y la propuesta de solución para el desarrollo de este tema de tesis.

---

El automóvil constituye una parte esencial en la vida cotidiana del ser humano, sin embargo, el mercado actual es ampliamente dominado por vehículos con motor de combustión interna (VCI), los cuales son una fuente importante en la producción de gases de efecto invernadero, causantes del calentamiento global y problemas de salud en otros [1] y [2].

Además de la contaminación causada por los VCI también es importante señalar que existen otros problemas colaterales tales como el encarecimiento del combustible debido a su amplia demanda y a la disminución de reservas de hidrocarburos y es por ello que el desarrollo de vehículos amigables con el medio ambiente ha tomado gran relevancia [3], [4], [5] y [6].

Por esta razón, el desarrollo de vehículos eléctricos (VE) resurge después de un largo tiempo en espera. Lo anterior gracias al avance tecnológico que se ha alcanzado en las últimas décadas en las diferentes áreas que convergen en el desarrollo de vehículos eléctricos, como mecánica, eléctrica, electrónica, entre otras [7].

El VE resulta ser una opción muy interesante debido a que no genera agentes contaminantes al medio ambiente y son más eficientes que los VCI, sin embargo, su implementación tiene un nivel de complejidad que va de acuerdo con el diseño del mismo, esto debido a que se busca diseñar VE ligeros que permitan alcanzar buenas presentaciones en velocidad, aceleración, autonomía, entre otras [8].

Una de las principales especificaciones de diseño del VE es la selección del sistema de potencia híbrido (SPH), ya que esto va asociado con la autonomía del VE. Sin embargo, su diseño tiene implicaciones de dimensionamiento a nivel tamaño, peso, energía y potencia.

Actualmente se ha observado que los vehículos basados en celdas de combustible tienen el potencial de combatir los problemas que rodean a los vehículos con motor de combustión interna sin embargo, aún persisten algunos retos para poder ver a estos vehículos en las calles de los cuales destaca el alto costo de esta tecnología [9].

Debido a las características de las celdas de combustible, difícilmente se usan solas dentro del sistema de potencia de un VE y por esta razón existe la tendencia actual de combinar la función de la celda de combustible como unidad generadora junto con unidades de almacenamiento de energía, las cuales complementen el funcionamiento de las celdas. A este tipo de configuraciones se les conoce como híbridas debido a que utilizan más de una fuente para suministrar energía hacia la carga [10], [11] y [12].

Para el trabajo de tesis actual, la configuración del SPH cuenta con una celda de combustible y un banco de baterías conectados a un bus de CD mediante convertidores CD-CD y un banco de ultracapacitores conectado directamente al bus de CD.

Al hibridar los sistemas de potencia se busca minimizar el volumen, peso y costo así como maximizar la capacidad de aceleración y autonomía del VE.

Sin embargo, es necesario definir una estrategia de manejo de energía para coordinar la cantidad de energía que cada una de las fuentes entregará al sistema de tracción del VE en todo momento así como controlar la generación y almacenamiento de energía para el correcto funcionamiento del VE [9].

## **1.1. Antecedentes**

Durante muchos años, la movilidad del ser humano ha dependido ampliamente del petróleo y del motor de combustión interna.

De los 1,200 millones (1.2 billones) de vehículos que circulan en el planeta, más del 90% tienen como principal fuente de energía productos derivados del petróleo [13].

Sin embargo, el propio sector automotriz reconoce que el motor de combustión interna tiende a ser obsoleto ya que tiene índices de eficiencia energética muy bajos, es decir, menos del 30% de la energía contenida en el combustible llega realmente a las ruedas. Además las emisiones siguen siendo elevadas a pesar de las mejoras tecnológicas [14] y [15].

Por muchos años, se ha buscado una solución a este problema, lo cual lleva al desarrollo de VE. Este tipo de vehículos tiene la capacidad de satisfacer las necesidades de movilidad cotidiana y al mismo tiempo es amigable con el medio ambiente ya que al ser impulsado por electricidad, no emite agentes contaminantes hacia el medio ambiente [16].

### **1.1.1 Vehículo Eléctrico**

El VE es una tecnología pensada muchos años atrás, sin embargo, debido a las mejoras tecnológicas que se tenían, su evaluación se vio frenada y no hubo avances significativos. Este tipo de vehículos surgió alrededor del siglo XIX y decayó a principios del siglo XX. Sin embargo, durante la crisis del petróleo en 1973, la idea de estos resurgió [7].

El VE utiliza un motor eléctrico y un conjunto de fuentes de alimentación y almacenamiento en donde la energía eléctrica se transforma en energía mecánica a través de un motor de inducción [17] y [18].

Los principales retos del VE son el maximizar la autonomía, mejorar su desempeño y seguridad, así mismo minimizar el peso y el costo del vehículo y para ello se han buscado nuevas formas de fuentes de energías no convencionales que sean capaces de cumplir con los requerimientos energéticos del VE [19].

### 1.1.2 Sistema de potencia híbrido

Debido a las demandas energéticas en los VE, es necesario contar con SPH, es decir, un sistema de potencia formado por distintas fuentes, ya que como se menciona en [9], es difícil cumplir los requerimientos energéticos impuestos por el VE con una sola fuente de energía.

Una de las ventajas de hibridar los sistemas de potencia es que permite un mejor aprovechamiento de las características de los distintos tipos de fuentes de energía, por ejemplo, la densidad de potencia, densidad de energía, vida útil y su respuesta dinámica, entre otras.

Así mismo, el SPH es el encargado de suministrar la energía que requiere el vehículo en todo momento tanto para el sistema de tracción como para algunas cargas auxiliares. La figura 1.1 muestra un esquema de los elementos que conforman al SPH.

En esta figura se observa que un SPH puede contar con 'n' número de fuentes de alimentación, las cuales dependiendo de sus características, pueden ser conectadas mediante convertidores CD/CD al bus de CD o eventualmente de manera directa y sin procesamiento de energía.

En general se busca que las 'n' fuentes de alimentación sean capaces de suministrar la energía requerida por el driver del motor de inducción para todo momento.

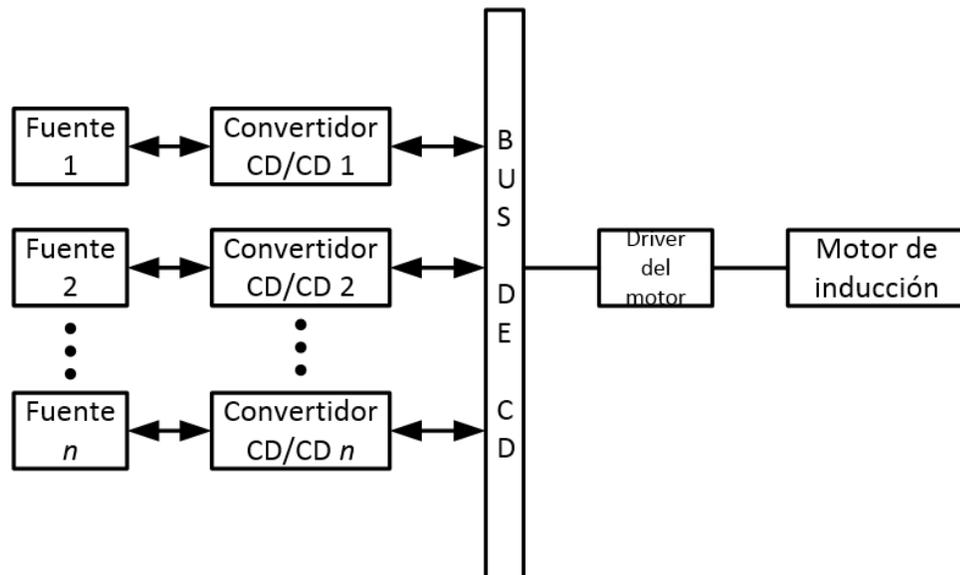


Figura 1.1. Diagrama de un sistema de potencia híbrido.

### 1.1.3 Unidades de generación de energía

Actualmente existen distintas unidades de generación de energía en los VE, entre las que se encuentran las celdas de combustible, las celdas fotovoltaicas, el generador termoeléctrico automotriz y el frenado regenerativo. De estas cuatro unidades de generación de energía las celdas de combustible y el frenado regenerativo han sido una tendencia en la implementación en los VE [20].

La celda de combustible es un dispositivo que tiene la capacidad de convertir energía química en potencia eléctrica, donde la cantidad de energía del hidrógeno que es convertida en electricidad depende del punto de operación de la celda de combustible.

Existen diversos tipos de celdas de combustible, los cuales pueden variar sus características y desempeño en función del tipo de electrolito y del tipo de catalizador que acelera la reacción química. En [9] se definen los principales tipos de celdas de combustible de acuerdo a lo siguiente:

1. Celda de combustible alcalina.
2. De membrana intercambiadora de protones (PEM).
3. De ácido fosfórico.
4. De óxido sólido.

Cada uno de los tipos de celdas mencionados tiene ventajas y desventajas, sin embargo la celda de membrana intercambiadora de protones (PEM) generalmente es considerada la mejor opción para aplicaciones móviles, debido a su baja temperatura de operación, alta eficiencia, alta densidad de potencia, arranque rápido y potencial para su construcción a un bajo costo.

Aunque la celda de combustible proporciona una salida de voltaje en CD, este voltaje solo es constante si las condiciones de operación (carga, temperatura, presión, humedad, etc.) son también constantes.

Cuando un vehículo se encuentra en modo de frenado, parte de la energía cinética durante el movimiento del vehículo, es recuperada y puede ser almacenada en las unidades de almacenamiento disponibles. Este proceso se conoce como frenado regenerativo.

Actualmente existen cuatro maneras de aprovechar la energía recuperada durante el frenado regenerativo [21].

En la primera, la energía recuperada, es almacenada dentro de un sistema de almacenamiento de energía que puede ser un banco de baterías o de ultracapacitores.

Para el segundo caso, se utiliza un motor el cual puede almacenar la energía en pequeños recipientes a través de aire comprimido.

Otro caso es almacenar la energía en volantes de inercia en forma de energía de rotación (del inglés KERS).

Por último, se propone almacenar la energía del frenado regenerativo como energía gravitacional (energía potencial) a través de un resorte.

La tabla 1.1 resume las distintas formas de recuperar la energía mediante el frenado regenerativo y así mismo la energía que puede ser recuperada mediante el uso de diferentes procesos de conversión de energía.

**Tabla 1.1. Métodos para recuperar energía mediante el frenado regenerativo.**

Mecanismo de almacenamiento	Conversión de la energía	Energía recuperada
Almacenamiento de energía eléctrica	Motor eléctrico/Generador	~50%
Almacenamiento de energía en gas comprimido	Motor hidráulico	>70%
Almacenamiento de energía en volantes de inercia	Energía cinética rotacional	>70%
Almacenamiento de energía gravitacional	Sistema de almacenamiento en resortes	-

En general se concluye que la celda de combustible del tipo PEM es la opción más viable para integrarse en el SPH debido a las características mencionadas anteriormente, sin embargo, es necesario la implementación de una EME, la cual considere la dinámica de respuesta de la celda de combustible para que esta opere dentro de su zona segura de operación en todo momento.

## **1.1.4 Unidades de almacenamiento de energía**

### **1.1.4.1 Baterías**

En la práctica la batería es la unidad de almacenamiento de energía más utilizada, sin embargo, existen otros dispositivos de almacenamiento de energía como el ultracapacitor, el volante de inercia, el tanque de hidrógeno, etc. Estos elementos de almacenamiento pueden usarse como una fuente de energía auxiliar [20].

La batería es un dispositivo de almacenamiento que consiste en una o más celdas electroquímicas que convierten la energía química almacenada en energía eléctrica. Existen diferentes características que se deben tomar en cuenta al seleccionar la batería más apropiada para un VE. La más significativa de estas características, es la capacidad de la batería, la cual

se mide en ampere-horas (Ah), seguida de esta, se debe considerar la energía almacenada en la batería (capacidad \* voltaje promedio durante la descarga) medida en watt-horas (Wh). Otra consideración importante, es el estado de carga de la batería.

Actualmente existen diversos tipos de baterías, las cuales presentan distintas características. Para el caso particular de los VE, usualmente se opta entre baterías de plomo ácido, níquel cadmio, níquel metal-hidruro y litio. A continuación se da una breve descripción de estos tipos de baterías.

- Plomo ácido: Este tipo de batería ha sido utilizada durante muchos años, está disponible fácilmente y es altamente reciclable y relativamente barata. Sin embargo, este tipo de baterías presentan baja densidad de energía y vida útil baja.
- Níquel cadmio: Este tipo de baterías presentan una extensa vida útil y debido a su baja resistencia interna es una buena opción para los altos niveles de descarga que se pueden presentar en la operación del VE. Sin embargo, sufre de baja densidad de energía y debido al cadmio genera problemas ambientales.
- Níquel metal-hidruro: Este tipo de batería tiene buenos compromisos entre potencia y densidad de energía, vida útil, costo, etc. Sin embargo, su nivel de auto-descarga es alto y tiene una difícil estimación del estado de carga.
- Litio: Este tipo de baterías puede ser dividido en cuatro categorías: litio-metal, litio-metal polímero, litio-ion y litio-ion polímero. Las más utilizadas son las de litio-ion ya que tienen un alto ciclo de vida y una densidad de potencia y energía sobresaliente.

Para el actual trabajo se escogieron las baterías de litio-ion debido a las características que presentan, sin embargo por ser una tecnología relativamente nueva, su costo aún es elevado.

#### **1.1.4.2 Ultracapacitor**

El ultracapacitor o supercapacitor (UC) tiene una estructura similar a la de un capacitor común. La diferencia es que el UC tiene una alta capacitancia (alta capacidad de energía). Sus principales características son que cuenta con una operación libre de mantenimiento y un mayor ciclo de vida en ambientes con variaciones de temperatura.

Actualmente existen tres tipos de tecnología en UC usados en VE, estos son el eléctrico de doble capa, pseudocapacitores y capacitores híbridos. La diferencia entre estos ultracapacitores son los mecanismos de almacenamiento y los materiales utilizados en su

fabricación. La vida útil del UC puede alcanzar los 40 años, por lo cual es el dispositivo con mayor tiempo de vida dentro del sistema de almacenamiento de energía [9].

En aplicaciones de VE donde el UC forma parte del SPH, dicho dispositivo aporta una serie de beneficios importantes como la posibilidad de ser conectado directamente al bus de CD, el UC puede responder ante dinámicas de demanda de energía elevadas, es decir, entregar grandes cantidades de energía en periodos de tiempo cortos.

Uno de estos beneficios es que al ser conectado directamente al bus de CD el UC conserva su respuesta dinámica, la cual le permite entregar grandes cantidades de energía en periodos de tiempo muy cortos.

Esta parte es importante ya que estas dinámicas suelen presentarse en las aceleraciones del vehículo y uno de los objetivos de hibridar los sistemas de potencia es cumplir con las expectativas del usuario.

El utilizar baterías y UC como fuentes de energía auxiliar en el SPH permite alcanzar una mayor autonomía del VE y un mejor desempeño. Sin embargo, como se ha venido mencionando se requiere la implementación de una EME para coordinar el flujo de energía entre las unidades de generación y almacenamiento de energía para cumplir los objetivos y tener un mejor aprovechamiento de la energía de cada una de las fuentes.

### **1.1.5 Manejo de energía**

El VE ha resurgido debido al avance en la tecnología de la electrónica de potencia debido a que esta tiene un rol importante en la conversión, transferencia, conexión y el control de las fuentes de energía [7], [20] y [22].

El manejo de energía tiene como propósito el asegurar que el usuario obtenga toda la energía necesaria cuando y donde la requiera. El principal objetivo del manejo de energía en VE es maximizar los beneficios y minimizar los costos. Algunos otros objetivos que deben cumplir son el mejorar la eficiencia energética, reducir las emisiones de agentes contaminantes al medio ambiente, reducir los impactos de cortes de energía, caídas de tensión e interrupciones de energía [23] y [24].

Una estrategia de manejo de energía es básicamente un algoritmo, el cual está desarrollado a través de diferentes métodos, y puede perseguir diferentes objetivos. Uno de los principales objetivos que debe de satisfacer un algoritmo de manejo de energía es cumplir con la expectativa de desempeño del operador del vehículo [9].

## **1.2. Planteamiento del problema**

Anteriormente se ha mencionado que el VE cuenta con distintas fuentes de alimentación (celda de combustible, ultracapacitores y baterías), capaces de proporcionar la energía requerida para cualquier instante del vehículo, desde un arranque que demande cantidades elevadas de energía, hasta un estado estable, en el que el vehículo no requiera una demanda de energía elevada.

El problema principal se debe a que al hibridar los sistemas de potencia aparecen retos importantes dentro de los cuales destaca el encargarse de la distribución de energía entre las fuentes que integran el SPH.

Esta distribución se logra a través de una EME capaz de satisfacer las demandas energéticas impuestas por el VE considerando la dinámica de cada una de las fuentes de alimentación ya que se sabe que el desempeño de las diferentes fuentes está fuertemente ligado a sus características naturales y es por ello que es necesario utilizarlas cuando mejor se comporten.

## **1.3. Objetivos**

### **1.3.1 General.**

Diseñar una estrategia de manejo de energía para un sistema de potencia híbrido en vehículos eléctricos.

### **1.3.2 Específicos.**

- Estimar el consumo energético del VE para un perfil de manejo conocido.
- Emular un perfil de manejo para el VE.
- Asimilar las distintas estrategias de manejo de energía reportadas en la literatura.
- Validar la estrategia de manejo de energía seleccionada.

## **1.4. Justificación**

Actualmente existe la tendencia mundial para proteger el medio ambiente de agentes contaminantes de los cuales los vehículos con motor de combustión interna aportan una cantidad considerable. Una solución a este problema es el desarrollo de VE impulsados por sistemas de potencia con distintas fuentes de energía para así lograr un mejor desempeño del vehículo. Sin embargo, el tener un SPH implica la implementación de una estrategia de manejo de energía.

En este tipo de VE, donde se cuenta con varias fuentes de energía disponibles para la operación del mismo, resulta estratégico contar con una estrategia de manejo de energía.

El uso de estas estrategias es importante para tener una distribución de energía entre las fuentes que integran el SPH adecuada, lo cual proporciona beneficios que repercuten directamente en la factibilidad del desarrollo de los VE (aumento en la autonomía del vehículo, mejora en la respuesta a las necesidades de potencia y prolongación de la vida útil).

### **1.5. Estado del arte**

En la literatura se han propuesto diversas EME las cuales se dividen en dos áreas que son las EME basadas en reglas y las EME basadas en optimización.

Las EME basadas en reglas se enfocan en hacer uso de información conocida como son la experiencia humana, la heurística, la intuición, modelos matemáticos y los ciclos de manejo. Estas características facilitan la implementación de este tipo de EME y además suelen ser robustas.

Por otro lado las EME basadas en optimización se enfocan en operaciones analíticas o numéricas que son capaces de minimizar la función costo, sin embargo, este tipo de EME requiere de un sistema de procesamiento robusto para realizar su función correctamente.

A continuación se muestra el análisis de las distintas EME reportadas en la literatura.

Yuan Zhu et al [25], consideran una configuración del sistema de tren de potencia para el reparto de la energía en la cual existen dos fuentes conectadas a la transmisión. La primera de ellas, es una combinación de los subsistemas del motor y del generador utilizando un conjunto de engranes planetarios para conectarse entre sí. Este conjunto, es visto como un repartidor de energía que reparte la potencia de salida del motor entre la transmisión y el generador. La segunda, cuenta con subsistema de motor eléctrico donde el subsistema de baterías es el sistema de almacenamiento de energía del motor y el generador. Además, presentan un análisis del VE en distintos modos de operación con el que obtienen un modelo más preciso para optimizar el sistema de manejo de energía (SME) utilizando programación dinámica. Sin embargo, ellos solo realizan la optimización del sistema de manejo de energía a nivel simulación y no llegan a la implementación del sistema.

En el trabajo de West, Bingham y Schofield [26], se introduce un método de control predictivo para coordinar el flujo de potencia desde dos fuentes en un VE. Mediante el modelo de control predictivo, ellos buscan mantener el voltaje de un buffer de potencia dentro de los límites que se requieren para garantizar una corriente de batería unipolar y minimizar la magnitud de la corriente de la batería. Con ello demuestran que el gasto de la red de energía de un banco de baterías es significativamente menor comparado con el método de control del enlace de voltaje de CD.

En [27] Sciarretta, Back y Guzzella buscan atacar el problema de la distribución de potencia entre las distintas fuentes de un VE, lo cual se logra haciendo uso de un control óptimo, el cual requiere los datos estadísticos de demandas de potencia del VE para ciclos de manejo conocido. Ellos muestran que las técnicas que utilizan estructuras con controladores fijos y después buscan parámetros óptimos para minimizar una función de costo, tienen una solución única, consecuencia de la estructura seleccionada.

Ali Emadi et al [28], realizan una revisión de las configuraciones en VEH comerciales. Con esto concluyen que el tipo serie-paralelo es el más común. Esta configuración permite al vehículo operar en diversas condiciones de manejo. No obstante, surge un reto interesante, ya que se necesitan fuentes de alimentación con dinámicas muy particulares.

En [29] se desarrolló un SME altamente eficiente utilizando redes neuronales. Se utilizó estrategia de control para el VEH basada en las características de eficiencia del sistema de energía auxiliar (ultracapacitores) y un convertidor buck-boost. Se formula un modelo de control óptimo con el cual se mejora la eficiencia en un 4.9% de la estrategia en la que se basaron originalmente (estado de carga de ultracapacitores). En este trabajo se realizaron 3 pruebas de manejo distintas, la primera sin regeneración de energía en la cual logran recorrer 2.61 km con 1 kWh de energía, la segunda con regeneración pero sin ultracapacitores logra recorrer 3.09 km con 1 kWh de energía, lo cual hace notar una mejora, y la tercera con regeneración y con ultracapacitores con la cual se logra recorrer 3.25km/kWh, lo cual presenta un mejor aprovechamiento de energía con respecto a las dos primeras pruebas de manejo. Esto se logró realizando un control para la carga de los ultracapacitores, los cuales operan almacenando energía durante el frenado del VE y entregando energía durante la aceleración del vehículo. Por último, mencionan que después de varias pruebas de manejo se mejoró la estrategia de control logrando así los resultados obtenidos.

En [30] se propone un método para determinar la distribución de potencia entre distintas fuentes por medio de descomposición espectral y frecuencia de banda. Mediante la transformada de wavelet, se determina la distribución de potencia en tiempo y frecuencia. Ellos comienzan con el dimensionamiento de UC y baterías, lo cual implica hacer un previo dimensionamiento energético. En este trabajo se logran describir un sistema de baterías con rangos limitados de carga y descarga y un bus flotante de capacitores. Las baterías entregan potencia durante rangos limitados mientras que el ultracapacitor absorbe el resto de la potencia cuando el motor alcanza una carga promedio. En general, se obtienen una novedosa arquitectura empleando ultracapacitores sin necesidad de un convertidor CD-CD.

Minjin Kim et al [31], realizan una comparación entre una aproximación con lógica difusa y otra con una fórmula analítica para sistemas de potencia híbridos. Se demuestra que

los métodos que utilizan lógica difusa proveen más flexibilidad pero requieren más variables de diseño.

En [32], se presenta una EME basada en lógica difusa que toma en cuenta un control de frenado regenerativo del motor eléctrico. Un reto importante en este trabajo es que es necesario mantener el estado de carga de las baterías con la finalidad de aprovecharlas completamente.

L. Gauchia et al [33], proponen una representación energética macroscópica (REM) para diversas fuentes de potencia. La REM es una herramienta gráfica desarrollada en el 2000, muy útil cuando se estudian sistemas complejos y su manejo de energía. Ellos simulan un VE de 32 kW basado en celdas de combustible, baterías y ultracapacitores para el cual hacen uso de distintos convertidores electrónicos de potencia debido a las distintas fuentes que se manejan. Mencionan que no se requiere uso de convertidor para los ultracapacitores para que puedan tener un proceso de carga y descarga natural. Cuando logran la REM integran dos lazos de control en su sistema, uno para controlar la velocidad y la potencia del convertidor y el otro lazo de control es utilizado para la generación de potencia, el cual tiene como objetivo controlar la distribución de corriente en el bus de CD.

De acuerdo a la revisión del estado del arte se ha observado que las estrategias de manejo de energía predictivas resultan ser una opción viable debido a que utilizan parámetros en tiempo real y pueden realizar el reparto óptimo de potencia, lo cual facilita su implementación.

## **1.6. Propuesta de solución**

La propuesta consiste en realizar una estrategia de manejo de energía para el VE, la cual debe tomar la decisión de la forma más conveniente de aprovechar la energía de las fuentes del sistema de potencia. Dicha estrategia se centrará en optimizar la energía del banco de baterías.

La solución propuesta consiste en realizar una EME predictiva, la cual hace uso de información conocida como perfiles de manejo, demandas de energía en un trayecto, etc. Esta estrategia contempla operar en tres casos que dependen de la velocidad del vehículo y con ello se fija el voltaje del bus de CD en el rango más conveniente. Las corrientes de las distintas fuentes serán repartidas de acuerdo a la corriente total demandada por el sistema de tracción del VE, integrado por el driver y el motor de inducción.

## **CAPÍTULO 2.**

# **ANÁLISIS Y DISEÑO DEL SISTEMA DE MANEJO DE ENERGÍA**

---

En este capítulo se presenta un análisis del sistema de manejo de energía, el cual incluye la etapa del sistema híbrido de potencia y la estrategia de manejo de energía que se implementaron en el VE. Primeramente se presenta el análisis del VE y las fuerzas que actúan en él con lo cual, a través de una simulación se obtienen los cálculos del requerimiento energético del VE. Esta simulación es obtenida mediante la implementación del modelo del VE. Posteriormente se da una descripción general de la tarea que debe cumplir el sistema de manejo de energía. Lo cual abre la pauta para continuar con la definición del SPH y especificar los elementos que lo integran, es decir, fuentes de alimentación, acondicionadores de potencia y el control local. Por último se presenta el análisis y diseño de la EME que se implementará a través de la plataforma de desarrollo *NI myRIO* y el software LabVIEW para la operación del VE y se finaliza con una breve conclusión del capítulo.

---

## 2.1 Análisis del vehículo eléctrico

Para realizar el análisis del VE se deben considerar diversos aspectos tales como la dinámica del VE, su transmisión, el sistema de alimentación, el control y el comportamiento del motor de inducción. La dinámica del VE se basa en el conjunto de fuerzas que actúan sobre él (ver figura 2.1).

De dicha figura se obtiene la ecuación 2.1 que describe la dinámica del VE, la cual está definida por la diferencia entre la fuerza de tracción total y las fuerzas que actúan sobre el VE, esta ecuación es la siguiente:

$$m \frac{dv}{dt} = F_t - F_g - F_a - F_r \quad (2.1)$$

Donde:

$F_t$ – Fuerza de tracción total.

$F_g$ – Fuerza de ascensión.

$F_a$ – Fuerza aerodinámica.

$F_r$ – Fuerza de rodamiento.

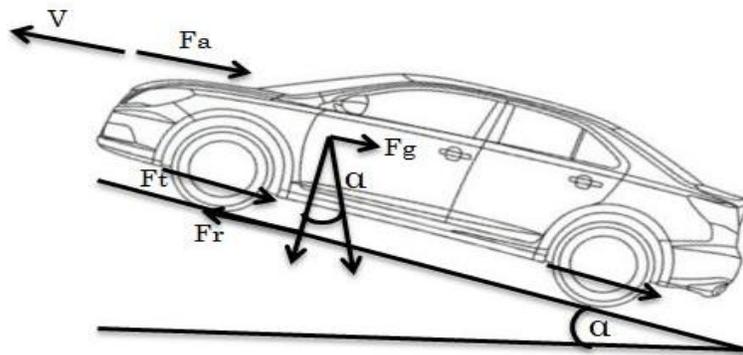


Figura 2.1. Fuerzas que actúan sobre el vehículo.

Las fuerzas de ascensión, aerodinámica y de rodamiento se definen por las ecuaciones 2.2 a 2.4:

$$F_g = f_r mg \cos \alpha \quad (2.2)$$

$$F_a = \frac{1}{2} \rho A_c C \omega_L^2 \quad (2.3)$$

$$F_r = mg \sin \alpha \quad (2.4)$$

Donde:

$f_r$  – Coeficiente de fricción.

$m$  – Masa del VE.

$g$  – Fuerza de gravedad.

$\alpha$  – Ángulo de inclinación.

$\rho$  – Densidad del viento.

$A_c$  – Área de contacto del VE.

$C$  – Coeficiente aerodinámico.

$\omega_L$  – Velocidad en el eje de las ruedas del VE.

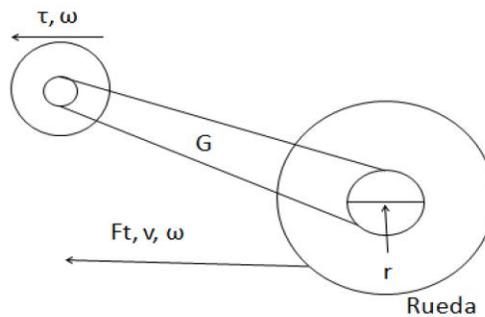
Por lo tanto, la ecuación dinámica del VE se define por medio de la ecuación 2.5.

$$m \frac{dv}{dt} = F_t - f_r mg \cos \alpha - \frac{1}{2} \rho AC \omega_L^2 - mg \sin \alpha \quad (2.5)$$

Por otro lado se tiene el sistema de transmisión del VE, el cual se considera como el principal sistema en el VE. En este sistema, una de las cuestiones más importantes es el torque impuesto al motor eléctrico [9] y [34]. Mediante dicha transmisión (G), se puede convertir la fuerza total del VE, (ecuación 2.5), en un torque y una velocidad angular del motor eléctrico. La figura 2.2 muestra una transmisión simplificada.

La velocidad angular ( $\omega_m$ ) en el eje del motor eléctrico se puede relacionar por medio de la velocidad en el eje de las ruedas del VE ( $\omega_L$ ) del VE a través del radio de la rueda (r) y la relación de transmisión (G). La ecuación 2.6 muestra esta relación.

$$\omega_m = \frac{\omega_L}{r} G \quad (2.6)$$



**Figura 2.2. Transmisión del vehículo.**

Del mismo modo, el torque del motor eléctrico ( $\tau_t$ ) se relaciona con la fuerza total aplicada al VE a través del radio de la rueda y la relación de transmisión, ver ecuación 2.7.

$$\tau_t = \frac{F_t r}{G} \quad (2.7)$$

Por último se tiene el momento de inercia de la masa total del VE, este también se obtiene con ayuda del radio de la rueda, la relación de transmisión y la masa del VE. El momento de inercia se define por la ecuación 2.8.

$$J = \frac{mr^2}{G^2} \quad (2.8)$$

Una vez obtenidas las ecuaciones que describen la dinámica del VE se realiza la implementación en MATLAB/SIMULINK

## 2.2 Implementación del modelo del vehículo eléctrico

La implementación del modelo del VE se realizó en MATLAB/SIMULINK®, además se hace uso de la herramienta GUI (Graphical User Interfaces) para realizar la interfaz gráfica.

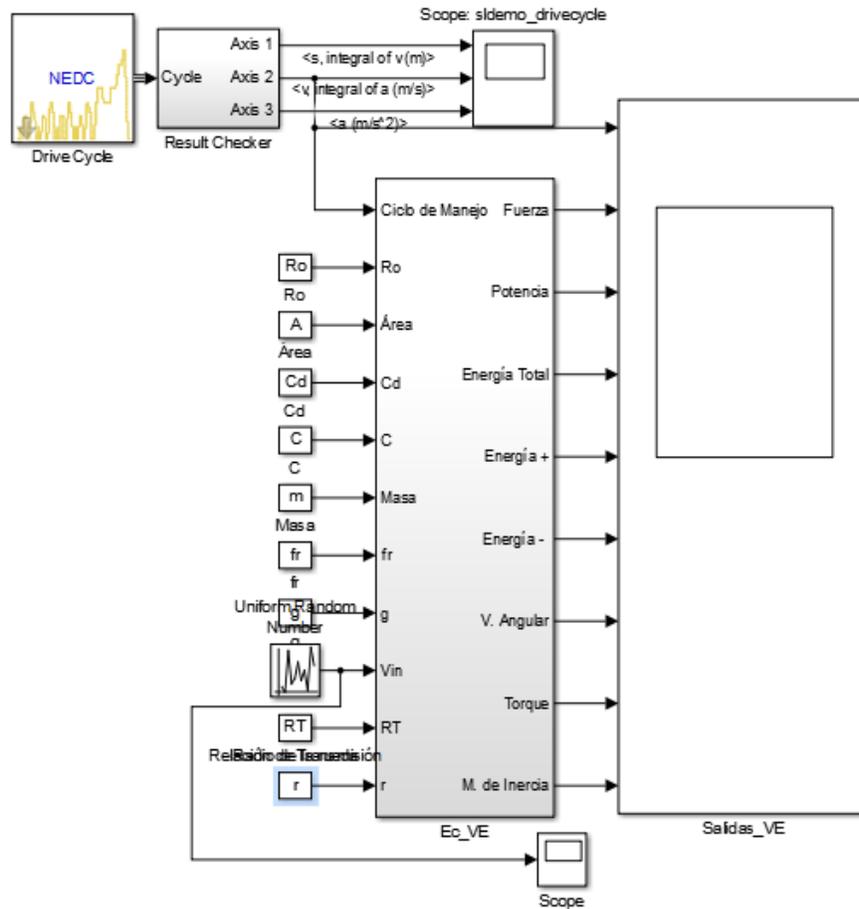
Esta herramienta permite crear entornos gráficos por medio de distintos bloques que pueden ser botones, cuadros para edición de texto, cuadros con texto estático, etc. Sin embargo, se requiere un código el cual indique que tarea se debe realizar al introducir valores o activar un botón [35].

La interfaz realizada, figura 2.3, permite al usuario introducir parámetros como, los coeficientes de fricción, y aerodinámico. Así mismo, otros parámetros como el área de contacto del vehículo, la masa, la densidad y la gravedad entre otras.



Figura 2.3. Interfaz del modelo del VE.

El código que se ejecuta al presionar el botón “Simular” simplemente toma los valores que se encuentran en sus casillas correspondientes y guarda el valor introducido en una variable asignada para cada parámetro, posteriormente ejecuta el programa elaborado en SIMULINK, el cual se puede apreciar en la figura 2.4.



**Figura 2.4. Emulador del VE.**

En esta parte del programa se tienen las entradas y las gráficas de cada una de las salidas de interés del VE. Además se puede apreciar un subsistema dentro del cual se realiza la implementación de la ecuación dinámica del VE, la ecuación para el cálculo de la velocidad angular en el eje del motor, la ecuación para el cálculo del par y la ecuación para el cálculo del momento de inercia (ecuaciones 2.5 a 2.8 respectivamente) y posteriormente se adaptan los valores para ser presentados en las unidades de medida más adecuadas para su interpretación.

Los resultados obtenidos al simular el modelo del VE implementado se realizan con los parámetros de entrada mostrados en la tabla 2.1.

**Tabla 2.1. Parámetros para la simulación del modelo del VE.**

Parámetro	Valor	Unidad
Densidad del Viento	1.18	-
Área de contacto del VE	3.225	m <sup>2</sup>
Coefficiente aerodinámico	0.5	-
Radio de la rueda	0.32	m
Masa	1500	Kg
Coefficiente de fricción	0.014	-
Relación de transmisión	8	-

El ciclo de manejo utilizado para esta simulación es el ECE-15 cuyas principales características se muestran en la tabla 2.2 [9].

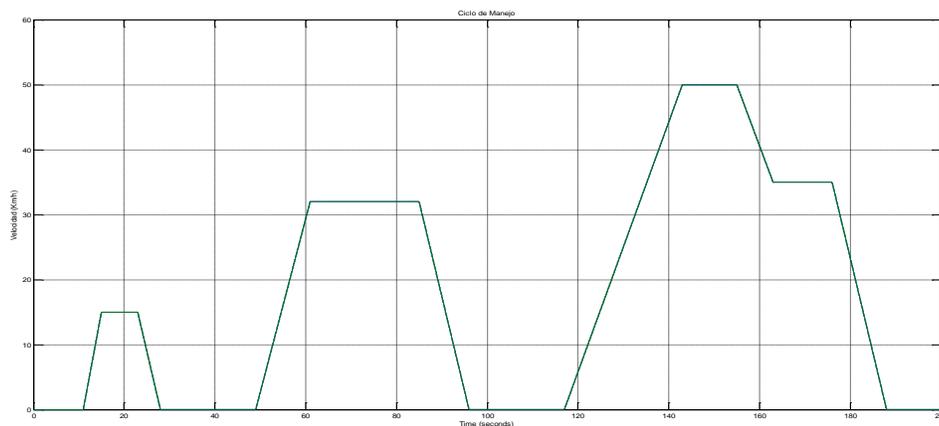
**Tabla 2.2. Características del ciclo de manejo ECE-15.**

Parámetro	Valor
Distancia recorrida	989 m
Velocidad promedio	18.25 km/h
Aceleración máxima	1.05 m/s <sup>2</sup>
Velocidad máxima	50 km/h

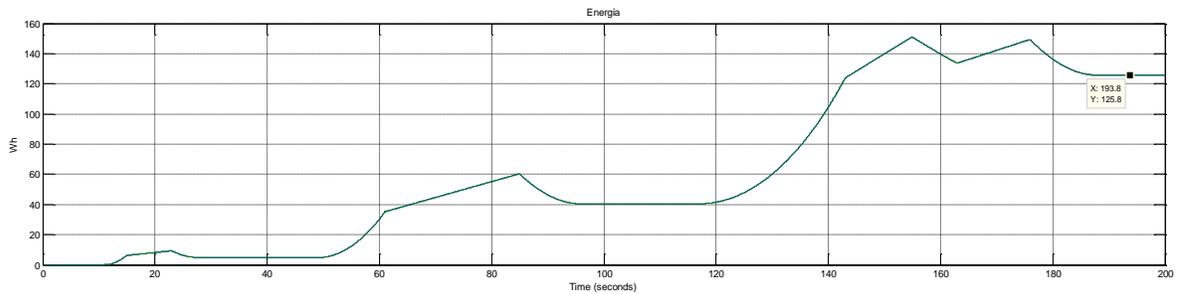
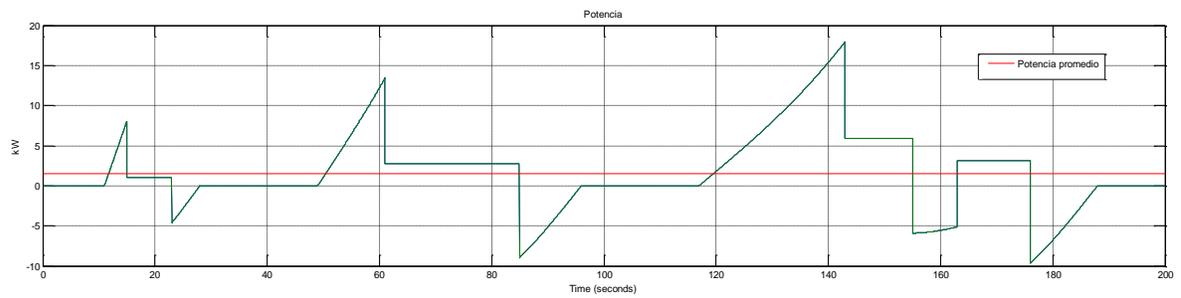
La figura 2.5 muestra el ciclo de manejo ECE-15.

La figura 2.6 muestra la potencia demanda, la potencia promedio y la energía requerida por el VE para el ciclo de manejo ECE-15 donde se aprecia que los resultados concuerdan con los 13kWh de energía requerida en promedio para recorrer una distancia de 100 km con un VCI. Así mismo se observa que la potencia promedio se encuentra alrededor de los 2kW.

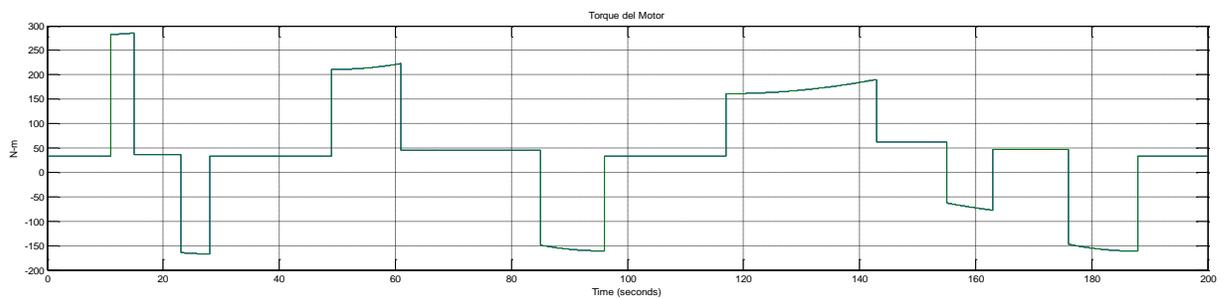
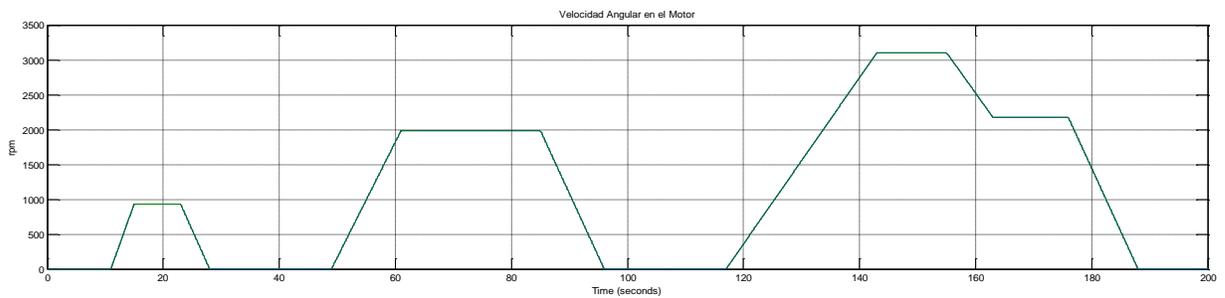
Finalmente la figura 2.7 muestra la velocidad angular y el torque impuesto al motor a lo largo del ciclo de manejo ECE-15.



**Figura 2.5. Ciclo de manejo ECE-15.**



**Figura 2.6. Potencia y energía del VE.**



**Figura 2.7. Velocidad angular y torque del motor de inducción.**

Los resultados obtenidos permiten definir el comportamiento de la demanda energética por parte del VE, lo cual permite identificar aspectos importantes como lo son los picos de potencia durante las aceleraciones, incrementos o decrementos en la potencia de acuerdo a la velocidad, la energía que se puede recuperar por medio del frenado, etc., lo cual es importante para definir la EME.

### 2.3 Estrategia de manejo de energía

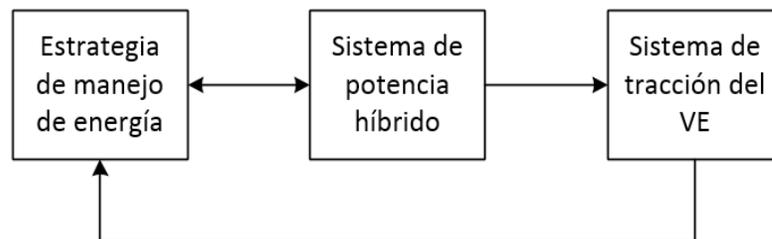
Los sistemas de potencia híbridos deben ser capaces de satisfacer las demandas energéticas del vehículo, lo cual se ve facilitado al utilizar distintas fuentes de energía con características diferentes.

Sin embargo, con el uso de más de una fuente de energía, surgen retos en el manejo de energía y la interacción entre las distintas fuentes.

Es por ello que existen sistemas que se encargan de controlar el flujo de energía entre las distintas fuentes. Estos sistemas reciben el nombre de sistemas de manejo de energía (SME), los cuales se basan en estrategias de manejo de energía (EME) que enfocan en controlar el funcionamiento del sistema de potencia [36].

Básicamente una EME es un algoritmo que se desarrolla a través de diferentes métodos para cumplir distintos objetivos donde uno de sus principales objetivos es cumplir con la expectativa de desempeño del operador del vehículo.

En general el sistema de manejo de energía debe coordinar de manera adecuada la dinámica de los elementos del sistema de potencia sin comprometer el desempeño del vehículo. Esto se lleva a cabo mediante la interacción de los distintos subsistemas que integran al SME, los cuales se aprecian en la figura 2.8.



**Figura 2.8. Interacción de los subsistemas que integran el SME.**

En esta figura se observa que el SPH tiene una interacción bidireccional con la EME debido a que estos subsistemas deben tener la capacidad de enviar y recibir señales entre ellos.

Posteriormente, el SPH se encarga de entregar la energía requerida por el sistema de tracción del VE de acuerdo a las consignas establecidas por la EME.

Finalmente se observa que el sistema de tracción del VE interactúa con la EME con lo cual se logra conocer la velocidad lineal del VE.

## 2.4 Sistema de potencia híbrido

Este tipo de sistemas se conforman de dos o más fuentes de energía con características diferentes, y su tarea principal es proveer la energía requerida por el VE en cualquier momento que este lo requiera.

Este sistema también se puede utilizar para alimentar cargas auxiliares tales como luces, aire acondicionado y los demás subsistemas eléctricos que conforman al vehículo.

La distribución de potencia entre diferentes fuentes de energía en un VE, se describe de manera sencilla con ayuda de la figura 2.9. En esta figura se observa que la contribución de potencia para satisfacer un requerimiento de carga se divide entre dos fuentes de energía 1 y 2 y los índices de aportación correspondientes a la proporción de energía que se extraerá de cada una de las fuentes son A1 y A2.

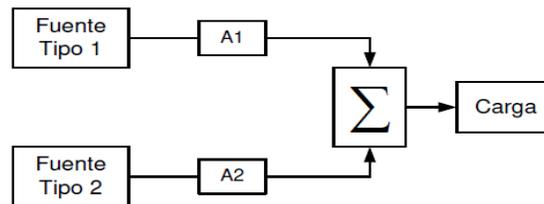
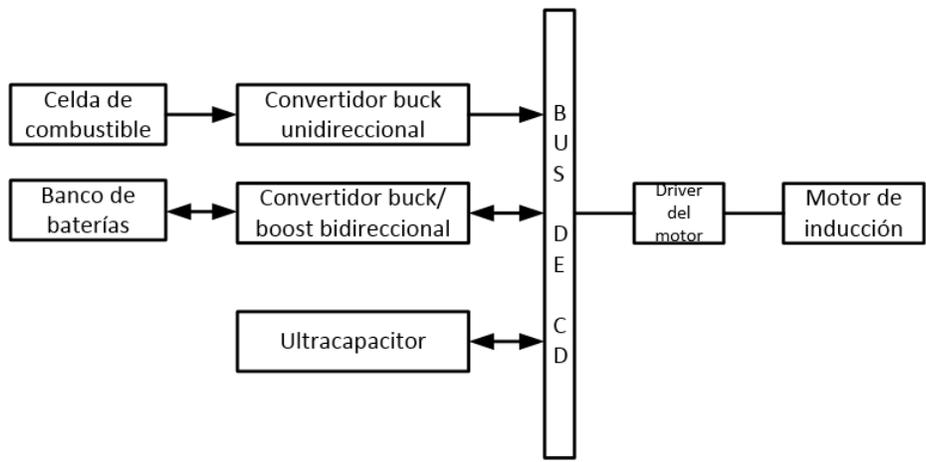


Figura 2.9. Esquema de distribución de potencia

Previamente en el trabajo de tesis doctoral realizado en cenidet [9], se presenta una configuración del sistema de potencia híbrido seleccionado que está conformado por una celda de combustible, que es la fuente principal de energía, un banco de baterías y un banco de ultracapacitores, que funcionan como fuentes de energía auxiliares y dispositivos de almacenamiento de energía.

Debido a las diferentes características de las fuentes se requiere una estrategia que coordine el flujo de potencia mediante la variación de los índices A1 y A2. Para que el vehículo opere de manera correcta, la disponibilidad de potencia en las fuentes debe ser tal que pueda cumplir con los requerimientos de la carga.

En la configuración seleccionada la celda de combustible y el banco de baterías se interconectan al bus de CD mediante convertidores electrónicos de potencia mientras que el banco de ultracapacitores se conecta directamente al bus de CD al cual se conecta al sistema de tracción del vehículo, el cual está conformado por el driver y el motor de inducción que convierte la energía eléctrica en energía mecánica tal como se muestra en la figura 2.10.



**Figura 2.10. Sistema de potencia híbrido.**

Como se menciona en el trabajo previamente citado, se seleccionó esta topología porque en comparación con otras topologías estudiadas permite controlar de manera directa la potencia que entregan la celda de combustible y el banco de baterías, y se controla de manera indirecta la potencia que entrega el banco de ultracapacitores.

Esta configuración, además aprovecha la capacidad dinámica del banco de capacitores que permite entregar grandes cantidades de energía en periodos de tiempo relativamente cortos, lo cual es muy provechoso ya que este tipo de dinámicas son presentadas por el sistema de tracción en las aceleraciones del vehículo. Además se observa que la energía que entrega o recibe el ultracapacitor es de manera directa con el bus de CD, es decir, no hay ningún tipo de procesamiento de energía a través de convertidores, lo cual disminuye las pérdidas en esta transferencia de energía aumentando así la eficiencia del sistema.

**2.5 Elementos del sistema de potencia híbrido**

Como se explicó anteriormente, el sistema de potencia híbrido es el encargado de dar energía al vehículo y sus cargas auxiliares y por ello, los elementos que lo conforman deben ser dimensionados para cumplir con las demandas energéticas en todo momento.

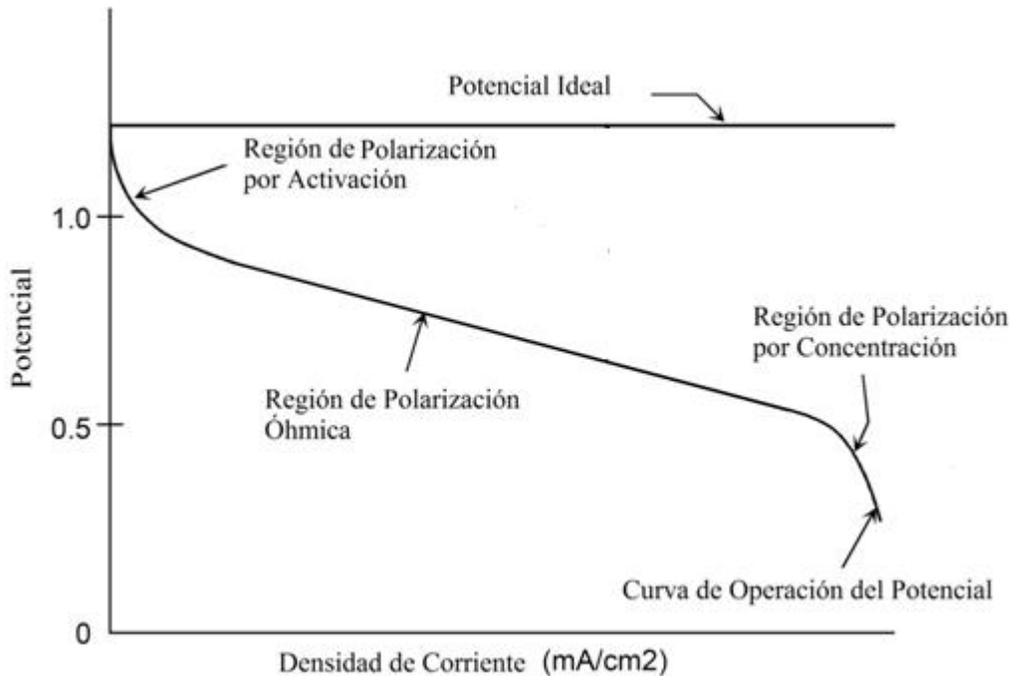
Recordando la configuración seleccionada en el trabajo actual, las tres fuentes que conforman el sistema de potencia híbrido son la celda de combustible, el banco de baterías y el banco de ultracapacitores. A continuación se da una breve explicación de cómo se dimensiona cada uno de ellos.

**2.5.1 Celda de combustible**

En el caso de estudio la celda de combustible es la fuente de energía principal y esta se encargará de abastecer el promedio de potencia a lo largo de un trayecto conocido.

Su capacidad energética depende directamente del tanque de almacenamiento de hidrógeno, mientras que la capacidad de potencia depende de su construcción. Debido a esto, se dimensionan por la potencia que son capaces de entregar [9].

La potencia nominal definida para una celda de combustible se visualiza en su curva de polarización (ver figura 2.10). En esta curva se observa la cantidad de  $A/cm^2$  en el eje de las abscisas y el nivel de voltaje en el eje de las ordenadas.



**Figura 2.11. Curva de polarización de la celda de combustible.**

En general se busca que la celda de combustible funcione dentro de la región óhmica ya que es la zona donde se tiene un comportamiento de forma lineal que beneficia a la celda de combustible.

### 2.5.2 Baterías

El banco de baterías se debe especificar en términos de la energía almacenada en Wh ( $E_{bat}$ ) debido a que es su principal limitante. Usualmente el fabricante no brinda esta información, sin embargo es fácil calcularla a través de información que si ofrece el fabricante. El cálculo se realiza mediante el producto de la capacidad de la batería en Ah (C) por el voltaje nominal de la misma ( $V_{bat}$ ) como se observa en la ecuación 2.9.

$$E_{bat} = C_{bat}V_{bat} \quad (2.9)$$

### 2.5.3 Ultracapacitor

De manera similar que el banco de baterías, el UC se debe especificar en términos de energía porque es su principal limitante. Esta energía se calcula a través de la ecuación 2.10.

$$E_{cap} = C_{cap}V_{cap} \quad (2.10)$$

De igual manera que en las baterías, el fabricante del UC brinda la información necesaria para realizar este cálculo.

### 2.5.4 Acondicionadores de potencia

En la configuración del sistema de potencia híbrido se ha mencionado la necesidad del uso de convertidores CD-CD.

Estos convertidores funcionan como los acondicionadores de potencia para la celda de combustible y el banco de baterías y se encargan de regular la corriente que estas fuentes aportan al sistema de tracción del VE.

Estos convertidores deben diseñarse para cumplir con las demandas energéticas del vehículo, por lo cual deben ser dimensionados de acuerdo a las características de las baterías y ultracapacitores seleccionados y así mismo a las características del sistema de tracción del VE.

Los convertidores utilizados en este trabajo, son un convertidor reductor (buck) para la celda de combustible y un convertidor reductor-elevador (buck-boost) bidireccional para el banco de baterías. Una característica importante de estos convertidores es que con el fin de reducir esfuerzos en tensión y corriente para los dispositivos semiconductores, se realizaron convertidores de dos fases. Dichos convertidores se muestran en la figura 2.11.

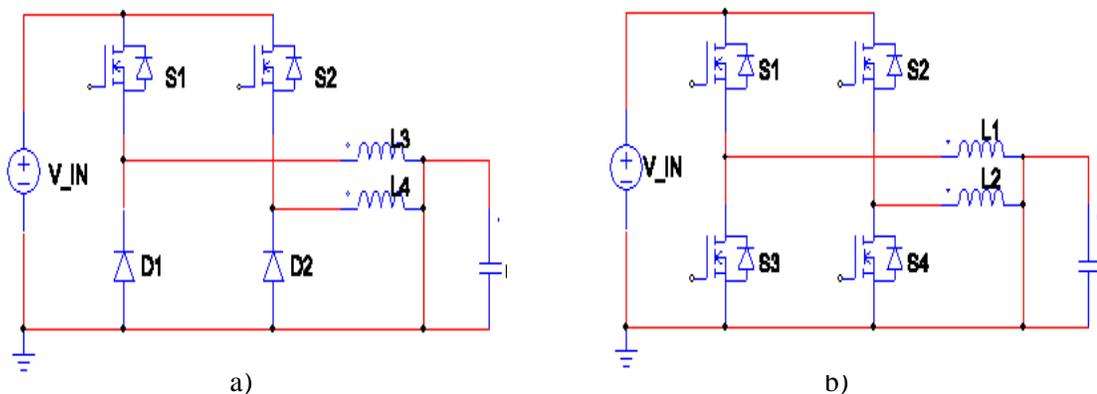


Figura 2.12. a) Convertidor reductor intercalado; b) Convertidor bidireccional.

El convertidor de la celda de combustible, figura 2.11 a, es un convertidor reductor intercalado (buck), el cual cuenta con una regulación de corriente de salida, el cual permite definir la corriente que la celda de combustible proporciona al sistema de tracción del VE.

En el caso de las baterías se implementó un convertidor bidireccional de dos fases, figura 2.11 b. La parte bidireccional se debe a que la batería puede entregar energía al sistema de tracción del VE y así mismo, mediante el frenado regenerativo o directamente de la celda de combustible, puede recibir energía y almacenarla siempre y cuando se encuentre en condiciones de hacerlo.

Cuando se trata de que la batería entregue energía al sistema, el convertidor funciona como un buck y cuando se trata de recuperar energía el convertidor funciona como un boost.

El análisis de estos convertidores se realizó en [9] donde se obtuvieron las ecuaciones para su diseño. Este conjunto de ecuaciones son:

$$V_c = DV_i \quad (2.11)$$

$$i_L = \frac{DV_i}{R} \quad (2.12)$$

$$\Delta i_L = \frac{V_i - V_c}{L} DT_s \quad (2.13)$$

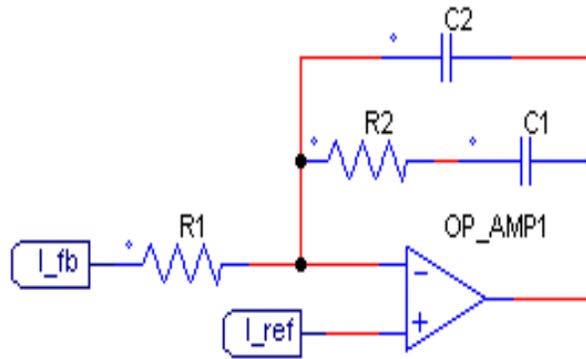
$$\Delta V_c = \frac{\Delta i_L}{8C} T_s \quad (2.14)$$

La ecuación 2.11 permite el cálculo del voltaje en el capacitor, que es el mismo que el voltaje de salida del convertidor. La ecuación 2.12 permite calcular la corriente en el inductor. Finalmente, las ecuaciones 2.13 y 2.14 se utilizan para el cálculo del rizo de corriente en el inductor y el rizo de voltaje en el capacitor respectivamente.

Por otra parte, estos acondicionadores de potencia requieren un sistema de control ya que sin él sería imposible regular la corriente que cada uno de ellos aportará al sistema de tracción del vehículo.

Para ello se propuso un control de corriente promedio ya que comparado con otros tipos de control, este método resulta con una alta inmunidad al ruido y fácil de implementar.

Este sistema de control se realizó con un compensador tipo II, el cual se muestra en la figura 2.12 donde R1 y R2 representan las resistencias del compensador, C1 y C2 las capacitancias, I\_ref representa la corriente de referencia y por último I\_fb representa la corriente que será retroalimentada para ser controlada.



**Figura 2.13. Compensador tipo II**

El compensador de tipo II suele ser usado en aplicaciones de control de corriente.

Cabe destacar que la etapa de diseño de dichos convertidores y del compensador tipo II se realizó en [9]. La función de transferencia de este compensador en modo corriente se muestra en la ecuación 2.15.

$$G_{i-d}(s) = \frac{i_L(s)}{d(s)} \Big|_{v_i=0} = \frac{V_i}{R} \cdot \frac{\omega_n^2(1 + sRC)}{s^2 + 2\xi\omega_n s + \omega_n^2} \quad (2.15)$$

Este tipo de compensador presenta dos polos que se ubican a la frecuencia de resonancia del filtro de salida del convertidor, según se muestra en la ecuación 2.16.

$$f_{LC} = \frac{1}{2\pi\sqrt{LC}} \quad (2.16)$$

En este caso la meta que tiene que cumplir este compensador es diseñar un sistema de retroalimentación tal que el convertidor sea estable y pueda regular rápidamente la salida contra cambios en el voltaje de entrada, condiciones de carga o cambio de referencia. Una respuesta rápida requiere que el ancho de banda sea tan alto como sea posible de tal forma que la compensación para este caso se diseña para que:

$$\frac{f_s}{10} < f_c < \frac{f_s}{5} \quad (2.17)$$

El diagrama general de los convertidores con lazo de control se muestra en la figura 2.13. En ella se observa que la corriente se controla por medio de las corrientes de cada fase a través de la corriente en los inductores.

Estas corrientes son retroalimentadas a cada uno de los compensadores por medio de un sensor de corriente, del otro lado de los compensadores se encuentra la referencia que fijará el nivel de corriente a la salida del convertidor.

El PWM es generado por medio de un comparador en el cual se compara la señal de salida del compensador con una señal triangular.

Por último se tiene una protección por sobrevoltaje. Esta protección deshabilita la señal PWM en caso de exceder máximo nivel de voltaje permitido por la EME ( $V_{sup}$ ).

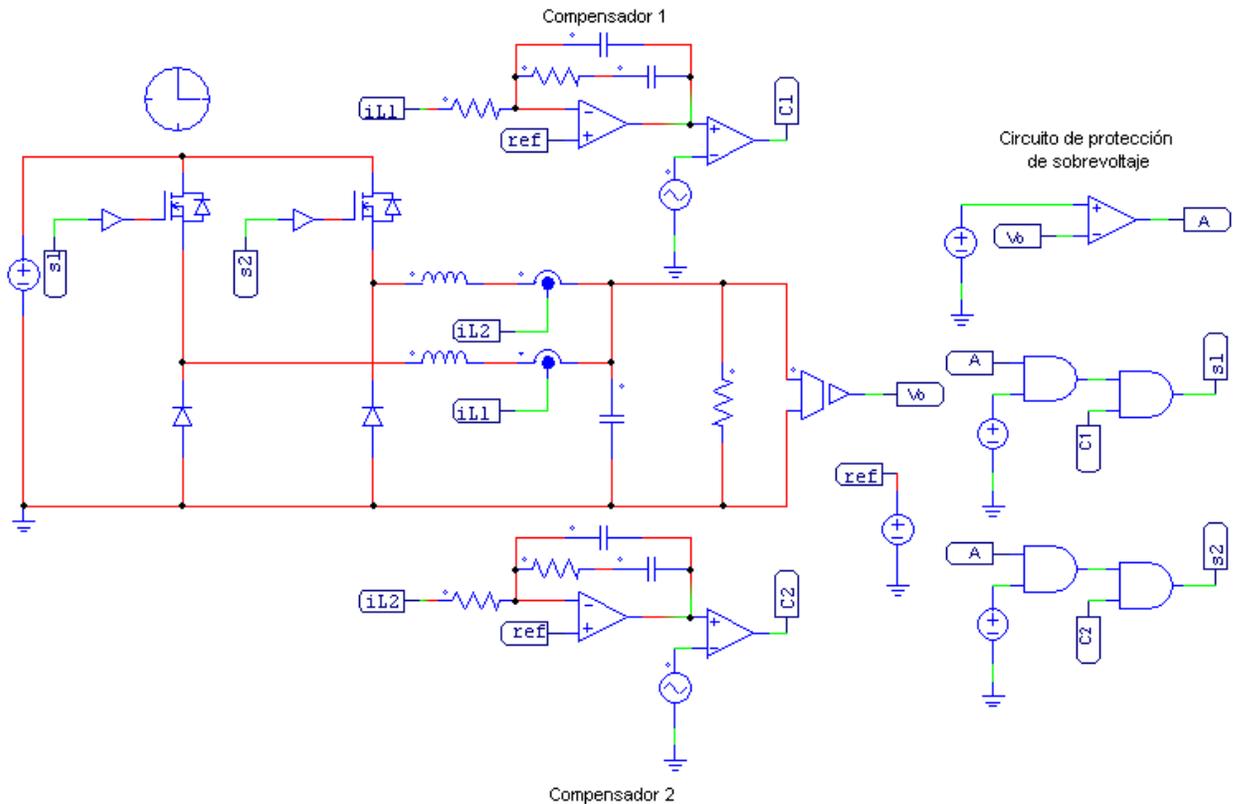


Figura 2.14. Diagrama de convertidor con lazo de control de corriente de salida y circuito de protección.

## 2.6 Diseño de la estrategia de manejo de energía

Se define una EME del tipo predictiva debido a que se puede aprovechar información que es conocida como es el ciclo de manejo y con ayuda de simulaciones se puede estimar la energía que el VE requerirá a lo largo de un trayecto así como la potencia, la corriente y otros datos que son útiles para la implementación de la EME.

De igual manera que en [9], la EME se realiza de manera jerárquica dividiéndose en dos niveles. Sin embargo, existe una etapa anterior, definida como la etapa de precarga, la cual consiste en establecer un nivel adecuado de voltaje en el bus de CD de acuerdo al trayecto a realizar.

Este voltaje se define como el voltaje inicial en el bus de CD ( $V_{inicial}$ ), y se define en el nivel más adecuado gracias a que la EME es del tipo predictiva con lo cual es posible conocer las condiciones iniciales del trayecto, es decir, si el trayecto comienza en una pendiente ascendente, el voltaje inicial en el bus de CD debería comenzar en el nivel de voltaje más alto ( $V_{sup}$ ) permitido por la EME, lo cual garantiza que se tendrá la energía suficiente para abastecer la energía demandada por el VE.

Por otro lado, si se sabe que el trayecto inicia con una pendiente descendente, el voltaje inicial del bus de CD debería establecerse en el nivel de voltaje más bajo ( $V_{inf}$ ) permitido por la EME para posteriormente aprovechar la energía obtenida mediante el frenado regenerativo.

Posteriormente se tiene el primer nivel (de mayor jerarquía) que se encarga de establecer los niveles de voltaje en el bus de CD de acuerdo a la velocidad del vehículo, se definieron tres casos de operación del VE.

Los casos en los que el VE debe de operar se proponen de acuerdo a dos variables conocidas del VE, las cuales son la velocidad del vehículo y el voltaje del bus de CD.

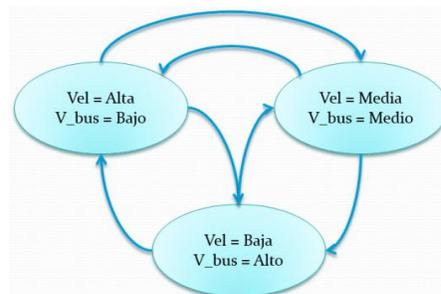
Los tres casos que se mencionan son los siguientes:

Caso 1: Cuando el VE se encuentra a una velocidad alta el voltaje en el bus de CD debe estar en un valor bajo ( $V_{inf}$ ).

Caso 2: Cuando el VE se encuentra a una velocidad media el voltaje en el bus de CD debe estar en un valor medio ( $V_{med}$ ).

Caso 3: Cuando el VE se encuentra a una velocidad baja el voltaje en el bus de CD debe estar en un valor alto ( $V_{sup}$ ).

La figura 2.14 muestra un diagrama de los casos de operación del vehículo. En esta figura se observa que el vehículo puede cambiar entre los tres casos de operación planteados anteriormente sin importar el orden, es decir, que puede pasar de velocidad baja a velocidad media, de velocidad baja a velocidad alta o cualquiera que sea el caso que se presente.



**Figura 2.15. Modos de operación del VE.**

Finalmente el segundo nivel (de menor jerarquía) es el encargado de realizar la repartición de corriente entre las distintas fuentes del SPH.

Esta repartición se realiza conociendo la corriente demandada por el sistema de tracción del VE,  $i_{driver}$ , y en base a ello se definen las referencias de corriente para la celda de combustible y para el banco de baterías de tal forma que se cumpla la ecuación 2.18.

$$i_{driver} = i_{cc} + i_{bb} \quad (2.18)$$

Donde  $i_{cc}$  es la corriente de la celda de combustible e  $i_{bb}$  es la corriente del banco de baterías.

La corriente del ultracapacitor  $i_{uc}$ , se calcula de manera indirecta mediante la ecuación 2.19. Esta demanda de corriente resulta en las aceleraciones del vehículo debido a que la dinámica de aceleración es más rápida que la dinámica de respuesta de los convertidores de la celda de combustible y el banco de baterías.

$$i_{uc} = i_{driver} - i_{cc} - i_{bb} \quad (2.19)$$

La EME definida en este trabajo, se centra en la energía de la batería ya que esta tiene la capacidad de entregar y recibir energía del sistema. Esto permite predefinir el estado de carga inicial que tiene que tener el banco de baterías antes de realizar un recorrido.

Esto es posible debido a que la EME es de tipo predictiva y como se ha mencionado con anterioridad, esto permite conocer datos como las pendientes que existen a lo largo del trayecto, la distancia a recorrer, etc. Así mismo se puede estimar la energía requerida para realizar un trayecto.

De igual manera la EME se encarga que la celda de combustible siempre entregue una corriente constante, la cual cumpla su dinámica de amperes por segundo (A/s) que puede entregar la celda de combustible, es decir, que esta corriente se hace crecer de manera suave hasta el nivel definido con lo cual se garantiza que el voltaje de esta será prácticamente constante, lo cual beneficia en aspectos como la reducción de esfuerzos eléctricos en la celda de combustible y un mejor uso del hidrógeno disponible.

Antes de llevar a cabo esta EME se debe realizar una estimación del promedio de corriente de consumo del VE a lo largo de un trayecto definido. Esto se hace con la intención de que la celda de combustible provea ese promedio de corriente a lo largo de todo el trayecto dejando así que los picos de demanda sean entregados por el banco de baterías y el banco de UC.

Esta definición se realizó con ayuda de la estimación de potencia realizada en la sección 2.2, la cual arroja que para un recorrido el promedio de potencia demandada por el sistema de tracción del VE es de alrededor 2kW. En esta EME este dato es importante ya que a través de él se define la máxima corriente de salida que entregará el convertidor de la celda de combustible ( $i_{ccmax}$ ) al sistema de tracción del VE.

En la etapa de repartición de corrientes, se define que la EME diseñada cumpla las siguientes condiciones con lo cual se busca que la celda de combustible opere únicamente cuando la corriente del driver sea mayor que la máxima corriente definida para el convertidor de la celda de combustible.

$$\text{Si } i_{driver} < i_{ccmax} \text{ entonces } i_{cc} = 0A \text{ e } i_{bb} = i_{driver}$$

$$\text{Si } i_{driver} > i_{ccmax} \text{ entonces } i_{cc} = i_{ccmax} \text{ e } i_{bb} = i_{driver} - i_{cc}$$

Una vez concluido el diseño de la EME se definió que esta se desarrollara con ayuda de la plataforma de desarrollo *NI myRio* (cuyas características se detallan en el anexo B).

Esta plataforma tiene como función principal la adquisición y procesamiento de las señales que entregan los sensores instalados en el SPH del VE.

Así mismo a través de cálculos, se encarga de definir las referencias de salida para cada uno de los convertidores del SPH. La programación de esta plataforma se realiza mediante el software LabVIEW.

Para el trabajo de tesis actual se hace uso de tres de sus entradas analógicas, dos salidas analógicas, y dos señales digitales.

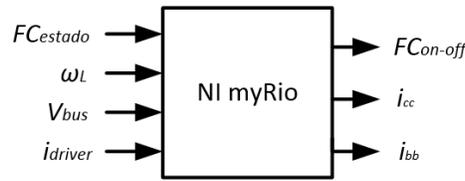
Las entradas analógicas corresponden a las señales entregadas por el sensor de voltaje, el sensor de corriente y el convertidor de frecuencia a voltaje (a través del cual se obtiene la velocidad).

Las salidas analógicas corresponden a las referencias de corriente de salida de los convertidores del SPH.

Finalmente se configuran las señales digitales, una como salida y una como entrada.

La salida digital se encarga de mandar el comando de encendido a la celda de combustible, mientras que la entrada digital se encarga de recibir una señal de la celda de combustible con la cual se conoce su estado.

En la figura 2.15 se muestra el esquema de las señales en el myRio.



**Figura 2.16. Esquema de conexiones del NI myRIO.**

Para finalizar el diseño de la EME es necesario identificar todas las variables que se requieren para llevar a cabo la implementación de esta.

Estas variables se muestran en la tabla 2.3 y son las mismas que han sido definidas a lo largo del diseño de la EME.

**Tabla 2.3. Variables utilizadas por la EME.**

Variable	Tipo de señal
$FC_{estado}$	Señal de estado de la celda de combustible
$\omega_L$	Velocidad en el eje de las ruedas del VE en km/hr
$V_{bus}$	Voltaje del bus de CD
$V_{inf}$	Voltaje mínimo del bus de CD
$V_{med}$	Voltaje medio del bus de CD
$V_{sup}$	Voltaje máximo del bus de CD
$i_{driver}$	Corriente demandada por el sistema de tracción del VE
$FCon-off$	Señal para activar y desactivar la celda de combustible
$i_{cc}$	Referencia de corriente para el convertidor de la celda de combustible
$i_{ccmax}$	Referencia de corriente máxima para el convertidor de la celda de combustible
$i_{bb}$	Referencia de corriente para el convertidor del banco de baterías

## 2.7 Conclusión del capítulo

En este capítulo se presentaron dos puntos importantes del trabajo de investigación realizado.

El primero de ellos es la parte del SPH del cual se observa que el hibridar sistemas de potencia permite aprovechar las ventajas de los diversos tipos de fuentes desde sus dinámicas, eficiencia, vida útil, densidad de potencia y energía, etc.

Además permite aumentar la autonomía del VE apoyándose de la EME que se encarga de controlar el flujo de energía de las distintas fuentes en el SPH.

El segundo punto va en relación a la EME, la cual se encarga de controlar el flujo de energía entre de las fuentes y el sistema de tracción del VE.

Esta EME se diseñó de tal forma que operara de manera jerárquica y secuencial y se basa en fijar el voltaje del bus de CD de acuerdo a la velocidad del vehículo y posteriormente

se realiza la repartición de corrientes de acuerdo a la corriente demandada por el sistema de tracción del VE.

La EME diseñada otorga beneficios como un mejor aprovechamiento de la energía en baterías. Así mismo, permite que el driver opere dentro de una zona segura con lo cual se garantiza que siempre estará en funcionamiento.

## **CAPÍTULO 3.**

# **IMPLEMENTACIÓN DEL SISTEMA DE POTENCIA HÍBRIDO Y LA ESTRATEGIA DE MANEJO DE ENERGÍA**

---

En este capítulo se presenta la implementación del sistema de manejo de energía, el cual incluye la etapa del sistema de potencia híbrido y la estrategia de manejo de energía que se implementaron en el VE. Así como la definición de algunas variables de diseño de la EME. En la primera parte del capítulo se muestran la implementación de los elementos que integran el SPH, en este caso, la celda de combustible, el banco de baterías, y el UC. Así mismo los acondicionadores de potencia y sus controladores locales. Posteriormente se describe la instrumentación requerida para el monitoreo y manejo de las variables de diseño de la EME. Finalmente se describe el desarrollado del programa para implementar la EME, se realiza la instalación del SPH y se finaliza con una conclusión del capítulo.

---

### 3.1 Implementación de los elementos del sistema de potencia híbrido

Como se ha mencionado anteriormente el sistema de potencia híbrido está integrado principalmente por los dispositivos de almacenamiento de energía y los convertidores CD/CD para la celda de combustible y el banco de baterías.

Los dispositivos de almacenamiento de energía son elementos aquellos que se encargan de suministrar la energía requerida por el sistema de tracción del VE en todo momento.

En el trabajo de tesis actual estos dispositivos son la celda de combustible, el banco de baterías y el UC. Estos elementos fueron dimensionados en [9] basándose en los cálculos necesarios para satisfacer las necesidades energéticas del VE.

El diagrama general del SHP implementado en el VE se muestra en la figura 3.1, el cual por seguridad fue necesario considerar elementos de protección, razón por la cual se colocaron fusibles, diodos e interruptores termomagnéticos, los cuales cumplen la función de elementos de protección en caso de cualquier problema que pueda presentarse durante la operación del VE.

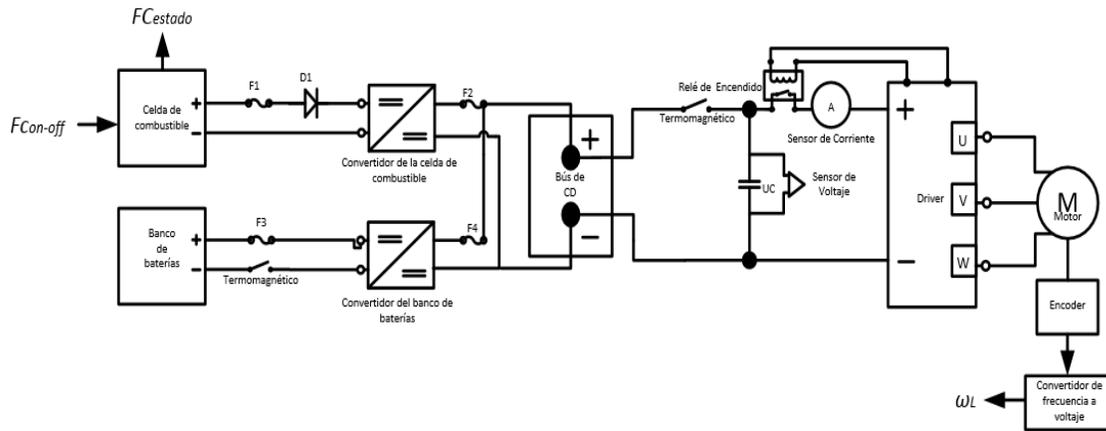


Figura 3.1. Diagrama del sistema de potencia híbrido con elementos de seguridad incluidos.

#### 3.1.1 Celda de combustible

La celda de combustible fue diseñada y fabricada en el Instituto Nacional de Electricidad y Energías Limpias (INEEL) antes Instituto de Investigaciones Eléctricas (IIE). La celda de combustible se muestra en la figura 3.2.

De acuerdo al cálculo de potencia demanda por el vehículo a través del ciclo de manejo ECE-15, realizado anteriormente, se decidió tomar como valor de referencia la potencia

promedio (1.5kW) y por ello se definió que la potencia de la celda de combustible fuera de 3kW. Las especificaciones de la celda de combustible se muestran en la tabla 3.1.

**Tabla 3.1. Especificaciones de la celda de combustible.**

Celda de combustible	
<b>Voltaje (Volts)</b>	100
<b>Potencia nominal (Watts)</b>	3000
<b>Corriente nominal (Amperes)</b>	30
<b>Amperes por segundo (A/s)</b>	15



**Figura 3.2. Celda de combustible fabricada por el INEEL [37]**

### 3.1.2 Banco de baterías

El banco de baterías está constituido por ocho módulos de baterías marca Valence modelo U1-12XP, cuyas especificaciones se muestran en el anexo A, las cuales se conectan en serie. El banco de baterías se muestra en la figura 3.3 a. Este banco de baterías cuenta con un sistema de manejo de baterías (BMS), el cual se encarga de monitorear el estado de carga (SoC) del banco de baterías, balancear el voltaje de las celdas de cada batería y balancear la corriente de carga y descarga de cada módulo de baterías, entre otros. Este sistema es brindado por la empresa Valence y se muestra en la figura 3.3 b.



a)



b)

**Figura 3.3. a) Banco de baterías; b) Sistema de manejo de baterías**

El banco de baterías se definió basándose en el cálculo del requerimiento energético del VE [9]. Mediante este cálculo se dimensionó un banco de baterías, el cual tienen las especificaciones mostradas en la tabla 3.2.

**Tabla 3.2. Especificaciones del banco de baterías.**

Banco de baterías	
<b>Voltaje (Volts)</b>	102
<b>Unidades</b>	8
<b>Masa (kg)</b>	52
<b>Volumen (litros)</b>	37.6
<b>Capacidad de almacenamiento (Ah)</b>	4000

### 3.1.3 Ultracapacitor

Finalmente el UC está constituido por dos módulos de ultracapacitores de la marca maxwell modelo BMOD165, cuyas especificaciones se muestran en el anexo A, los cuales son conectados en serie para cumplir con las especificaciones de diseño solicitadas mostradas en la tabla 3.3. El UC se muestra en la figura 3.4.



**Figura 3.4. Ultracapacitor.**

Las especificaciones del UC fueron definidas a partir del cálculo de requerimiento energético del VE realizado en [9] y se muestran en la tabla 3.3.

**Tabla 3.3. Especificaciones del banco de ultracapacitores.**

Banco de ultracapacitores	
<b>Capacitancia nominal (Faradios)</b>	82
<b>Voltaje máximo (Volts)</b>	80
<b>Unidades</b>	2
<b>Masa (kg)</b>	27
<b>Volumen total (litros)</b>	50

### 3.1.4 Acondicionadores de potencia

El uso de convertidores CD/CD en el SPH seleccionado es de suma importancia ya que de acuerdo a las características de la celda de combustible y el banco de baterías se requiere un acondicionamiento en los niveles de tensión para realizar la interconexión entre las fuentes y el bus de CD. Las especificaciones de los convertidores se muestran en la tabla 3.4.

Tabla 3.4. Especificación de los convertidores.

Parámetro	Valor	Unidad
Voltaje de entrada	100	V
Voltaje de salida	$V_{inf} - V_{sup}$	V
Potencia	10000	W
Frecuencia de conmutación	50000	Hz

La variación del voltaje de salida de los convertidores permitido para la interconexión con el bus de CD se define de acuerdo a la zona de operación del *driver* utilizado en el sistema de tracción del VE, el cual opera en un rango comprendido desde los 57 V hasta los 80 V. Por esta razón se definió que los niveles de voltaje quedarán comprendidos de la siguiente manera.

- El nivel alto del bus de CD ( $V_{sup}$ ) es de 80V.
- El nivel medio del bus de CD ( $V_{med}$ ) es de 70V.
- El nivel bajo del bus de CD ( $V_{inf}$ ) es de 60V.

El variar el valor del voltaje del bus de CD dentro de este rango garantiza que el *driver* del sistema de tracción del VE siempre se encontrará en condiciones de operar.

Cada uno de estos convertidores cuenta con un control de corriente de salida para así poder controlar la cantidad de corriente que cada una de las fuentes de energía entregará al sistema de tracción del VE.

Una vez definido todo lo anterior se procedió a implementar los convertidores para la celda de combustible y el banco de baterías, los cuales se muestran en la figura 3.5 a y 3.5 b.

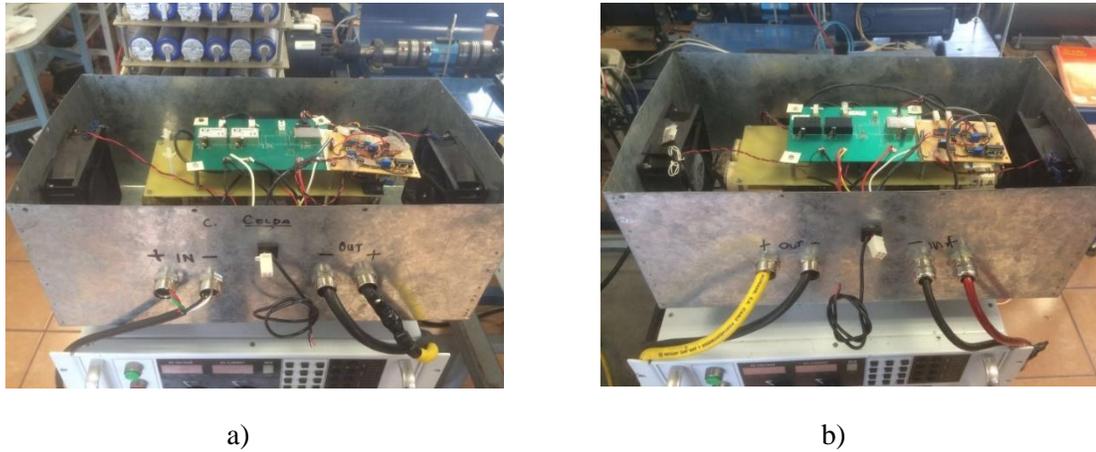


Figura 3.5. a) Convertidor de la celda de combustible; b) Convertidor del banco de baterías

### 3.2 Instrumentación del sistema de potencia híbrido

Una vez implementados los elementos que integran el SPH se realizó la instrumentación del mismo.

Esta etapa consta del desarrollo de los sensores necesarios para el funcionamiento de la EME, la cual incluye un sensor de voltaje, un sensor de corriente y un sensor de velocidad (*encoder*).

#### 3.2.1 Sensor de velocidad

El sensor de velocidad es una parte esencial para el desarrollo de la EME ya que es un parámetro que nos sirve para fijar el voltaje requerido en el bus de CD.

Esta medición se realizó a través del *encoder* con el que cuenta el motor de inducción, el cual entrega dos señales (cuadradas) que varían su frecuencia de acuerdo a la velocidad angular del motor (rad/s).

Para lograr medir la velocidad a través del *NI myRio* es necesario convertir la frecuencia de la señal entregada por el *encoder* a un nivel de voltaje.

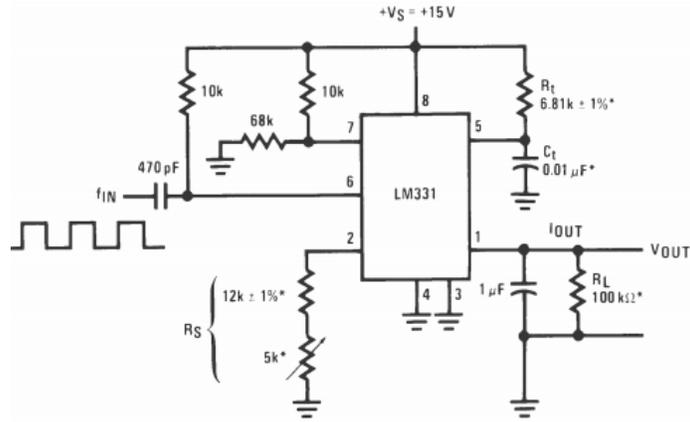
Esto se realiza mediante un convertidor de frecuencia a voltaje (LM331), el cual brinda una salida de voltaje equivalente a un valor de frecuencia que se calcula a través de la ecuación 3.1.

$$V_o = F_{IN} \times 2.09V \times \frac{R_L}{R_S} \times (R_t C_t) \quad (3.1)$$

Con esto se logró medir la velocidad angular del motor (rad/s), posteriormente, mediante la ecuación 3.2 se convierten los (rad/s) a revoluciones por minuto (rpm). Finalmente a través de la ecuación 2.6 se calcula la velocidad lineal del VE (km/h).

$$rpm = \left(\frac{rad}{s}\right) \left(\frac{1rev}{2\pi rad}\right) \left(\frac{60s}{1min}\right) \quad (3.2)$$

El circuito utilizado para realizar esta conversión se muestra en la figura 3.6.



**Figura 3.6. Configuración del circuito convertidor de frecuencia a voltaje.**

Los niveles de velocidad se definen de acuerdo al perfil de manejo con el que se llevarán a cabo las pruebas. Con base a esto se define que los niveles de velocidad quedaran comprendidos de la siguiente manera.

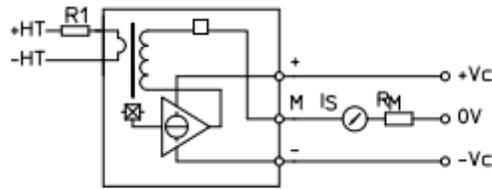
- La velocidad baja está comprendida entre los 0 km/h y los 14 km/h.
- La velocidad media está comprendida entre los 15 km/h y los 24 km/h.
- La velocidad alta está comprendida desde los 25 km/h en adelante.

### 3.2.2 Sensor de voltaje

El sensor de voltaje se requiere para monitorear el voltaje del bus de CD que de acuerdo a la EME diseñada debe oscilar entre los 60V y 80V.

Para ello se seleccionó el sensor de voltaje de la marca LEM modelo LV25-P cuyas características se detallan en el anexo B.

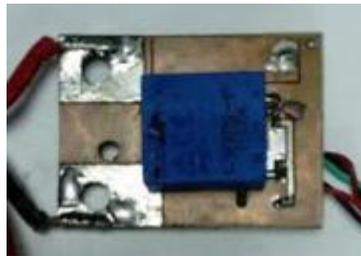
Este sensor requiere un circuito auxiliar como el que se muestra en la figura 3.7 donde +HT y -HT son las terminales en las cuales se conecta el voltaje que se desea monitorear, R1 es la resistencia que limita la corriente en el primario (debido a que cuenta con un transductor de corriente de efecto Hall) y brinda la precisión en la medición, R<sub>M</sub> es la resistencia de medición y es necesaria para convertir la salida del sensor a un nivel de voltaje. Por último +Vc y -Vc son las terminales de alimentación del sensor (+15V y -15V).



**Figura 3.7. Circuito auxiliar del sensor de voltaje.**

La función de este sensor es acondicionar la medición del nivel de voltaje en el bus de CD (que varía entre 60V y 80V) de tal forma que pueda ser leído en el puerto analógico del *NI myRio*.

Finalmente se implementó la tarjeta del circuito impreso (PCB) y se muestra en la figura 3.8.

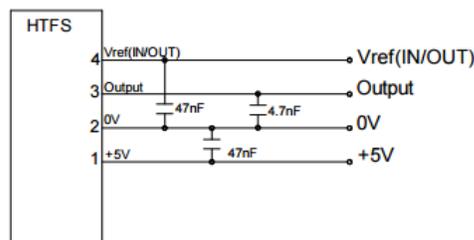


**Figura 3.8. Tarjeta del sensor de voltaje.**

### 3.2.3 Sensor de corriente

Este sensor es necesario para la medición de corriente demandada por el sistema de tracción y es parte importante en la EME ya que de acuerdo a la corriente demandada se realiza la división de corriente entre las distintas fuentes del SPH.

A diferencia del sensor de voltaje, este sensor ofrece una salida de voltaje por lo cual no requiere alguna resistencia de medición simplemente basta con agregar algunos capacitores en la alimentación y la salida de voltaje tal y como se muestra en la figura 3.9.



**Figura 3.9. Conexión requerida para el sensor de corriente.**

Donde  $V_{ref}$  es un voltaje de referencia en caso de requerir una aplicación en lazo cerrado,  $Output$  es la salida del sensor (dada en volts), 0V es la tierra del sensor y +5V es la alimentación del mismo.

El voltaje de salida del sensor de corriente se define a través de la ecuación 3.3.

$$V_o = V_{ref} \pm 1.25 \cdot \frac{I_P}{I_{PN}} \quad (3.3)$$

Donde  $V_o$  es el voltaje de salida del sensor de corriente,  $V_{ref}$  es el voltaje de referencia (el cual se define de la siguiente manera:  $V_{ref} = \frac{1}{2} v_c$ ),  $I_P$  es la corriente que se estará midiendo e  $I_{PN}$  es la corriente nominal del sensor (en este caso 400A).

### 3.3 Implementación de la estrategia de manejo de energía

Una vez concluido y ensamblado el SPH con su correspondiente instrumentación se continuó con el desarrollo de la EME.

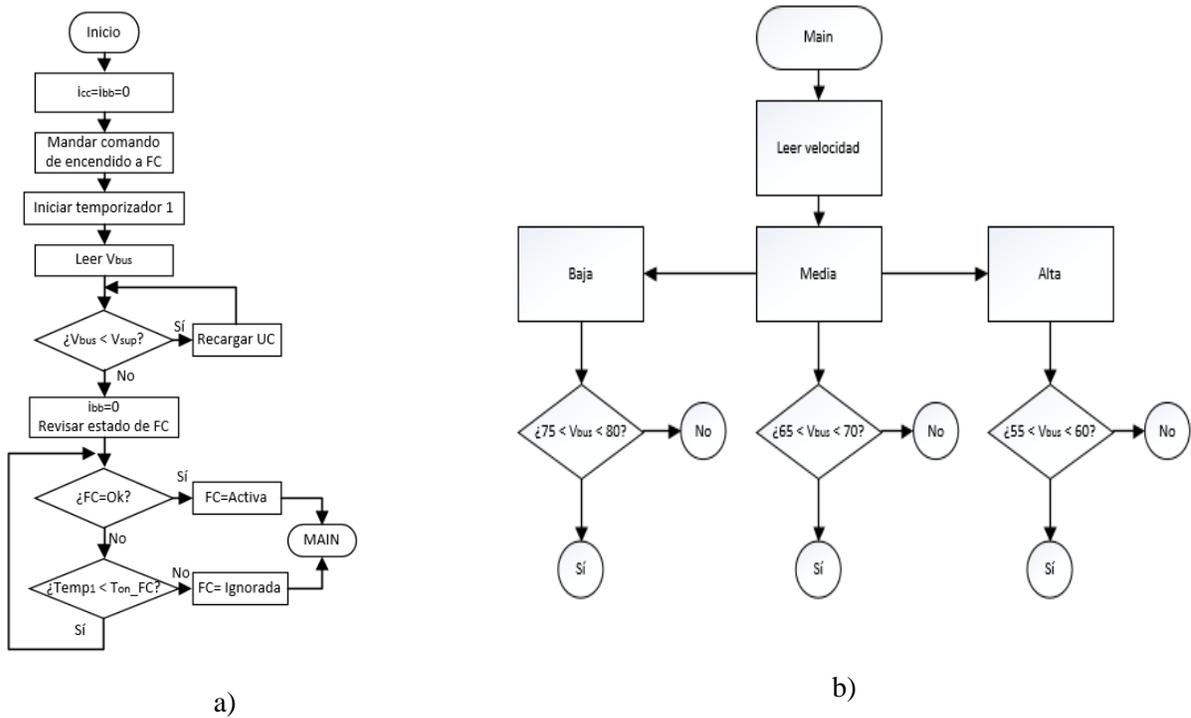
Dicha EME se implementó en el software LabVIEW con ayuda de la plataforma de desarrollo *NI myRio*, la cual se encarga de adquirir y procesar las señales de entregadas por los sensores y así mismo se encarga de enviar las señales de referencia a los convertidores del SPH.

Antes de llevar a cabo la implementación de la EME es necesario recordar los valores definidos para cada una de las variables que forman parte esta. Estos valores se muestran en la tabla 3.5. Estas variables son importantes ya que los rangos de operación de cada una de ellas se consideran en la programación de la EME dentro del software LabVIEW.

**Tabla 3.5. Rangos de las variables de la EME.**

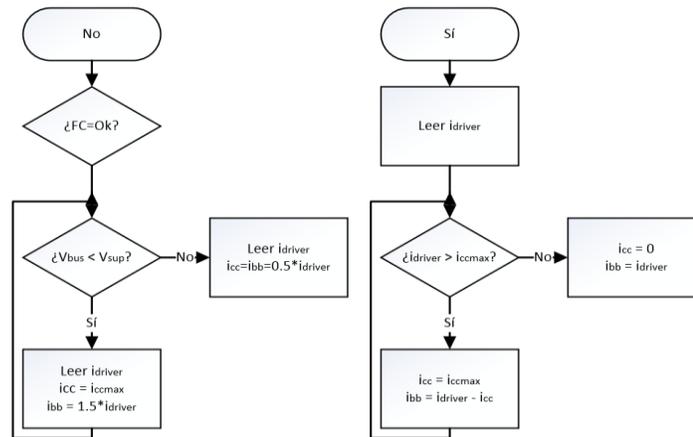
<b>Parámetro</b>	<b>Rango</b>
<b>Voltaje bajo (Volts), <math>V_{inf}</math></b>	55 - 65
<b>Voltaje medio (Volts), <math>V_{med}</math></b>	66 - 75
<b>Voltaje alto (Volts), <math>V_{sup}</math></b>	76 - 80
<b>Velocidad baja (km/hr)</b>	0 - 14
<b>Velocidad media (km/hr)</b>	15 - 25
<b>Velocidad alta (km/hr)</b>	25 en adelante
<b>Corriente máxima de salida del convertidor de la celda de combustible (A), <math>i_{ccmax}</math></b>	15

Una vez establecidos los valores para las variables que se contemplan en el diseño de la EME se lleva a cabo la implementación de esta. Como se ha mencionado anteriormente, la EME fue programada en el software LabVIEW. Esta programación se basó en el diagrama de flujo de la EME mostrado en la figura 3.10.



a)

b)



c)

**Figura 3.10. a) Etapa de precarga del banco de capacitores; b) Etapa de definición del nivel de voltaje del bus de CD; c) Etapa de distribución de corrientes.**

La primera parte del programa se encarga de iniciar las referencias de corriente de salida de los convertidores en 0A. Además se encarga de enviar la señal de encendido para la celda de combustible.

En la segunda etapa se inicia la medición de voltaje en el bus de CD y se despliega en el panel frontal del programa realizado en LabVIEW. Así mismo se inicia un temporizador con el tiempo de espera necesario para conocer el estado de la celda de combustible.

En esta etapa también se realiza la precarga del ultracapacitor. Este proceso se lleva a cabo definiendo las referencias de corriente de salida de los convertidores a través del panel frontal del programa realizado.

Finalmente la tercera etapa es la encargada de medir la velocidad, fijar el nivel de voltaje del bus de CD y distribuir las corrientes de la celda de combustible y el banco de baterías.

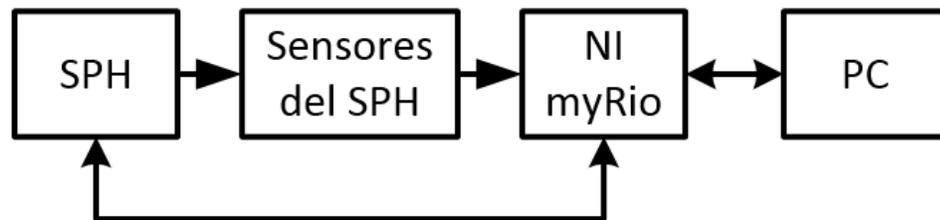
En la figura 3.11 se puede apreciar el diagrama de bloques del funcionamiento de la EME.

En este diagrama se observa que a través de los sensores instalados en el SPH se realiza la comunicación entre el *NI myRio* y el SPH.

La información recopilada por cada uno de los sensores (velocidad, voltaje y corriente) es adquirida y procesada a través del *NI myRio*.

Posteriormente el *NI myRio* envía los datos de estas señales a una PC y a través del software LabVIEW se realizan los cálculos necesarios para desplegar los valores de las variables sensadas, es decir, velocidad, voltaje y corriente.

Así mismo, la PC a través del *NI myRio* es capaz de comunicarse con el SPH para definir las consignas de corriente para los convertidores del SPH, el rango en el cual puede variar el bus de CD y los límites de velocidad.



**Figura 3.11. Diagrama de bloques del funcionamiento de la EME.**

Finalmente en la figura 3.12 se muestra el panel frontal del programa realizado en LabVIEW.

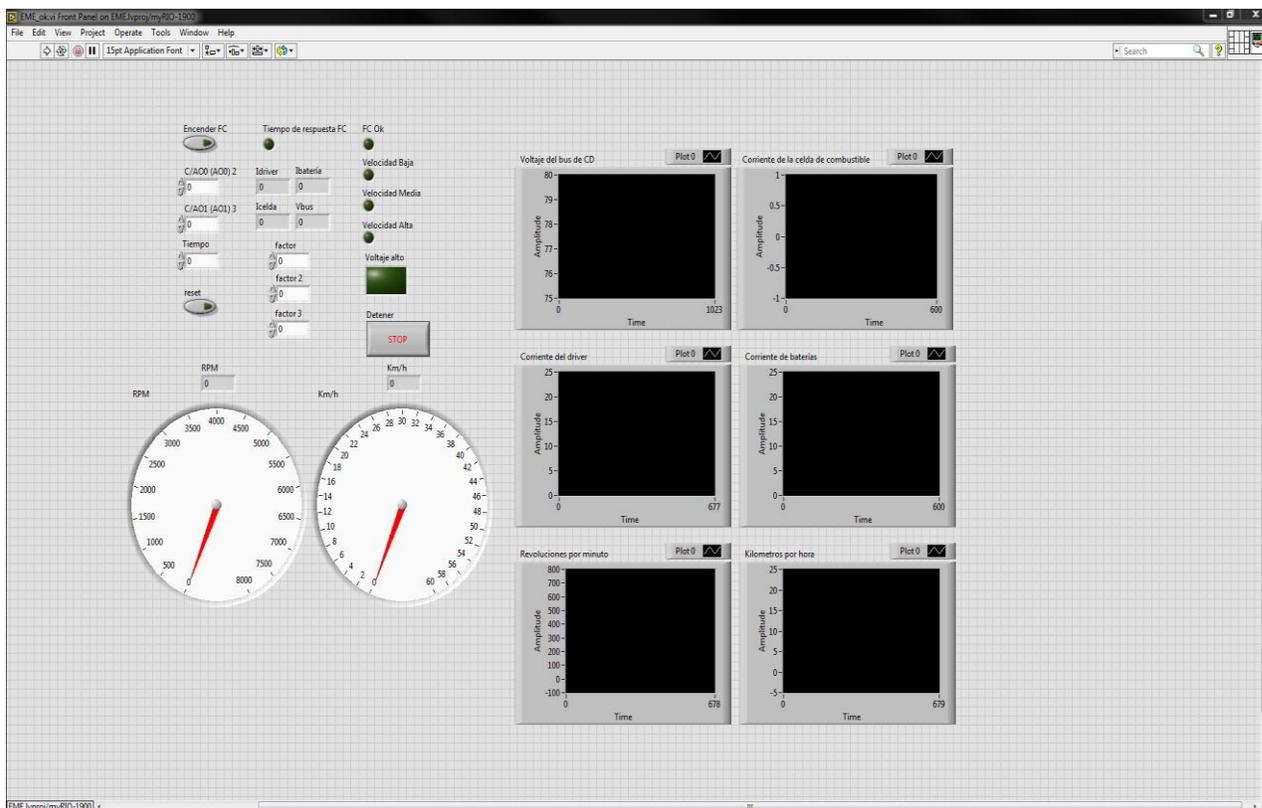


Figura 3.12. Panel frontal del programa realizado en LabVIEW.

### 3.4 Instalación del sistema de potencia híbrido

Por temas de seguridad antes de instalar el SPH en el VE, se realizó la instalación de este en un banco de pruebas. Posteriormente se realizó una serie de pruebas para validar que el correcto funcionamiento del SME.

Una vez aprobado el correcto funcionamiento del SME se realizó la instalación en el VE.

#### 3.4.1 Banco de pruebas

En el laboratorio de máquinas eléctricas se cuenta con un banco de pruebas, el cual emula el sistema de tracción de un VE.

Antes de llevar a cabo las pruebas en el VE se decidió que por seguridad y tener pruebas controladas se validara la EME en este banco de pruebas.

En este caso las fuentes de alimentación, es decir, la celda de combustible y las baterías fueron emuladas a través de fuentes CD/CD. El UC fue sustituido por uno de menor robustez pero con la capacidad requerida por el VE.

Los convertidores CD/CD y sistemas de control son los mismos que posteriormente se instalaron en el VE.

Este banco de pruebas también cuenta con todos los dispositivos de seguridad (fusibles e interruptores termomagnéticos), lo cual permite protección ante cualquier falla.

El banco de pruebas utilizado para la implementación de la EME se muestra en la figura 3.13.

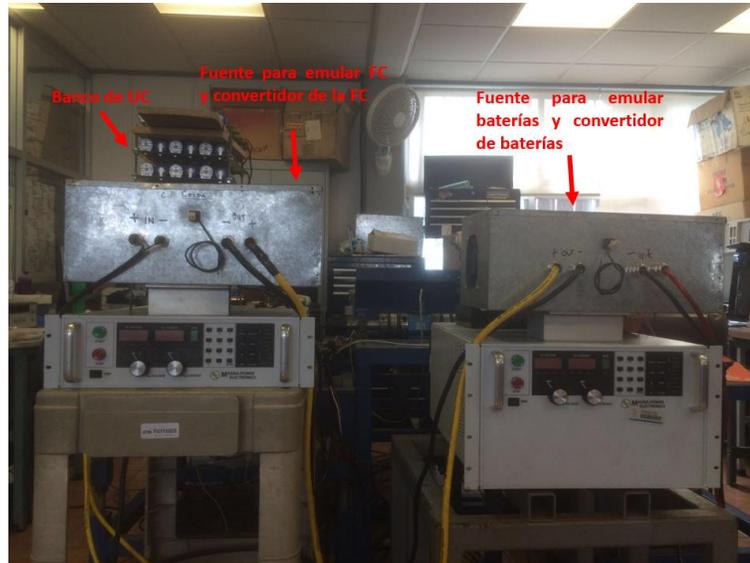


Figura 3.13. Banco de pruebas utilizado para la implementación de la EME.

### 3.4.2 Instalación del sistema de potencia híbrido en el vehículo eléctrico

La distribución del SPH en el vehículo se muestra de las figuras 3.14 a 3.16. Esta distribución se definió por la ubicación de los diferentes subsistemas de tal forma que permitiera una buena distribución de los pesos en todo el chasis del auto.

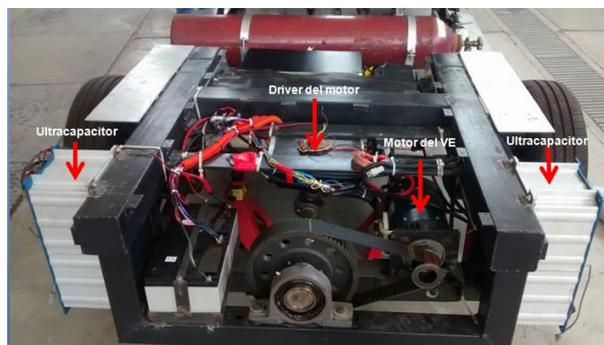


Figura 3.14. Ubicación de la celda de combustible y su convertidor.

Otro aspecto tomado en cuenta para la distribución del SPH fue el conectar los convertidores cerca de sus fuentes de alimentación para reducir la conexión y evitar la generación de cualquier tipo de ruido que pudiera afectar en la operación de los convertidores y otros subsistemas que conforman al VE.



**Figura 3.15. Ubicación del banco de baterías y su convertidor.**



**Figura 3.16. Ubicación del UC, driver del motor y motor del VE.**

Por último se definió que el bus de CD se realizara físicamente en las terminales de los módulos de UC, es decir, la salida de los convertidores y la conexión del *driver* se hacen directamente en el UC para que la transferencia de energía se realice de la manera más directa posible entre las fuentes de energía del vehículo y el driver del motor de inducción.

En la figura 3.17 se muestra el VE completo con todos los elementos que lo conforman.



Figura 3.17. Vehículo eléctrico y distribución del sistema de potencia híbrido.

### 3.5 Conclusión del capítulo

En este capítulo se ha presentado la implementación requerida para el desarrollo del trabajo de tesis planteado.

Parte de este trabajo fue realizado en [9] como se ha mencionado anteriormente, sin embargo, en el trabajo actual se finalizaron actividades como la distribución del SPH y ensamble final del VE, la instrumentación requerida para la implementación de la EME y así mismo se diseñó e implementó una EME diferente a la presentada en el trabajo previo.

Así mismo se presentó el desarrollo del programa realizado en LabVIEW en el cual se implementó la EME.

## **CAPÍTULO 4.**

# **PRESENTACIÓN DE RESULTADOS**

---

En este capítulo se presentan los resultados obtenidos durante las pruebas de la EME en el banco de pruebas del laboratorio y así mismo se presenta la caracterización del VE mediante las pruebas en pista.

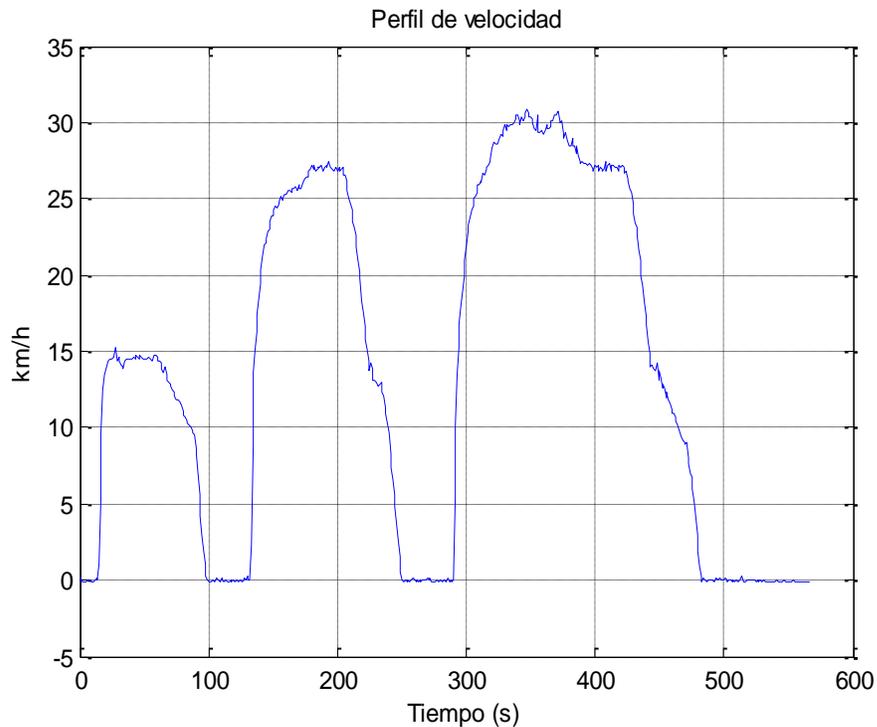
---

#### 4.1 Definición de las pruebas a realizar

Una vez concluido el ensamble del SPH del VE se realizaron las pruebas experimentales para validar la EME y observar cómo se comporta todo el sistema en conjunto.

Una de las pruebas a realizar consistió en verificar la repartición de corriente entre las fuentes de energía de acuerdo a la corriente demandada por el *driver*, así como verificar que el nivel de voltaje en el bus de CD se estableciera en su valor correspondiente de acuerdo a la velocidad del VE.

Esta prueba se realizó a través del banco de pruebas mostrado en la sección anterior. Para realizar esta prueba se utilizó el ciclo de manejo mostrado en la figura 4.1



**Figura 4.1. Ciclo de manejo utilizado para la prueba.**

. Este ciclo de manejo también fue usado para definir los niveles de velocidad del VE (mostrados en la sección 3.3), es decir, los valores de velocidad equivalentes a una velocidad alta, media y baja.

Otra de las pruebas planteadas se realizó con la finalidad de caracterizar el VE, es decir, conocer aspectos relevantes como la eficiencia, autonomía, velocidad máxima alcanzada y aceleración máxima.

Esta prueba fue denominada como la prueba de desempeño y se llevo a cabo en el VE, en una calle cerrada ubicada a las afueras del INNEL (antes IIE), la cual se uso como pista de pruebas. El vehículo listo para estas pruebas se muestra en la figura 4.2.



**Figura 4.2. Ensamble final del vehículo eléctrico.**

Por otra parte, esta prueba se realizó bajo los parámetros mencionados a continuación:

- Medio kilo de hidrógeno = 22.7 kWh
- Banco de baterías de 4 kWh
- Banco de UC de 104 Wh
- Eficiencia de los convertidores ( $\eta_{c1}$  y  $\eta_{c2}$ ) = 90%
- Eficiencia del motor eléctrico ( $\eta_{motor}$ ) = 93%
- Eficiencia de transmisión mecánica ( $\eta_{tm}$ ) = 93%

## **4.2 Resultados obtenidos**

### **4.2.1 Pruebas de laboratorio**

Como se menciona anteriormente, la primera prueba es realizada en laboratorio con ayuda del banco de pruebas implementado, el cual se muestra en la figura 4.3, en la cual se aprecia lo siguiente, en la parte superior izquierda el sistema de tracción eléctrico (*driver* y motor eléctrico), al centro el banco de capacitores diseñado para pruebas en laboratorio, la parte superior derecha muestra las cargas inercial y resistiva, la parte inferior izquierda muestra los convertidores de la celda de combustible y el banco de baterías alimentados a través de las fuentes de potencia, finalmente la parte inferior derecha muestra la interface desarrollada en LabVIEW monitoreando voltajes y corrientes del SPH de acuerdo a la EME implementada.



**Figura 4.3. Banco de pruebas implementado en laboratorio.**

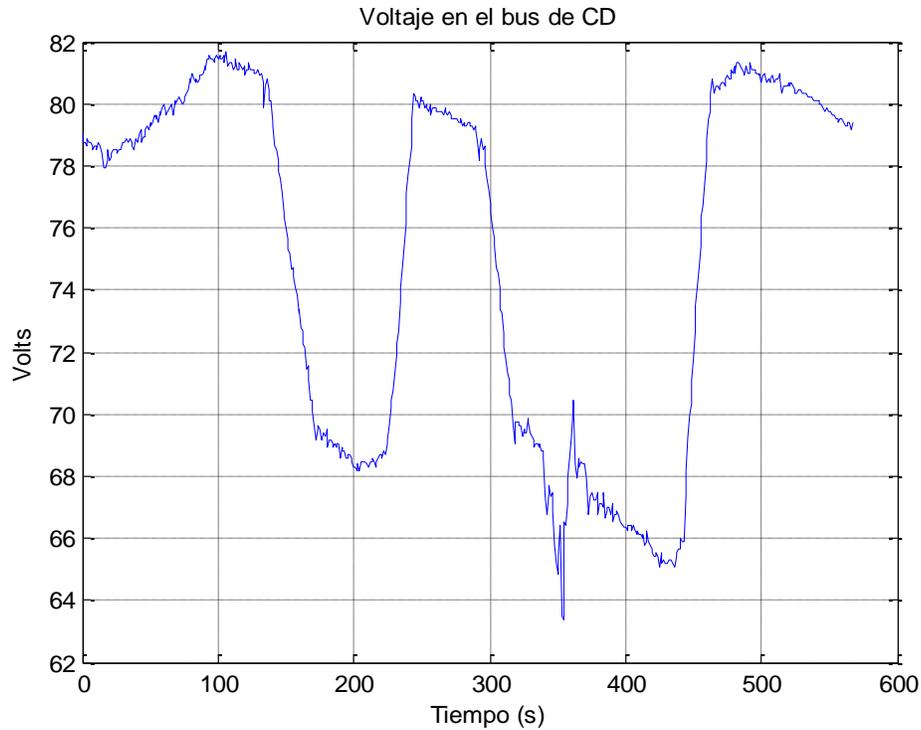
La finalidad de esta prueba es validar el correcto funcionamiento de la EME, lo cual requiere el realizar las mediciones de algunos parámetros importantes.

Los primeros son la velocidad del vehículo y el voltaje del bus de CD ya que como se ha planteado en la estrategia de manejo de energía, el voltaje del bus de CD se ajustará de acuerdo a la velocidad del vehículo.

Posteriormente se monitorea la corriente que demanda el *driver* del motor de inducción ya que dependiendo del valor de esta, se definirán las consignas de corriente para el convertidor de la celda de combustible y para el convertidor del banco de baterías.

Por último, se registran las consignas de corriente asignadas a cada uno de los convertidores y se calcula la corriente que es exigida al UC.

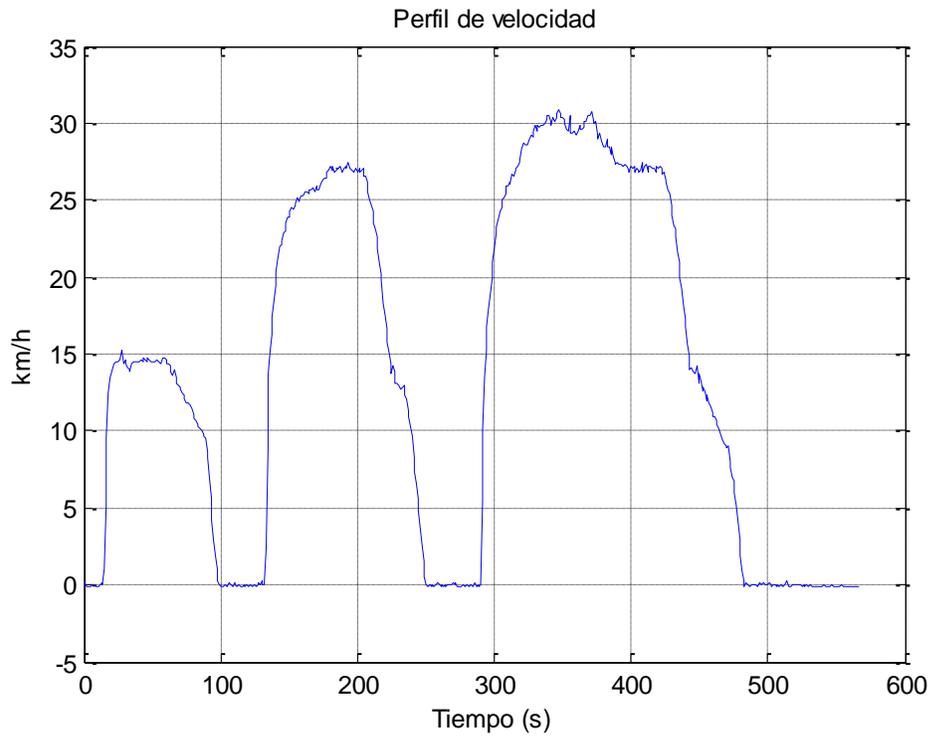
Con ello se comprueba que la EME opere correctamente y bajo las condiciones que fue diseñada. Los resultados se muestran en las figuras de la 4.4 a 4.9 y son las siguientes.



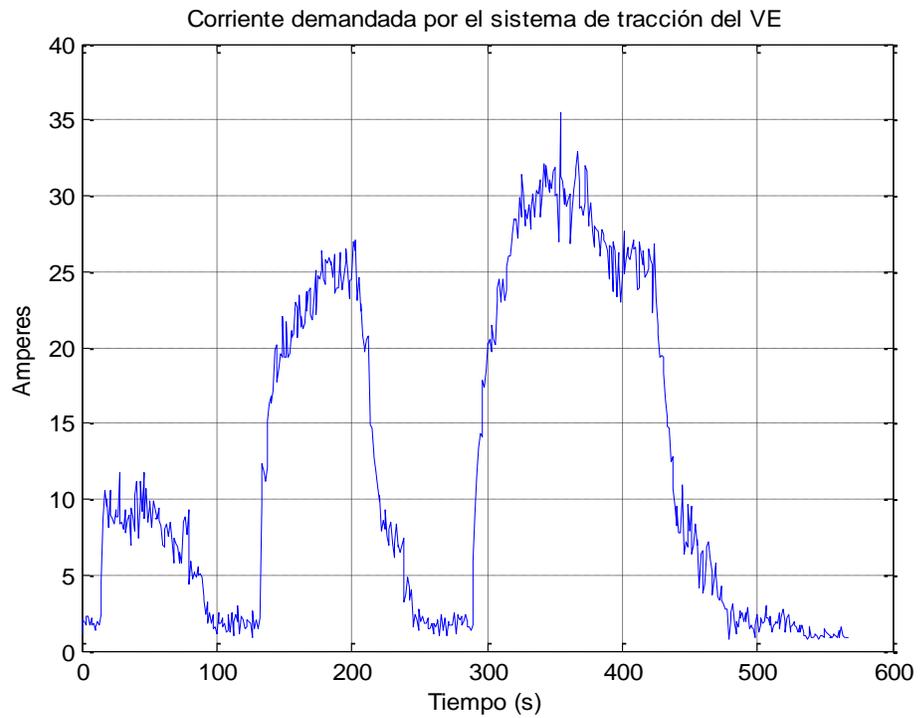
**Figura 4.4. Voltaje del bus de CD.**

En la figura 4.4 se muestra el voltaje del bus de CD, el cual se observa que cumple las características definidas por la EME, es decir, que toma su valor de voltaje asignado de acuerdo a la velocidad del VE (mostrada en la figura 4.5).

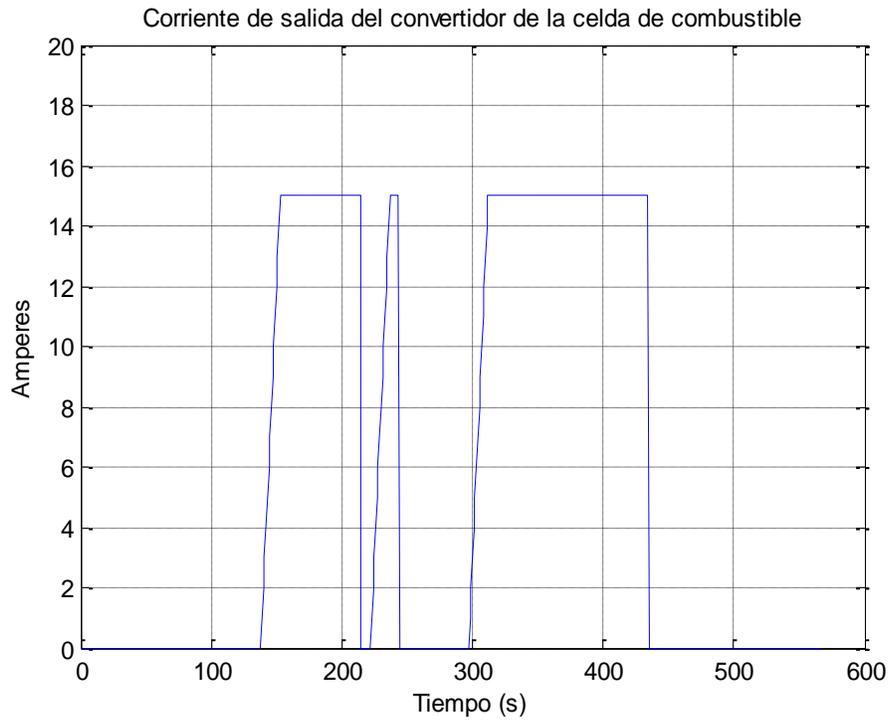
La figura 4.6 muestra la corriente demandada por el sistema de tracción del VE la cual, como es de esperarse sigue el patrón del ciclo de manejo.



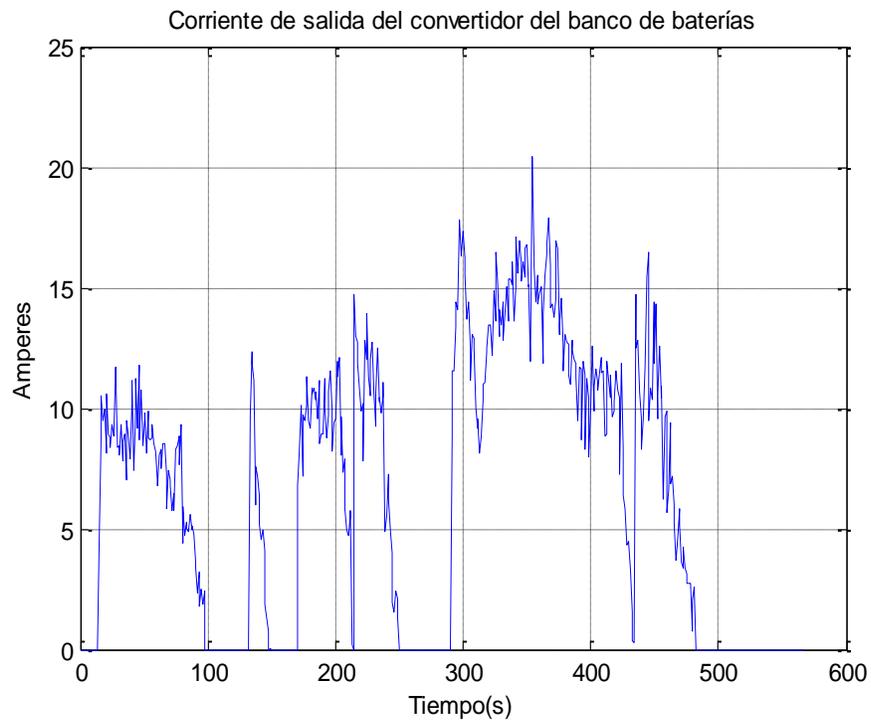
**Figura 4.5. Velocidad del VE.**



**Figura 4.6. Corriente demandada por el sistema de tracción del VE.**



**Figura 4.7. Corriente entregada por el convertidor de la celda de combustible.**



**Figura 4.8. Corriente entregada por el convertidor del banco de baterías.**

En la figura 4.7 se muestra la corriente entregada por el convertidor de la celda de combustible, la cual se observa que también cumple con sus características de diseño, es decir, que cuando la corriente del *driver* no sobrepasa la corriente máxima de salida del convertidor de la celda de combustible,  $icc_{max}$ , la celda no entrega corriente al sistema de tracción.

Sin embargo, cuando el sistema de tracción del VE rebasa la  $icc_{max}$  definida, la corriente que entrega el convertidor de la celda de combustible empieza a crecer de manera suave hasta alcanzar el valor de  $icc_{max}$  definido por la EME. Esta pendiente de crecimiento se consideró para que el voltaje de la celda de combustible no se vea afectado ya que al demandarle cantidades de energía en periodos de tiempo cortos, el voltaje de la celda de combustible puede disminuir de una manera no deseada.

En la figura 4.8 se muestra la corriente entregada por el convertidor del banco de baterías, la cual también cumple con los requisitos de su diseño, es decir, cuando la corriente demandada por el sistema de tracción del VE es menor a 15A, la corriente al convertidor del banco de baterías es igual a la corriente demandada por el sistema de tracción del VE.

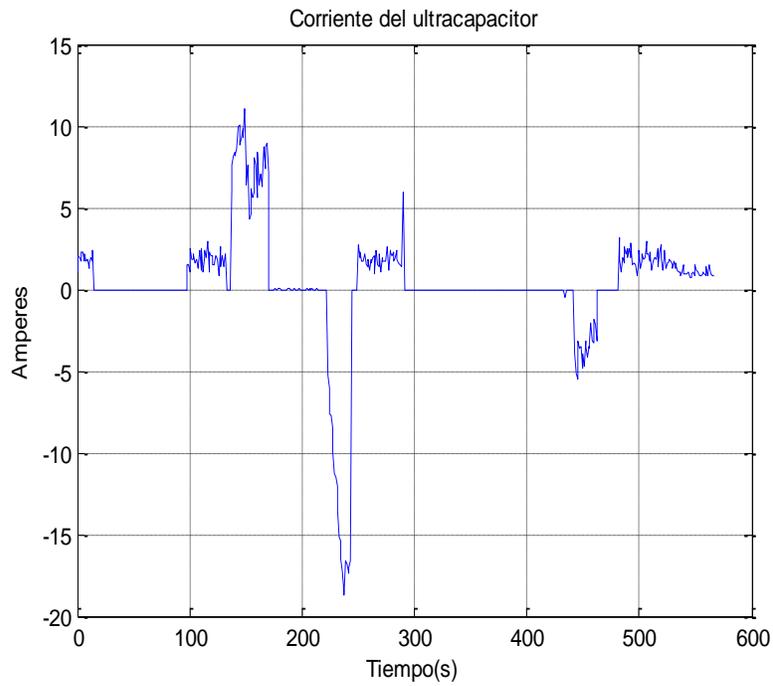
Por otra parte cuando se rebasa la  $icc_{max}$  definida y la celda de combustible empieza su operación, la diferencia entre la corriente que demanda el sistema de tracción del VE y la corriente que entrega el convertidor de la celda de combustible es igual a la corriente que entrega el convertidor del banco de baterías.

La figura 4.9 muestra la corriente del UC, en esta figura se puede observar que el ultracapacitor tiene la capacidad de entregar y recibir energía.

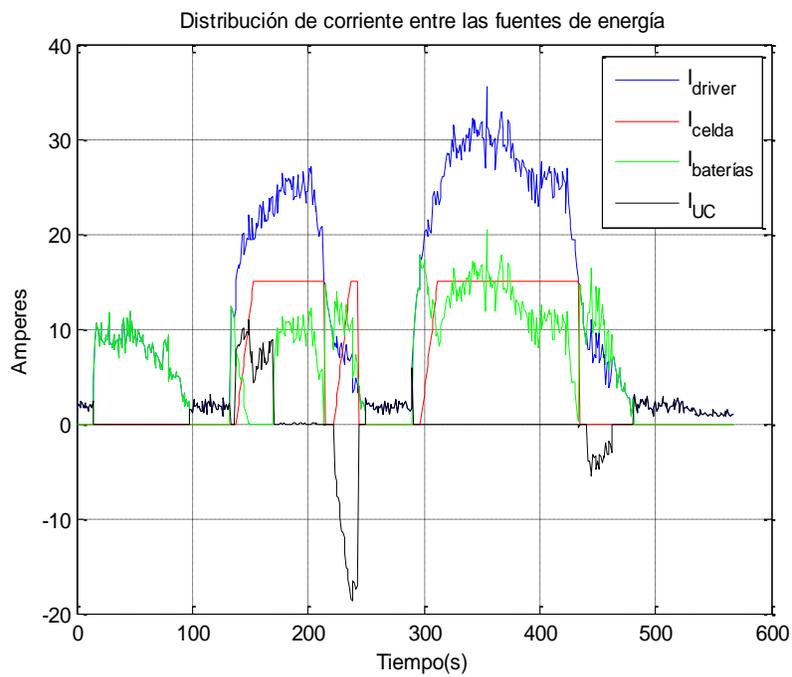
En los casos que la corriente toma un valor positivo quiere decir que el UC está entregando energía al sistema mientras que cuando la corriente toma valores negativos quiere decir que el UC está siendo recargado.

Finalmente en la figura 4.10 se observa la corriente demandada por el sistema de tracción del VE y la distribución de corriente que cada una de las fuentes del SPH aportan al sistema de tracción del VE.

Estos resultados muestran que la EME está operando de manera correcta ya que cumple con los requisitos planteados en el diseño de esta.



**Figura 4.9. Corriente del ultracapacitor.**



**Figura 4.10. Distribución de corriente entre las fuentes de energía.**

#### 4.2.2 Pruebas en pista

Antes de comenzar con las pruebas en pista se realizó la estimación de la eficiencia global del VE ( $\eta_T$ ), la cual se puede calcular debido a que se conoce la eficiencia de cada uno de los subsistemas que lo integran. La eficiencia global del VE se calcula mediante la ecuación 4.1.

$$\eta_T = (\eta_{c1})(\eta_{c2})(\eta_{motor})(\eta_{tm})x100\% \quad (4.1)$$

Al sustituir estos valores se tiene que la eficiencia total del VE es del 70% tal y como se muestra en la ecuación 4.2.

$$\eta_T = (0.9)(0.9)(0.93)(0.93)x100\% = 70.05\% \quad (4.2)$$

Conocida la eficiencia global de sistema se realizaron las pruebas en pista con las condiciones definidas anteriormente. En la figura 4.11, lado izquierdo, se observa la preparación del VE para realizar esta prueba mientras que del lado derecho se observa la pista en la cual se realizaron las pruebas.



**Figura 4.11. Preparación para pruebas de pista y tramo recto para prueba de desempeño.**

De igual manera, se realizaron mediciones de gasto energético a lo largo de un recorrido con lo cual se estima que la autonomía del VE con la energía que suministra la celda de combustible es de 60 km. Es evidente que esta autonomía puede ser mejorada a través de una mejora en la eficiencia de los elementos que integran el VE.

Finalmente a través de las pruebas en pista realizadas se demuestra que la aceleración alcanzada por el VE es superior a  $1 \text{ m/s}^2$  mientras que la velocidad máxima alcanzada es de 45 km/hr aproximadamente, sin embargo, esta fue limitada por la pista en la cual se llevaron a cabo las pruebas.

Con estos datos se obtiene la caracterización del VE, los cuales se resumen en la tabla 4.1.

**Tabla 4.1. Caracterización del VE.**

<b>Parámetro</b>	<b>Valor</b>
<b>Eficiencia (%)</b>	70
<b>Autonomía (km)</b>	60
<b>Aceleración (m/s<sup>2</sup>)</b>	1
<b>Velocidad (km/hr)</b>	45

Los datos contenidos en esta tabla muestran resultados que cumplen con las expectativas de diseño, sin embargo, es posible mejorar en todos los aspectos. Un punto de mejora importante es el incrementar la eficiencia del VE ya que uno de los retos en la construcción de estos es el maximizar el aprovechamiento de la energía disponible. Esto se puede incrementar mejorando aspectos como los acoplamientos mecánicos y diseñando convertidores de potencia con eficiencias más altas.

## **CAPÍTULO 5.**

# **CONCLUSIÓN Y TRABAJOS FUTUROS**

---

En este capítulo se realizan las conclusiones del trabajo de tesis desarrollado sobre el manejo de energía en el SPH en un VE. Así mismo se presentan algunas recomendaciones y oportunidades de mejora para trabajos futuros.

---

## 5.1 Conclusiones

Se pudo lograr la implementación de una estrategia de manejo de energía que permitiera satisfacer la demanda energética de un VE a través de un sistema híbrido de potencia, lo cual es el aporte principal de este trabajo. Esta estrategia se implementó a nivel local y a partir de la velocidad del VE se encarga de fijar un voltaje en el bus de CD adecuado para tener la capacidad de entregar energía al sistema de tracción del VE o recibir energía del mismo. Así mismo se encarga de enviar referencias de corriente a los convertidores de acuerdo a la corriente demandada por el driver y cuando la dinámica de aceleración es más rápida que el tiempo en que responden los convertidores, la corriente es extraída del UC. Para cumplir este objetivo se realizaron diversas actividades dentro de las que destacan:

- El desarrollo e implementación del SPH.
- El desarrollo e implementación de circuitos auxiliares.
- El desarrollo e implementación del algoritmo para realizar la repartición de potencia entre las fuentes del sistema.
- La instrumentación necesaria para el monitoreo de las variables requeridas por la EME para la operación del VE.

Los resultados obtenidos muestran que la estrategia de manejo de energía funciona de manera correcta y el sistema se comporta como se esperaba. Sin embargo, aún es necesario el implementar la estrategia de manejo de energía global, la cual considere también la cantidad de hidrogeno con la que se dispone y el estado de carga de las baterías y ultracapacitores para hacer más optimo y eficiente el reparto de energía de las fuentes de energía del vehículo.

Por otra parte se logró caracterizar al VE a través de la realización de pruebas en pista con lo cual se abre la posibilidad de comparar el trabajo actual con trabajos futuros para así llevar a cabo mejoras importantes para el desarrollo de VE. Los puntos que se obtuvieron de esta caracterización son:

- La eficiencia global del sistema.
- La autonomía del VE.
- La aceleración del VE.
- La velocidad del VE.

## 5.2 Trabajos futuros

Como se menciona antes, se logró cumplir los objetivos del trabajo de tesis presentado, sin embargo, con la finalidad de mejorar y enriquecer este trabajo de investigación se pueden implementar y mejorar algunos aspectos.

Uno de ellos es que se lleve a cabo el sistema de manejo de energía global para así lograr optimizar y hacer más eficiente el uso de las fuentes del vehículo.

Esto beneficiaría en que se puede comparar el sistema completo con algunos otros reportados en la literatura y conocer realmente el nivel de eficiencia que se logra con la estrategia de manejo de energía planteada.

Así mismo se puede mejorar aspectos de diseño tanto del sistema mecánico como los sistemas eléctricos que integran al VE para obtener una eficiencia más elevada y así tener un mejor aprovechamiento de la energía contenida en las fuentes de alimentación del VE.

## REFERENCIAS

- [1] M. Ehsani, Y. Gao, S. Gay y A. Emadi, *Modern Electric, Hybrid Electric, and Fuel Cell Vehicles: Fundamentals, theory and design*. ISBN:08493315744, CRC Press, 2005.
- [2] I. Husain, *Electric and Hybrid Vehicles: Design Fundamentals*. ISBN: 9781439811757, CRC PRESS, 2010.
- [3] A. Perujo, C. Thiel y F. Nemry, *Electric Vehicles in an Urban Context: Environmental Benefits and Techno-Economic Barriers*. ISBN: 9789533072876, INTECH, 2011.
- [4] B. Kamil Çağatay, M. A. Gözüküçük y A. Teke, «A comprehensive overview of hybrid electric vehicle: Powertrain configurations, powertrain control techniques and electronic control units,» *Energy Conversion and Management*, vol. 52, n° 2, pp. 1305 - 1313, 2011.
- [5] S. G. Wirasingha y A. Emadi, «Classification and Review of Control Strategies for Plug-In Hybrid Electric Vehicles,» *Transactions on Vehicular Technology*, vol. 60, n° 1, pp. 111 - 122, 2011.
- [6] C. Bo-Chiuan, W. Yuh-Yih y T. Hsien-Chi, «Design and Analysis of Power Management Strategy for Range Extended Electric Vehicle Using Dynamic Programming,» *Applied Energy*, vol. 113, pp. 1764 - 1774, 2014.
- [7] C. C. Chan, «An overview of power electronics in electric vehicles,» *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, vol. 44, n° 1, pp. 3-13, 1997.
- [8] V. Paladini, T. Donato, A. De Risi y D. Laforgia, «Super-capacitors Fuel-Cell Hybrid Electric Vehicle Optimization and Control Strategy Development,» *Energy Conversion and Management*, vol. 48, pp. 3001 - 3008, 2007.
- [9] J. E. Valdez Rezéndiz, *Manejo de Energía en el Sistema de Potencia de un Vehículo Eléctrico*. Tesis de Doctorado en Ciencias, Cenidet, Cuernavaca, Morelos, 2016.
- [10] E. Schaltz, S. J. Andreasen y P. O. Rasmussen, «Design of propulsion system for a fuel cell vehicle,» de *Power Electronics and Applications, 2007 European Conference on*, 2007.
- [11] D. Hoelscher, A. Skorcz y Y. Gao, «Hybridized Electric Energy Storage Systems for Hybrid Electric Vehicles,» de *Vehicle Power and Propulsion Conference, 2006. VPPC*

'06. *IEEE*, 2006.

- [12] S. M. Lukie y A. Emadi, «Effects of Drivetrain Hybridization on Fuel Economy and Dynamic Performance of Parallel Hybrid Electric Vehicles,» *IEEE TRANSACTIONS ON VEHICULAR TECHNOLOGY*, vol. 53, n° 2, pp. 385 - 389, 2004.
- [13] Organisation Internationale des Constructeurs d'Automobiles, «OICA,» [En línea]. Available: <http://www.oica.net/wp-content/uploads//total-inuse-2014.pdf>. [Último acceso: 22 Enero 2017].
- [14] J. Pallisé, F. Guillén, J. Alonso, K. Van Djick, J. Chacón, J. M. Amarilla, F. Soto, B. Díaz Guerra, M. A. Sánchez Fornié y J. M. Corera, *Guía del Vehículo Eléctrico*, Madrid: Energy Management Agency, 2007.
- [15] L. Belloti, R. Buchelini, S. Correa y D. Penas, *Adiós combustibles fósiles, bienvenidos Vehículos Eléctricos.*, Buenos Aires: Universidad de Buenos Aires, 2009.
- [16] Sociedad de Técnicos de Automoción, *El vehículo eléctrico, desafíos tecnológicos, infraestructuras y oportunidades de negocio*, Barcelona: Librooks, 2011.
- [17] C. C. Chan, «The State of the Art of Electric and Hybrid Vehicles,» *Proceedings of the IEEE*, vol. 90, n° 2, pp. 247 - 275, 2002.
- [18] M. Durán, J. Aguilera, G. Guerrero-Ramírez, A. Claudio, L. G. Vela y J. Gudiño-Lau, «Modelado del sistema de tracción para un vehículo eléctrico,» de *Congreso Anual de la Asociación de México de Control Automático*, Puerto Vallarta, Jalisco, México, 2010.
- [19] J. Passille, I. Cairo, J. Comellas, F. Martínez, J. Serra y F. Astals, «Diagnosi i perspectives del vehicle electric a catalunya,» *Asesor para el Desarrollo Sostenible de Cataluña*, Barcelona, España, 2010.
- [20] S. F. Tie y C. W. Tan, «A review of energy sources and energy management system in electric vehicles,» *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 20, pp. 82 - 102, 2012.
- [21] D. J. MacKay, «Sustainable energy without the hot air.,» *Sustainable Energy*, pp. 125 - 126, 2009.
- [22] J. Becker, C. Schaeper y D. U. Sauer, «Energy management system for a multi-source storage system Electric Vehicle,» de *Vehicle Power and Propulsion Conference*, Seoul, 2012.

- [23] B. Capehart, W. C. Turner y W. J. Kennedy, Guide to energy management, Lilburn,GA: The fairmont press, 2008.
- [24] G. Petrecca, Industrial energy management: Principles and Applications, New York: Springer Science+Bussines Media, 1993.
- [25] Y. Zhu, Y. Chen y Q. Chen, «Analysis and Design of an Optimal Energy Management and Control System for Hybrid Electric Vehicles,» 2002.
- [26] M. J. West, C. M. Bingham y N. Schofield, «Predictive Control for Energy Management in all/more Electric Vehicles with Multiple Energy Storage Units,» *Electric Machines and Drives Conference*, vol. 1, pp. 222 - 228, 2003.
- [27] A. Sciarretta, M. Back y L. Guzzella, «Optimal Control of Parallel Hybrid Electric Vehicles,» *IEEE Transactions on Control Systems Technology*, vol. 12, nº 3, pp. 352 - 363, 2004.
- [28] A. Emadi, K. Rajashekara, S. S. Williamson y S. M. Lukic, «Topological Overview of Hybrid Electric and Fuel Cell Vehicular Power System Architectures and Configurations,» *Transaction on Vehicular Technology*, vol. 54, nº 3, pp. 763 - 770, 2005.
- [29] J. Moreno, M. E. Ortúzar y J. W. Dixon, «Energy-Management System for a Hybrid Electric Vehicle, Using Ultracapacitors and Neural Networks,» *Transactions on Industrial Electronics*, vol. 53, nº 2, pp. 614 - 623, 2006.
- [30] J. M. Miller, P. J. McCleer, M. Everett y E. G. Strangas, «Ultracapacitor Plus Battery Energy Storage System Sizing Methodology for HEV Power Split Electronic CVT's,» de *International Symposium on Industrial Electronics*, Dubrovnik, Croatia, 2005.
- [31] M. Kim, Y.-J. Sohn, W.-Y. Lee y C.-S. Kim, «Fuzzy Control Based Engine Sizing Optimization for a fuel cell/battery hybrid mini-bus,» *Elsevier*, pp. 706 - 710, 2007.
- [32] X. Li, J. Li, L. Xu y M. Ouyang, «Power management and economic estimation of fuel cell hybrid vehicle using fuzzy logic,» Beijing, 2009.
- [33] L. Gauchi, A. Bouscaryol, J. Sanz, R. Trigui y P. Barrade, «Fuel Cell, Battery and Supercapacitor Hybrid System for Electric Vehicle: Modeling and Control via Energetic Macroscopic Representation,» de *Vehicle Power and Propulsion conference*, Chicago, IL, 2011.
- [34] I. Alcalá, A. Claudio Sánchez, G. Guerrero, J. Aguayo Alquicira y V. H. Olvares,

«Electric Vehicle emulation based on inertial flywheel and DC machine,» *Dyna*, vol. 81, n° 183, pp. 86 - 96, 2013.

- [35] MathWorks, «MathWorks,» MathWorks, [En línea]. Available: <http://www.mathworks.com/discovery/matlab-gui.html>. [Último acceso: 30 Noviembre 2015].
- [36] N. Jinrui, S. Fengchun y R. Quinglian, «A Study of Energy Management System of Electric Vehicles,» de *Vehicle Power and Propulsion Conference, 2006. VPPC '06. IEEE*, Windsor, UK, 2006.
- [37] J. R. Flores Hernández, I. L. Albarrán Sánchez, T. Romero Castañón, U. Cano Castillo, F. Loyola Morales, M. d. J. López Pérez, J. De la Cruz Soto, R. M. Félix Navarro y M. Beltrán Gastélum, «Desarrollo de nuevos nanomateriales diseñados para su aplicación en la tecnología de celdas de combustible tipo PEM,» *Boletín IIE*, vol. 40, n° 3, pp. 108-113, 2016.

# **ANEXOS**

## Anexo A. Especificaciones de baterías y ultracapacitores.

El banco de baterías fue integrado por ocho módulos de batería marca Valence modelo U1-12XP, el cual se muestra en la figura A1. El voltaje del banco de baterías es de 102 V.



Figura A1: Batería Valence modelo U1-12XP.

Algunas características de estas baterías son las siguientes.

- 2800 ciclos de carga.
- Estabilidad de voltaje.
- Libre de mantenimiento.
- Balanceo intermodular.
- Sistema de manejo de baterías (BMS).
- Indicador LED del estado de batería.

Las especificaciones del modelo U1-12XP se muestran en la tabla 2.

Tabla A1: Especificaciones de batería Valence modelo U1-12XP.

Especificaciones		U1-12XP
Voltaje nominal del módulo		12.8 V
Capacidad nominal (23°C)		40 Ah – 512 Wh
Peso (aproximado)		6.5 kg
Dimensiones LxAxH (mm)		197x131x182
Energía específica		79 Wh/kg
Densidad de energía		110 Wh/l
Descarga estándar @25°C	Máxima corriente de carga continua	80 A
	Corriente de carga pico	120 A
	Voltaje mínimo	10 V
Recarga estándar	Máximo voltaje de carga	14.6 V
	Voltaje de flotación	13.8 V
	Corriente recomendada	20 A
	Tiempo de recarga	2.5 hrs

<b>Resistencia interna de CD</b>	15 mΩ
----------------------------------	-------

Por otra parte el UC fue realizado con la conexión en serie de dos ultracapacitores de la marca Maxwell modelo, el cual se muestra en la figura A2 y sus especificaciones se muestran en la tabla A2. Algunas de sus características y beneficios son los siguientes:

- Más de 1,000,000 de ciclos de carga o en su defecto 10 años de vida útil.
- Voltaje de operación de 48V de CD.
- Celdas balanceadas.
- Sensor de temperatura.
- Sensor de voltaje.
- Alta densidad de potencia.



Figura A2: Ultracapacitor marca Maxwell modelo BMOD165.

Tabla A2: Especificaciones de ultracapacitor marca Maxwell modelo BMOD165.

Especificaciones		BMOD165
<b>Capacitancia nominal</b>		165 F
<b>Resistencia serie máxima (ESR)</b>		6.3 mΩ
<b>Voltaje nominal</b>		48 V
<b>Voltaje máximo</b>		51 V
<b>Máxima corriente continua</b>		130 A
<b>Pico máximo de corriente (1s)</b>		1900 A
<b>Temperatura de operación</b>	Máxima	65°C
	Mínima	-40 °C
<b>Peso (kg)</b>		13.5
<b>Dimensiones LxAxH (mm)</b>		418x194x179
<b>Volumen (lts)</b>		14.5
<b>Sensor de temperatura</b>		Termistor NTC
<b>Capacidad de almacenamiento</b>		52.8 Wh
<b>Ciclos de carga</b>		1'000,000

## Anexo B. Especificaciones del sensor de voltaje, sensor de corriente y plataforma de desarrollo NI myRio

El sensor de voltaje seleccionado es el LV25-P, el cual tiene un rango de medición que va desde los 10V hasta los 500V y se muestra en la figura B1.



Figura B1: Sensor de voltaje.

Algunas de sus características son las siguientes:

- Excelente precisión.
- Es lineal.
- Tiempo de respuesta rápido.
- Amplio ancho de banda.
- Alta inmunidad a interferencias externas.
- Aislamiento de hasta 1600V.

El sensor seleccionado para cumplir con esta tarea es el HTFS400-P, el cual tiene un rango de medición que va desde los 0A hasta los 400A y se muestra en la figura B2.



Figura B2: Sensor de corriente.

Algunas de sus características son las siguientes:

- Principio de medición de efecto Hall.
- Aislamiento galvánico entre los devanados primario y secundario.
- Bajo consumo de potencia.
- Alimentación de +5V.
- Alta inmunidad a interferencias externas.

Finalmente como se ha mencionado, la EME se implementó en el software de National Instruments conocido como LabVIEW, el cual se apoya de la plataforma de desarrollo *NI myRIO*.

Esta es una plataforma de desarrollo del fabricante National Instruments y se muestra en la figura B3.



Figura B3: Plataforma de desarrollo NI myRIO.

Algunas de sus características son las siguientes:

- Cuenta con 10 entradas analógicas, 6 salidas analógicas y 40 líneas E/S digitales.
- Tiene comunicación inalámbrica, indicadores LED, push-button y acelerómetro externo.
- Cuenta con un FPGA Xilinx y un procesador dual-core ARM Cortex-A9.
- Programable con LabVIEW o C; adaptable para diferentes niveles de programación.